

# Niekonwencjonalne mosty podwieszane i extradosed

tekst: mgr inż. DAWID KISAŁA, Politechnika Krakowska

Od kilkunastu lat w światowym i polskim mostownictwie pojawiają się nowe konstrukcje, które są ewolucją rozwiązań belkowych i podwieszonych. Obecnie za najbardziej rozpoznawalne uważać możemy mosty typu *extradosed*, które coraz częściej proponowane są jako obiekty o rozpiętości do 200,0 m. Jednak to nie jedyne rozwiązania, których dynamiczny rozwój można obecnie obserwować. W artykule omówiono nowe trendy w kształtowaniu mostów, kładąc nacisk na konstrukcje typu *extradosed*, *under-deck*, podwieszane z kablami umieszczonymi ponad i pod pomostem oraz *extra-intradosed* z uwzględnieniem ich zastosowania oraz charakteru pracy.

## Wstęp

W ostatnich latach widać wyraźny rozwój niekonwencjonalnych konstrukcji mostowych. Najbardziej dynamiczny postęp daje się zauważyć w przypadku konstrukcji typu *extradosed*, które charakteryzują się zastosowaniem zewnętrznego sprężenia dźwigarów głównych mostu. Zastosowanie tego zabiegu powoduje, że wyglądem przypominają konstrukcje podwieszane, podczas gdy charakter ich pracy bardziej zbliża je do obiektów belkowych. Z tego względu początkowo były opory przez wyróżnianiem kolejnego typu konstrukcji, jednak dzisiaj ten podział wydaje się niezaprzeczalny.

Analiza powstających na świecie konstrukcji oraz nowych koncepcji obiektów mostowych ujawnia jeszcze inne nietypowe projekty, które w przyszłości będą częściej pojawiać się jako propozycje przekraczania przeszkód w ciągach dróg kołowych czy linii kolejowych. Zestawienie tych obiektów pokazuje wyraźną tendencję wśród naukowców i projektantów, że mosty typu *extradosed* to tylko pierwszy krok ewolucji. W związku z pojawianiem się kolejnych koncepcji i nowych konstrukcji wydaje się, że obecnie należy dokonać kolejnego zaszeregowania, ponieważ typowy podział (wyróżniający mosty belkowe, *extradosed* i podwieszane) nie bierze pod uwagę położenia kabli sprężających w stosunku do pomostu obiektu [1].

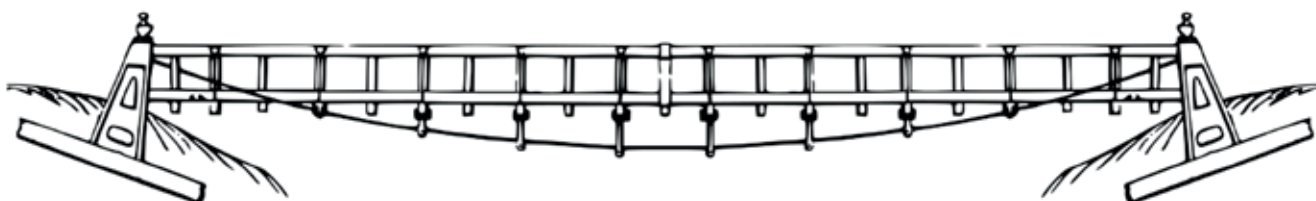
## Mosty *extradosed*

Ich początek datuje się na rok 1988, kiedy to francuski inżynier Jacques Mathivat zaproponował nowy typ mostów z betonu sprężonego. Głównym powodem powstania tych struktur było dążenie do zwiększenia mimośrodowość działania siły sprężającej w taki sposób, aby ograniczenia geometryczne w postaci wymiarów przekroju poprzecznego sprężonej belki nie były kluczowe. Pomysłodawca mostów *extradosed* mówił

o nich, że są naturalną kontynuacją, wynikającą z lepszego poznania działania konstrukcji belkowych. Zaskutkowało to wyprowadzeniem kabli sprężających poza obrys przekroju, z zastosowaniem dewiatorów w postaci pylonów analogicznych do mostów podwieszonych. Jednak w porównaniu do nich obiekty *extradosed* charakteryzują się znacznie niższymi pylonami, których wysokość stanowi ok.  $(\frac{1}{10} + \frac{1}{13})L_c$  (rozpiętości teoretycznej) [2]. Analizy tego typu obiektów wskazują również na ekonomicznie uzasadnione rozpiętości, które zazwyczaj kształtują się w przedziale **(100 ÷ 200) m**. Dźwigary główne mogą mieć stałą wysokość konstrukcyjną lub też zmienną w zależności od przebiegu momentów zginających. Najczęściej wartości te przyjmowane są z przedziału  $(\frac{1}{10} + \frac{1}{25})L_c$ . Smukłość konstrukcji rozumiana jako stosunek rozpiętości przęsła do wysokości ustroju nośnego wynosi ok. 35 [3]. Wszystko to powoduje, że są coraz chętniej stosowaną alternatywą dla drogowych mostów podwieszonych w miejscach, gdzie ze względu na konieczność zastosowania dużych rozpiętości nie jest ekonomicznie uzasadnione zaprojektowanie mostu belkowego.

## Mosty *under-deck*

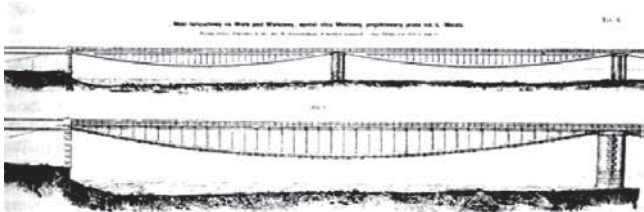
Według angielskiej literatury, pomysł na stworzenie mostu typu *under-deck* (*under-deck / under-spanned cable-stayed bridges*) wywodzi się bezpośrednio z idei zaproponowanej blisko 150 lat wcześniej przez Roberta Stevensona. Zaprojektował on w 1821 r. nad rzeką Almond w Edynburgu łańcuchową konstrukcję wiszącą z cięgnami poprowadzonymi poniżej poziomu pomostu (*under-deck suspension bridge*). Ten obiekt jednak nigdy nie został zbudowany. Dopiero po 11 latach udało się urzeczywistnić ten pomysł w innym obiekcie – w moście Micklewood o rozpiętości ok. 35,0 m, zbudowanym w Doune w Szkocji, a zaprojektowanym przez Jamesa Smitha (ryc. 1) [4]. Analo-



Ryc. 1. Micklewood Bridge, rys. Ch. Drewry, commons.wikimedia.org

giczny pomysł wykorzystał Guillaume Henri Dufour w moście Bergues powstałym w 1834 r. [5].

Warto jednak zwrócić uwagę na podobne idee, które nawet wcześniej, bo 1820 r. pojawiały się już w Polsce [6]. Jednym z nich jest łańcuchowy most wiszący z elementami umieszczonymi poniżej płyty pomostu, zaprojektowany przez Ludwika Metzla (ryc. 2).



Ryc. 2. Projekt łańcuchowego mostu wiszącego Ludwika Metzla z 1820 r. [6]

Mosty z kablami umieszczonymi poniżej pomostu nie są obiektami często pojawiającymi się w światowym mostownictwie. W ostatnich 30 latach powstało ok. 20 konstrukcji, których nie można zakwalifikować do jednej z podstawowych kategorii budowli mostowych [7]. Pierwszym z tej klasy obiektów był wiadukt Weitingen przez rzekę Necker w Niemczech, zaprojektowany przez Fritza Leonhardta w 1978 r. (ryc. 3).



Ryc. 3. Wiadukt Weitingen, fot. K. Gotsch, structurae.net

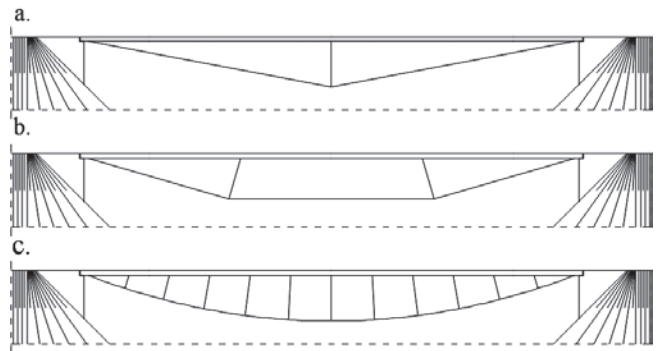
Zbudowanie tego obiektu było konsekwencją rozwiązania zaproponowanego przez projektanta w związku ze złymi warunkami gruntowymi. Pozwoliło na wyeliminowanie końcowych filarów wiaduktu. Konstrukcja została tak zaprojektowana, aby pionowa siła w zastrzale była co do wielkości równa pionowej reakcji wynikającej z wyeliminowanego filara, na który oddziaływałyby ciężar własny oraz inne obciążenia stałe. Również inni autorzy w ostatnich latach proponowali tego typu rozwiązania [5]. Michael Virlogeux w 1993 r. zaprojektował wiadukt Truc de la Fare na autostradzie A75 o rozpiętości 53,0 m (ryc. 4).



Ryc. 4. Wiadukt Truc de la Fare, fot. Mossot, fr.wikipedia.org

Konstrukcje typu *under-deck* z wyglądu przypominają historyczne obiekty wiszące z cięgnami poprowadzonymi poniżej płyty pomostowej, zakrzywionymi na zastrzałach. Cięgna są elementami zakotwionymi w pomoście i pracującymi na rozciąganie, podczas gdy zastrzały poddane są ścisnaniu i wprowadzają siły pionowe w pomost.

Oczywistym wymaganiem oraz w pewnych okolicznościach wadą przy tego typu obiektach jest zachowanie odpowiedniej skrajni, aby nie doszło do kolizji z kablami znajdującymi się pod ustrojem nośnym. Jak pokazuje historia, może być to również czynnik, który zaważy o decyzji o budowie mostu tego typu, ponieważ w 1987 r. projekt wiaduktu Kirchheim Jörga Schlaicha został odrzucony. Władze obawiały się zawalenia obiektu w przypadku uderzenia ciężarówki z wysokim ładunkiem [8].



Ryc. 5. Schematy przykładowych rozwiązań mostów typu *under-deck*: a) z jednym zastrzałem, b) z dwoma zastrzałami, c) z 11 zastrzałami

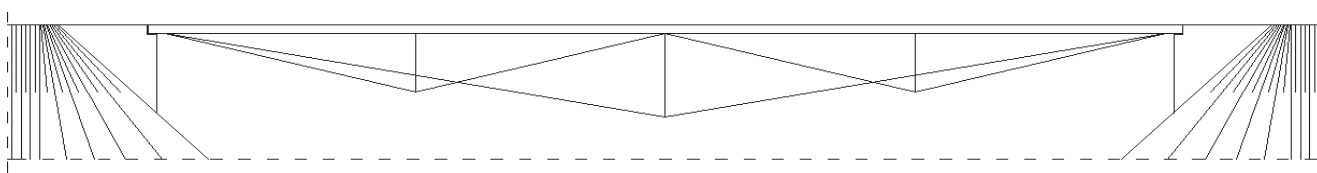
Mosty tego typu uważa się za najbardziej ekonomiczne w przypadku jednoprzęsłowych obiektów o rozpiętości do 80,0 m [9]. Mają one liczne zalety, które mogą przesądzić o ich zastosowaniu. Należą do nich: zwiększenie efektywności poprzez zmianę zasady pracy konstrukcji w stosunku do obiektu belkowego, poszerzenie możliwości konstrukcyjnych, zmniejszenie materiałochłonności ze względu na smuklejsze przekroje, a dodatkowo (co jest oczywiście poglądem subiektywnym) niekonwencjonalny i estetyczny wygląd. Główni autorzy badań nad tymi obiektami dowodzą również, że mogą być one z powodzeniem projektowane z wykorzystaniem liniowej analizy konstrukcji [5]. Kolejną zaletą, której można upatrywać w tego typu obiektach, jest zabezpieczenie systemu kabli przed niekorzystnymi czynnikami atmosferycznymi, a także przed atakami wandalizmu. Ponadto z powodu słabego upowszechnienia takich rozwiązań konstrukcje tego typu będą



Ryc. 6. Kładka dla pieszych w miejscowości Ortisei we Włoszech, fot. dr inż. K. Ryz

Tab. 1. Zestawienie przykładowych mostów typu *under-deck*

Lp.	Nazwa obiektu	Typ	Długość całkowita [m]	Liczba przęseł	Rozpiętość przęsła [m]	Szerokość [m]	Materiał	Rok otwarcia	Kraj
1.	Wiadukt Weitingen nad rzeką Neckar	<i>under-deck</i>	900,0	5	234–3 x 134–264	31,50	stal	1978	Niemcy
2.	Wiadukt Truc de la Fare	<i>under-deck</i>	53,0	1	53,0	5,00	beton sprężony	1993	Francja
3.	Wiadukt Osormort	<i>under-deck</i>	504,0	13	31,7–11 x 39,7–31,7	12,00	beton sprężony	1995	Hiszpania
4.	Most Glacis przez rzekę Danube	<i>under-deck</i>	185,0	3	42–76–46	19,65	beton sprężony	1998	Niemcy
5.	Wiadukt Meaux przez rzekę Marnę	<i>under-deck</i>	1196,0	22	–	31,10	beton sprężony	2004	Francja


 Ryc. 7. Schemat mostu *under-deck* z dwoma poziomami kabli sprężających

z pewnością obiektami wyjątkowymi, przez co mogą stać się ważnymi miejscami z punktu widzenia urbanistyki. Mosty *under-deck* charakteryzują się ciekawym ukształtowaniem, który dodatkowo może być różnicowany przez zastosowanie różnej liczby zastrzałów o zmiennej wysokości. Zwiększenie liczby zastrzałów pozwala na znacznie „gładsze” przejście pomiędzy sąsiednimi segmentami kabli, co poprawia odbiór wrażeń estetycznych całej konstrukcji.

W celu zaprojektowania efektywnego systemu kabli sprężających musimy zapewnić ich duży mimośród w krytycznych przekrojach poniżej pomostu oraz ukształtować ustrój nośny w taki sposób, aby miał względnie małą sztywność giętą – im mniejsza, tym większa jest efektywność systemu kabli i mniejsze straty sprężenia. Niestety zwiększanie smukłości konstrukcji ma też swój punkt graniczny, który wiąże się z odpowiedzią dynamiczną i wibracjami. Redukcja wysokości przekroju zwykle wynosi do 20% (co skutkuje zmniejszeniem ciężaru własnego o ok. 30% oraz redukcją ilości stali sprężającej pomostu w przybliżeniu o 30%) w stosunku do obiektów konwencjonalnych, ponieważ dalsze zmniejszanie wysokości pomostu prowadzi do znacznego zwiększenia przyspieszeń drgań w związku z przejazdem ciężkich pojazdów [5].

Konstrukcje tego typu są kształtowane z użyciem standardowych materiałów, takich jak stal, beton sprężony czy przez zespolenie betonu ze stalą. Spotyka się jednak również nietypowe obiekty, wykonane z drewna, aluminium czy szkła konstrukcyjnego. Zostały one już kilkakrotnie z sukcesem zastosowane w przypadku wiaduktów autostradowych. Jednakże w związku z tym pojawiły się wątpliwości o bezpieczeństwo takich konstrukcji na okoliczność wypadku i uszkodzenia kabli w związku z kolizją z przejeżdżającym pojazdem. Badania [8] pokazują jednak, że nawet w przypadku uszkodzenia 40% kabli przy 100-procentowym obciążeniu użytkowym analizowany obiekt nie powinien ulec katastrofie. Dodatkowo w przypad-

kach mniej ekstremalnych prace naprawcze obiektu mogą odbywać się bez ingerencji w ruch pojazdów odbywający się po pomoście.

W 2012 r. zaprezentowana została nowa koncepcja dwupoziomowych mostów typu *under-deck*, jednak do tej pory nie została ona zrealizowana w rzeczywistości (ryc. 7) [10]. Jej ukształtowanie podłużne jest analogiczne do dawnych konstrukcji kratownicowych typu Finka i Bollmanna [11].

Do rozwoju tego typu konstrukcji oprócz Fritza Leonhardta przyczynił się w dużym stopniu również Jörg Schlaich. Ponadto jako pierwszy zaproponował on nowy typ obiektu łączący most typu *under-deck* z konstrukcją podwieszoną – most podwieszony z kablami znajdującymi ponad i poniżej płyty pomostu (*combined cable-stayed bridges*).

### Mosty podwieszane z kablami ponad i poniżej pomostu

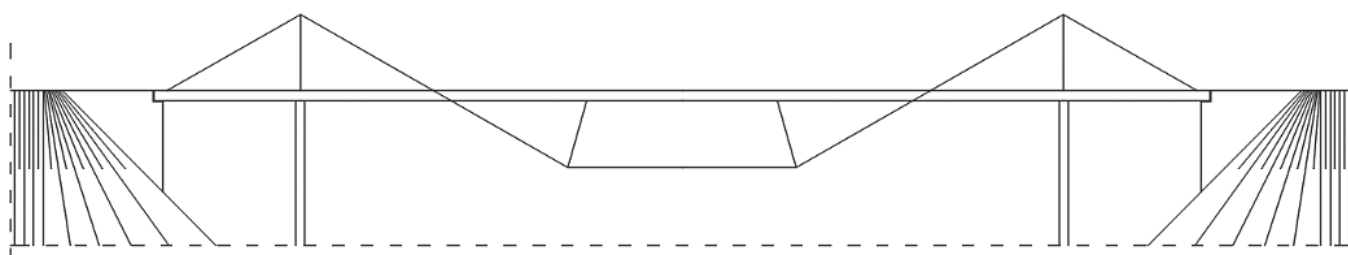
W 1991 r. został wybudowany wiadukt Obere Argen, zaprojektowany przez Jörga Schlaicha, który wyznaczył nowy trend



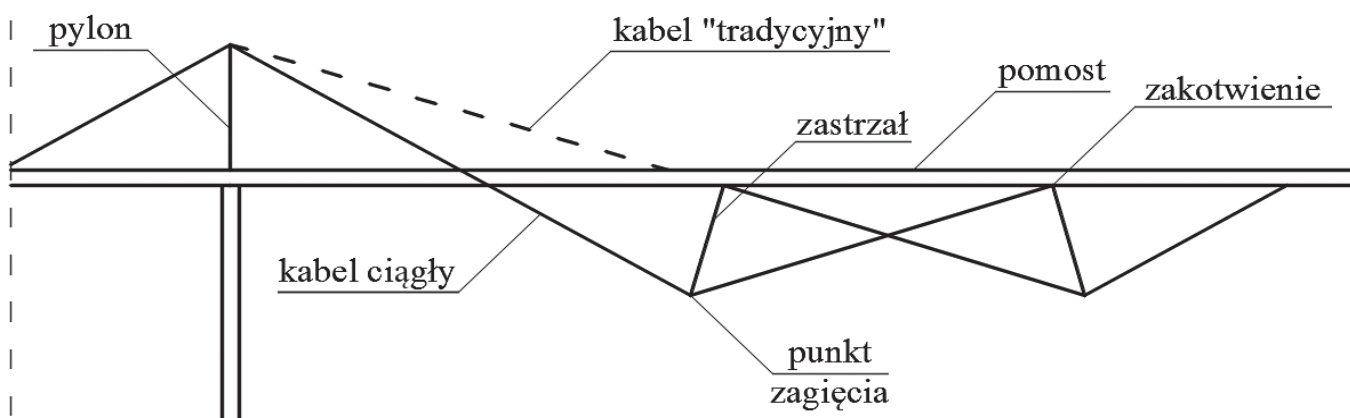
Ryc. 8. Wiadukt Obere Argen, fot. Schlaich, Bergermann und Partner, structurae.net

Tab. 2. Zestawienie przykładowych mostów podwieszonych z kablami poniżej pomostu

Lp.	Nazwa obiektu	Typ konstrukcji	Długość całkowita [m]	Liczba przęseł	Rozpiętość przęseł [m]	Szerokość [m]	Materiał	Rok otwarcia	Kraj
1.	Wiadukt Obere Argen	hybrydowy	770,0	7	42-5 x 86-250	29,00	stal	1990	Niemcy
2.	Most Ayumi przez rzekę Kanogawa w mieście Numazu	hybrydowy	178,1	4	16,6-79,5-2 x 41	7,80	beton sprężony	1999	Japonia
3.	Most Awa Shirasagi	hybrydowy	366,0	4	140-260-105-70	26,30	beton sprężony	-	Japonia
4.	Kładka Valmy	hybrydowy	90,0	1	90,0	4,50	stal	2008	Francja
5.	Kładka Miho	hybrydowy	120,0	1	120,0	7,50	stal	1997	Japonia
6.	Most Springs Hiyoshi	hybrydowy	90,0	1	90,0	5,00	-	1998	Japonia



Ryc. 9. Schemat mostu podwieszonych z kablami ponad i poniżej płyty pomostowej

Ryc. 10. Koncepcja rozwiązania systemu sprężania mostu *extra-intradosed* [13]

w kształtowaniu konstrukcji podwieszonych (ryc. 8). Obiekt ten odznacza się poprowadzeniem systemu kabli nie tylko ponad, ale i pod płytą pomostową. Wiadukt ten o długości 770,0 m przeprowadza sześciopasmową drogę ponad dolinę, jednak tak jak w przypadku konstrukcji Leonhardta i tutaj napotkano problemy związane z warunkami gruntowymi. Zaproponowany system pozwolił na eliminację kłopotliwych podpór i osiągnięcie rozpiętości głównego przęsła na poziomie 255,0 m na wysokości 55,0 m ponad dnem doliny, przy zastosowaniu stalowego przekroju skrzynkowego w celu zmniejszenia ciężaru własnego.

Obiekt ten jako pierwszy wpisuje się w nową kategorię mostów podwieszonych z kablami znajdującymi się nie tylko ponad, ale i pod płytą pomostową (ryc. 9). Są one najczęściej przeprowadzone bez zakotwienia przez płytę pomostową, a następnie zakrzywione na zastrzale i zakotwione w płycie bądź poprowadzone do kolejnego zastrzału. Elementy te pracują najkorzystniej, gdy są połączone przegubowo z pomostem. Wynika to

z chęci nieprzekazywania znacznych momentów zginających na płytę pomostową. Zaleca się również zaprojektowanie w tych przekrojach poprzecznic, a nachylenie zastrzałów powinno pokrywać się z dwusieczną kąta wynikającego z przebiegu kabli.

Mosty podwieszone z kablami ponad i pod płytą pomostu (konstrukcja hybrydowa) są bardzo efektywne, ponieważ pozwalają na uzyskanie bardzo smukłych przekrojów o wysokości rzędu  $\frac{1}{100}$  rozpiętości przęsła. Zaprojektowanie obiektu wymaga jednak oprócz analizy nośności wzięcia pod uwagę również stanu granicznego użytkowalności ze względu na drgania. Mimośród działania siły sprężającej poniżej płyty pomostu powinno się przyjmować na ok.  $\frac{1}{10}$  rozpiętości przęsła, ale każdorazowo decyzja ta powinna zostać poddana analizie zarówno pod względem mechaniki, jak i estetyki konstrukcji.

Za wykorzystaniem tego typu konstrukcji przemawia wiele względów, np. możliwość łatwej wymiany cięgien, zmniejszenie ciężaru własnego oraz redukcja grubości środków, w których

ciągna nie są prowadzone [12]. Dodatkowo pośredni podział przęsła przez zastosowanie zastrzałów korzystnie wpływa na rozkład momentów zginających.

### Mosty extra-intradosed

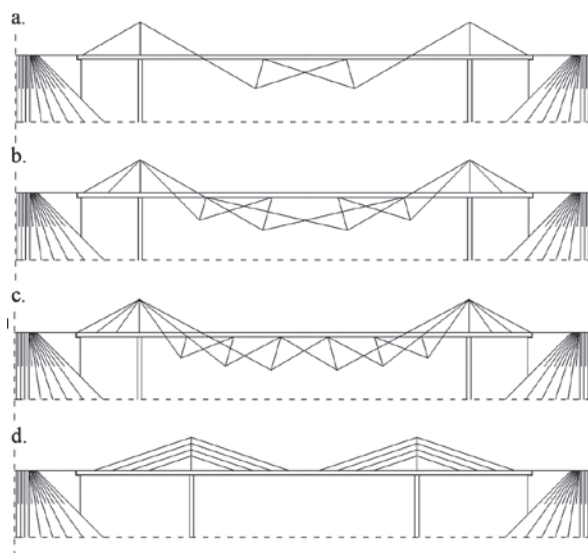
Obecnie rozwijana jest nowa koncepcja stanowiąca ewolucję kształtowania mostów typu *extradosed*, pozwalająca na maksymalizację ramienia siły sprężającej. Nazwa nowego typu obiektów nie jest jeszcze jednoznacznie określona, ale w literaturze angielskojęzycznej można zauważyć tendencję do stosowania określenia mosty *extra-intradosed* (ryc. 10). Charakteryzują się prowadzeniem kabli sprężających nie tylko ponad pomostem, ale i pod nim.

Pierwsze wzmianki o pomysłach na tego typu obiekty można znaleźć w pracach Any M. Ruiz-Teran i Angela C. Aparicio z 2008 r. Proponują oni zastosowanie zwiększonego mimośrodu cięgien w taki sposób, aby ich układ charakteryzował się kształtem zbliżonym do przebiegu momentów zginających. Ostatnią innowacją – zaproponowaną, by jeszcze bardziej poprawić pracę konstrukcji – jest nowy typ zakotwienia, który pozwala tak zmodyfikować tradycyjne mosty *extradosed*, aby dźwigar były podparty zarówno nad, jak i pod pomostem. Dodatkowo zakotwienia umieszczane są w przekroju, w którym znajdują się również zastrzały, zaprojektowane w sposób zapewniający ich stateczność pod wpływem sił ściskających. Skutkuje to tym, że pionowa siła skierowana w dół, wynikająca z obecności zakotwienia, jest równoważona przez pionową siłę skierowaną do góry, pochodzącą z zastrzału. Powoduje to powstanie interakcji pomiędzy kablami i okazuje się, że pozytywnie wpływa na wiele aspektów pracy takiej konstrukcji, m.in. zmniejszenie momentów zginających i ugięć ze względu na większą sztywność, ograniczenie sił w kablach, lepsze parametry dynamiczne oraz mniejszą materiałochłonność [13]. Oczywiście, w miejscu skrzyżowania kabli i zastrzałów należy w projekcie przewidzieć odpowiednie przesunięcie tych dwóch elementów w kierunku poprzecznym. Może to doprowadzić do powstania dodatkowych sił poprzecznych, ale wpływ ten może być zredukowany przez zastosowanie symetrii lub parzystej liczby kabli. Użycie gęstszego rozstawu zakotwień pozytywnie wpływa na rozkład momentów zginających.

Zakrojone na szerszą skalę badania tego typu konstrukcji pokazują, że mogą stać się one w niedługim czasie ciekawą alternatywą dla typowych konstrukcji *extradosed* (ryc. 11). Dodatkowo przemawia za tym znacznie większa możliwość kształtowania tego typu obiektów, chociaż kwestie estetyczne są tutaj sporne. Należy jednak zawsze brać również pod uwagę wady, do których zaliczają się zwiększona liczba kabli sprężających i zakotwień, nieefektywne wykorzystanie kabli wynikające z istnienia pionowej siły skierowanej w dół w miejscu lokalizacji zakotwienia, znacznie bardziej skomplikowane podejście obliczeniowe, konieczność zapewnienia odpowiedniej skrajni pod obiektem oraz dyskusyjny z punktu widzenia estetyki wygląd.

### Podsumowanie

Zaprezentowane przykłady pokazują potencjalne kierunki rozwoju dzisiejszych konstrukcji podwieszonych oraz *extradosed*. Zaznacza się wyraźny trend do jeszcze lepszego wykorzystania możliwości sprężania konstrukcji przez zastosowanie zwiększonego mimośrodu działania siły sprężającej dzięki wykorzystaniu nie tylko przestrzeni ponad obiektem, ale również pod nim. Przy



Ryc. 11. Schematy przykładowych rozwiązań mostów: a., b. i c. typu *extra-intradosed* oraz d. typu *extradosed*

założeniu, że nie ma ograniczeń wynikających ze skrajni, tego typu rozwiązania pozwalają na zwiększenie efektywności oraz zmniejszenie materiałochłonności w stosunku do konstrukcji belkowych, podwieszonych lub *extradosed*.

### Literatura

- [1] Ruiz-Teran A.M.: *Unconventional cable-stayed bridges. Structural behaviour and design criteria*. „Structural Concrete” 2010, Vol. 11, Issue 1, pp. 25–34.
- [2] Flaga K., Torba-Ruchwa J.: *Europa kolebką konstrukcji mostowych typu extradosed*. „Czasopismo Techniczne” 2004, z. 14–B, s. 39–52.
- [3] Kisała D.: „Nowa generacja mostów betonowych – mosty extradosed. Analiza sztywności poprzecznej mostów typu extradosed”. Praca inżynierska. Politechnika Krakowska, 2012.
- [4] Drewry C.S.: *Memoir on Suspension Bridges*. Longman, Rees, Orme, Brown, Green & Longman, London 1832.
- [5] Ruiz-Teran A.M., Aparicio A.C.: *Developments in under-deck and combined cable-stayed bridges*. „Bridge Engineering” 2010, Vol. 163, pp. 67–78.
- [6] Niemierko A.: *Rys historii mostów warszawskich na Wiśle*. „Drogownictwo” 2003, nr 5, s. 145–153.
- [7] Ruiz-Teran A.M., Aparicio A.C.: *Two new types of bridges: under-deck cable-stayed bridges and combined cable-stayed bridges – the state of the art*. „Canadian Journal of Civil Engineering” 2007, Vol. 7, pp. 1003–1015.
- [8] Ruiz-Teran A.M., Aparicio A.C.: *Response of under-deck cable stayed bridges to the accidental breakage of stay cables*. „Engineering Structures” 2009, Vol. 31, pp. 1425–1434.
- [9] Camara A., Ruiz-Teran A.M., Stafford P.J.: *Structural behaviour and design criteria of under-deck cable-stayed bridges subjected to seismic action*. „Earthquake Engineering and Structural Dynamics” 2013, Vol. 42, pp. 891–912.
- [10] Misiunaite I., Daniunas A., Juozapaitis A.: *Unconventional Double-Level Structural System for Under-deck Cable-Stayed Bridges*. „Journal of Civil and Management” 2012, Vol. 18, pp. 436–443.
- [11] Niemierko A.: *Rzecz o kratownicach*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
- [12] Aravinthan T., Witchukreangkrai E., Mutsuyoshi H.: *Flexural behaviour of two-span continuous prestressed concrete girders with highly eccentric external tendons*. „ACI Structural Journal” 2005, Vol. 102, Issue 3, pp. 402–411.
- [13] Xiangbo Meng, Chonghou Zhang: *Extradosed and Intradosed Cable-Stayed Bridges with Continuous Cables: Conceptual Consideration*. „Journal of Bridge Engineering” 2014, Vol. 1, pp. 5–14.



# DOŚWIADCZENIE TECHNOLOGIA ZESPÓŁ

- mosty extradosed
- mosty extra-intradosed
- mosty powieszzone z kablami ponad i pod pomostem
- mosty under-deck

Element stalowej  
głowicy zakotwień  
kabli