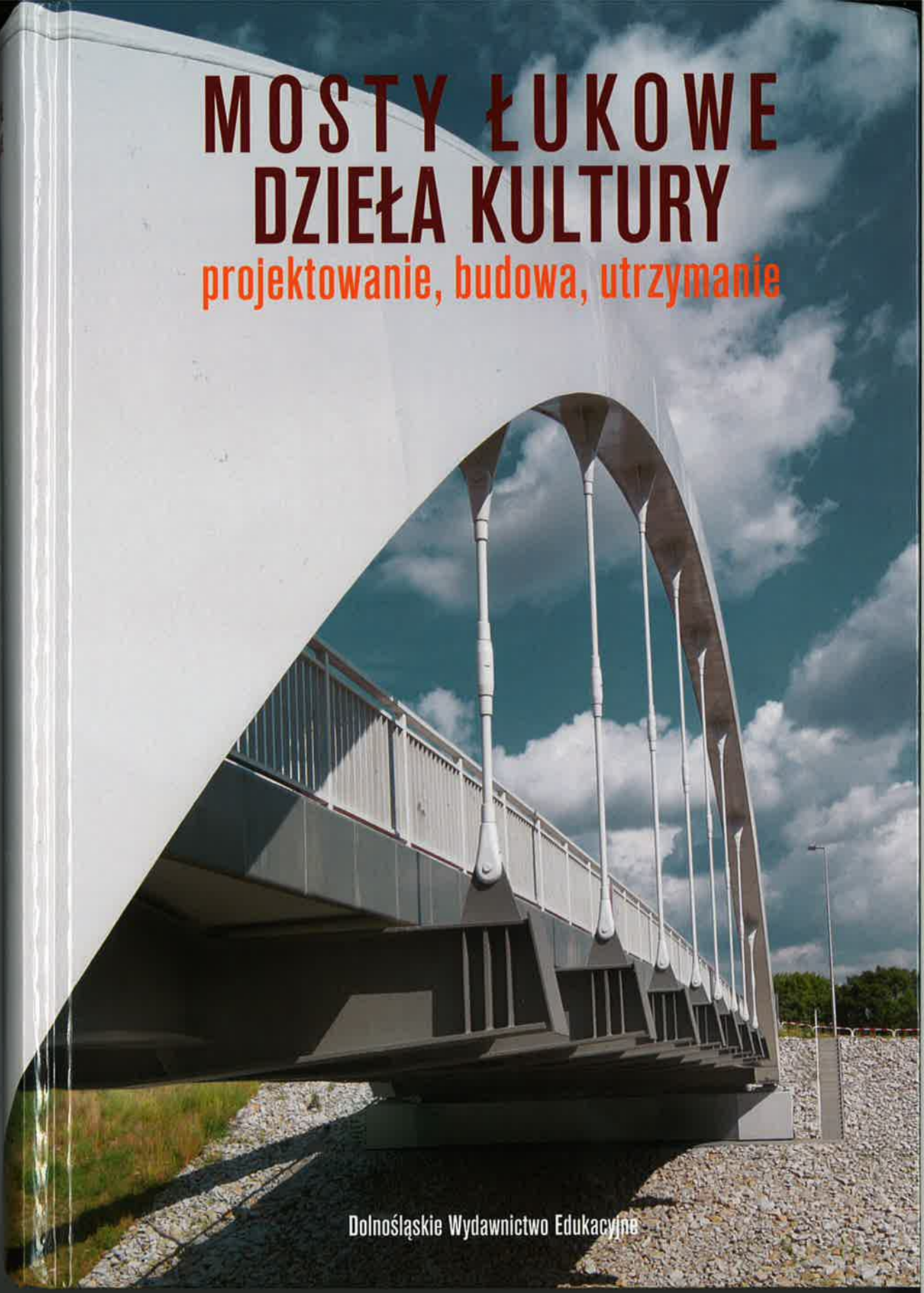
MOSTY ŁUKOWE
DZIEŁA KULTURY
projektowanie, budowa, utrzymanie



Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne

Johann KOLLEGGER[1]
Sara FOREMNIAK[2]
David WIMMER[2]
Dominik SUZA[2]
Susanne GMAINER[3]

BUDOWA MOSTÓW ZA POMOCĄ METODY WZNOSZENIA BALANSOWEGO

1. Wstęp

Kiedy obserwuje się metody konstrukcji mostów łukowych oraz normalnych mostów belkowych, można zauważyć, że w niektórych przypadkach stosuje się te same techniki konstrukcyjne do budowy łuku i dźwigara mostu. Przykładowo, kiedy wysokość nad terenem oraz rozmiar łuku nie są zbyt wielkie, najbardziej ekonomiczną budową będzie ta z zastosowaniem rusztowań montażowych.

Rysunek 1 pokazuje rusztowania montażowe używane do podparcia deskowania podczas wylewania betonu łuku w moście Egg-Graben. Most ten został zaprojektowany na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu z przyświecającą ideą, aby stworzyć most bez zbrojenia ze stali miękkiej w pomoście.

W płycie pomostu o grubości 500 mm zastosowano kable sprężające zamknięte w plastikowych przewodach i wodoszczelnych urządzeniach kotwiących. Można było wykazać [1], że stany graniczne użytkowania i obciążenia, zgodnie z Eurokodem [2], spełniłyby nowe podejście projektowe.

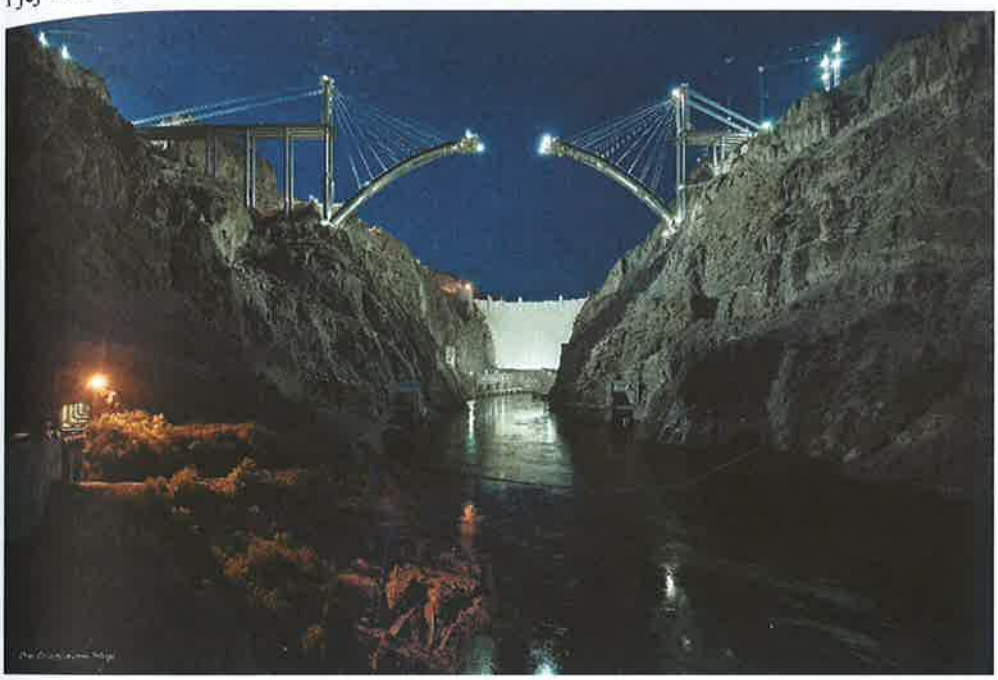
Most Egg-Graben (rys. 2) wygrał w 2014 roku konkurs *fib* dla wybitnych konstrukcji betonowych ("*fib* Awards for Outstanding Concrete Structures"). Uzasadnienie jury [3] brzmiało: „Jury wysoce docenia konsekwentne zastosowanie filozofii wytrzymałości. Pomost mostu powinien charakteryzować się długim okresem użytkowania przy jednoczesnych niewielkich kosztach obsługi technicznej, ponieważ pomost jest wybudowany z zastosowaniem wyłącznie zbrojenia z zamkniętych kabli sprężających oraz wodoszczelnych urządzeń do kotwienia kabli. Nie użyto żadnego innego rodzaju zbrojenia. Z tego powodu wykluczona jest korozja elektrolityczna. W ten sposób oszczędzono także izolację wodną i nawierzchnię. Beton sam w sobie ma za zadanie oprzeć się obciążeniom fizycznym i środowiskowym. Most spełnia także wysokie oczekiwania estetyczne".

[1] Prof. Dr.-Ing., Instytut Inżynierii Konstrukcyjnej Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu
[2] Dipl.-Ing., Instytut Inżynierii Konstrukcyjnej Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu
[3] Dipl.-Ing., Smart Minerals GmbH

Rysunek 1. Rusztowanie montażowe łuku mostu Egg-Graben.

Rysunek 2. Most Egg-Graben (*fot. Pez Hejduk, Austria*).

Inną metodą konstrukcyjną często wykorzystywaną przy budowie betonowych łuków jest metoda wspornikowa. Ze względu na ciężar własny betonu momenty zginające są zredukowane podczas budowy dzięki zastosowaniu want. Siły w wantach mogą być regulowane na różnych etapach budowy, aby utrzymać małe momenty zginające we wsporniku. Spektakularnym przykładem zastosowania metody wspornikowej do konstrukcji łuku jest Hoover Dam Bypass (most przy Zaporze Hoovera) (rys. 3). Słowa jury konkursu *fib* dla wybitnych konstrukcji betonowych (*fib* Awards for Outstanding Concrete Structures) w 2014 na temat tego mostu: „W rezultacie znakomitych prac inżynieryjnych most przy Zatoce Hoovera łączy brzegi rzeki Colorado na wysokości 275 m nad poziomem wody. Jest to zapierający dech w piersiach przykład konstrukcji w głębokim kanionie rzeki Colorado i jej skalistych klifów".



Rysunek 3. Most przy Zaporze Hoovera (*fot. Jamey Stillings Photography, USA*).

Inna metoda budowy łuków betonowych polega na pionowym wznoszeniu połówek łuku z użyciem deskowania wspinającego. U podstawy każdej z pionowych połówek łuku jest umieszczony przegub, który umożliwia obrót połowy łuku z początkowej pozycji pionowej do końcowej pozycji pochylonej. W przeciwieństwie do metody wspornikowej, gdzie zazwyczaj umieszczanych jest podczas budowy kilka want na każdej połówce łuku, przy użyciu metody obracania połówek łuku można zamocować tylko jedną parę want w jednym miejscu połówki łuku, aby można było pracować ze statycznie wyznaczalną konstrukcją podczas operacji delikatnego opuszczania. Dlatego, w odróżnieniu od metody wspornikowej, pojawiają się tu wielkie momenty zginające w łuku podczas obniżania połówek łuku.

Obniżanie (obracanie) połówek łuku zastosował po raz pierwszy Riccardo Morandi podczas budowy mostu Lussia we Włoszech, w 1955 roku, co zostało opisane przez Troyano [4]. Zaletą tej metody jest przyspieszona budowa łuku, która może zostać wykonana szybciej w pozycji pionowej za pomocą deskowania wspinającego, niż w pozycji pochylonej za

pomocą deskowania przy budowie wspornikowej. Obecnie metoda opuszczania łuków jest regularnie stosowania przy budowie mostów w Japonii [5] i Hiszpanii [6]. Rys. 4 pokazuje proces obniżania połowy łuku podczas budowy mostu Arnoia w 2012 roku. Każda z obu połówek miała długość ok. 70 m i ważyła 11000 kN. Wymagana była siła rozciągająca 1100 kN, aby w procesie obniżania przesunąć połowę łuku z pozycji pionowej do początkowej pozycji pochylonej. Podczas obniżania połowy łuku wydłużenie kabli wyniosło 33 m, a maksymalna siła w każdym z dwóch kabli sprężających wyniosła 2400 kN.

Rysunek 4. Most Arnoia w Hiszpanii zabudowany przy użyciu metody opuszczania łuków (*fot. VSL Heavy Lifting, Szwajcaria*).

Porównanie metod konstrukcyjnych dla łuków i dźwigarów mostów ujęte w Tab. 1 pokazuje, że istnieją odpowiedniki między budową na rusztowaniach montażowych, a metodą wspornikową. Jednak nigdy wcześniej nie zaproponowano metody budowy pionowej mostu. Pomysł metody wznoszenia balansowego zrodził się, kiedy poszukiwano metody konstrukcyjnej, w której rozpoczyna się pionową budową dźwigarów mostu, korespondującą z metodą opuszczania połówek mostu. Metoda wznoszenia balansowego jest nową metodą budowy, potwierdzoną patentami zarejestrowanymi w Niemczech (DE 102006039551), USA (US 7996944), Rosji (RU 2436890), Kanadzie (CA 2661311), Chinach (CN 101535571) i Australii (AU 2007288151). Złożono także wnioski patentowe w Indiach, Japonii oraz Europie.

Tablica 1. Porównanie metod konstrukcyjnych dla łuków i belkowych dźwigarów mostu.

Łuki	**Belkowe dźwigary**
Budowa z użyciem rusztowania montażowego	Budowa z użyciem rusztowania montażowego
Metoda wspornikowa	Metoda wspornikowa
Opuszczanie połówek łuku	Metoda wznoszenia balansowego

nie metoda opuszczania łuków jest
5] i Hiszpanii [6]. Rys. 4 pokazuje
Arnoia w 2012 roku. Każda z obu
Wymagana była siła rozciągająca
wę łuku z pozycji pionowej do
wy łuku wydłużenie kabli wyniosło
ących wyniosła 2400 kN.

puszczania łuków (*fot. VSL Heavy Lifting,*

wigarów mostów ujęte w Tab. 1
a rusztowaniach montażowych,
aproponowano metody budowy
o zrodził się, kiedy poszukiwano
wą budową dźwigarów mostu,
oda wznoszenia balansowego jest
strowanymi w Niemczech (DE
890), Kanadzie (CA 2661311),
Złożono także wnioski patentowe

igarów mostu.

vigary
yciem rusztowania montażowego
rnikowa
szenia balansowego

2. Most na rzeką Salzach w Golling

Głównymi zaletami metody wznoszenia balansowego jest umożliwienie przyspieszonej budowy przy użyciu elementów prefabrykowanych oraz zmniejszenie rozpiętości mostu poprzez zastosowanie zastrzałów. Szybkim sposobem opisania tej metody budowy mostu jest porównanie jej do procesu otwierania parasola, gdzie dźwigary mostu to żebra parasola, a zastrzały to rozpory. Metoda ta została opracowana głównie dla mostów znajdujących się nad głębokimi dolinami, tzn. mostów z wysokimi podporami, ale przy drobnych zmianach może być zastosowana także dla mostów z niskimi podporami, co będzie pokazane w części 3 artykułu. W 2013 roku, wykorzystując metodę wznoszenia balansowego zaprojektowano most nad rzeką Salzach w Golling. Właściciel szukał innowacyjnego projektu mostu, jako że dotychczasowa konstrukcja zespolona miała być rozebrana w niedalekiej przyszłości.

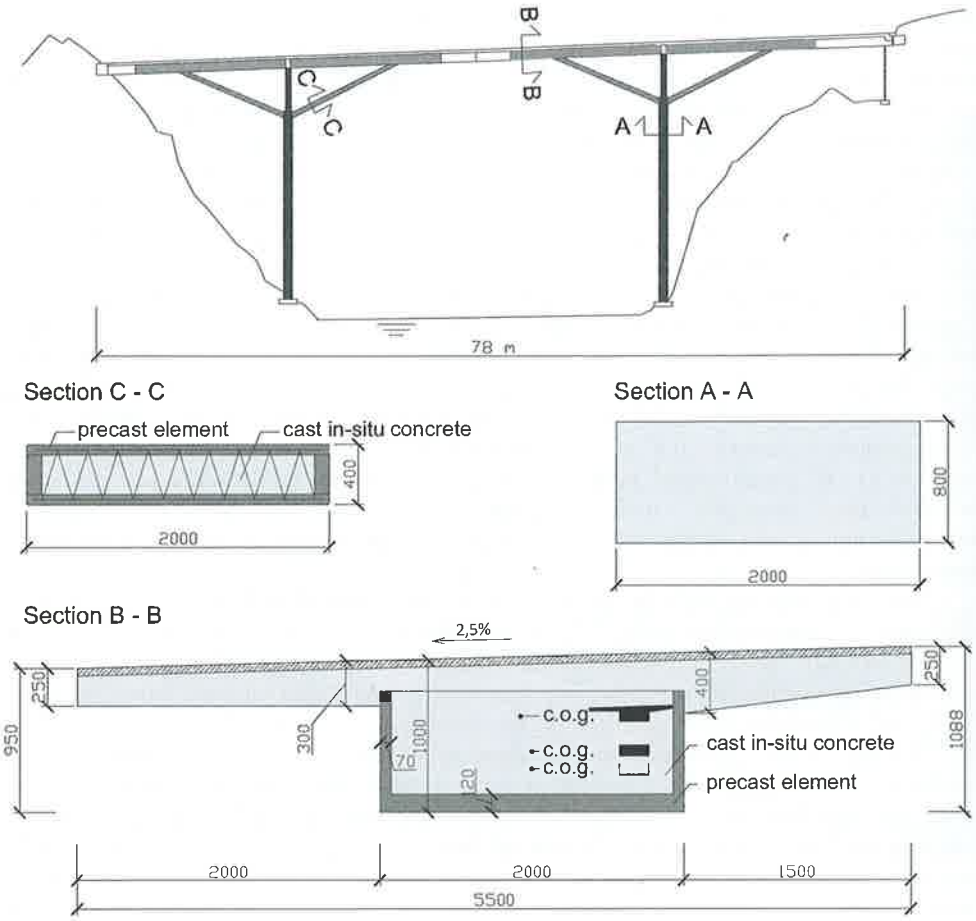
Przekrój podłużny mostu o długości całkowitej 78 m oraz przęśle środkowym o długości 33 m pokazano na rys. 5. Aby połączyć brzegi rzeki Salzach, zaprojektowany most składa się z dwóch konstrukcji wznoszonych balansowo, które są zaznaczone ciemnoszarym kolorem na rys. 5. Dwie podpory o wysokości ok. 20 m i 22 m są umieszczone na brzegach rzeki w pobliżu fundamentów starego mostu. Zaplanowano budowę podpór o przekroju 0,8 m na 2,0 m przy użyciu rusztowania wspinającego (rys. 5 Sekcja A-A). W górnej części podpory szerokość przekroju zmniejszona jest do 0,5 m. Zastrzały oraz dźwigary mostu zaprojektowano jako cienkościenne elementy prefabrykowane w celu utrzymania niskiej wagi elementów podczas operacji montowania i podnoszenia.

Zastrzały składają się z podwójnych ścian często używanych do wznoszenia ścian w budynkach. Elementy składające się z podwójnych ścian mają długość ok. 13,2 m, a grubość ścianki wynosi zaledwie 70 mm. Ściany boczne o grubości 100 mm zostały zrobione w wytwórni prefabrykatów, aby otrzymać przekrój skrzynkowy, który może być wypełniony betonem in-situ w późniejszym etapie budowy (rys. 5 Sekcja C-C).

Ściany boczne dźwigara mostu składają się z elementów prefabrykowanych o grubości 70 mm. Są one bardzo popularne przy wytwarzaniu betonowych płyt, ponieważ można zaoszczędzić koszty związane z szalunkiem. Przy produkcji dźwigarów mostu umieszcza się elementy o grubości 70 mm, wysokości 800 mm oraz długości 12 m w polu układania betonu i ustawia w pozycji pionowej. Kiedy wyleje się płytę dolną o grubości 120 mm pomiędzy elementami ścian, otrzymuje się lekki dźwigar mostu o przekroju w kształcie U, co pokazano w sekcji B-B na rys. 5. W tym samym miejscu pokazano, że środek grawitacji w przekroju poprzecznym zmienia się od pozycji niskiej w przypadku prefabrykowanych elementów w kształcie U do środka w przypadku elementów prostokątnych, co ma miejsce kiedy prefabrykowany dźwigar mostu jest wypełniany betonem. Środek grawitacji dźwigara mostu zmienia się ponownie, kiedy dodaje się płytę pomostu.

Kolejność budowania elementów prefabrykowanych pokazano na rys. 6. W kroku pierwszym za pomocą żurawia wieżowego podniesiono zastrzały o wadze ok. 100 kN każdy, przymocowane śrubami do stalowej ramy. Następną fazą budowy było podniesienie stalowej ramy oraz dwóch zastrzałów na kilka metrów przy pomocy podnośników linowych (zaznaczonych na czerwono na rys. 6). W trzecim etapie podniesiono dźwigary o przekroju poprzecznym w kształcie U, ważące ok. 120 kN każdy, i połączono je w górnych skrajnych punktach zastrzałów. Liny przyczepione były w górnych krańcach dźwigarów, połączone do urządzeń napinających (zaznaczonych na czerwono na rys. 6) umieszczonych na końcu podpory pomocniczej. Dwa dźwigary mostu są połączone kablem sprężającym składającym

się z 4 cięgien jednosplotowych (pokazanych na żółto w fazie konstrukcyjnej nr 3 na rys. 6). Kabel przenosi siłę rozciągającą, która pojawia się podczas obracania dźwigarów mostu. Podnoszenie dolnych punktów zastrzałów prowadzi do obracania dźwigarów w fazach 4 i 5.

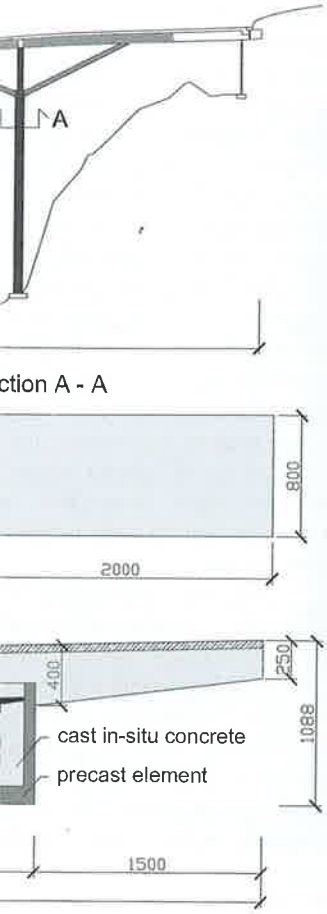


Rysunek 5. Przekrój podłużny i poprzeczny mostu Salzach w Golling, Austria.

Trzeba było zamocować małe podpory pomocnicze o wysokości 4 m na górze betonowych podpór, aby zapobiec kontaktowi krańców dźwigarów ze skalnymi klifami kanionu rzeki Salzach podczas procesu podnoszenia. Kiedy punkty podstawy zastrzałów osiągnęły pożądaną wysokość (faza budowy nr 6 na rys. 6), punkty końcowe dźwigarów zostały opuszczone o 3 m w 7 fazie budowy, aby osiągnąć pozycję końcową.

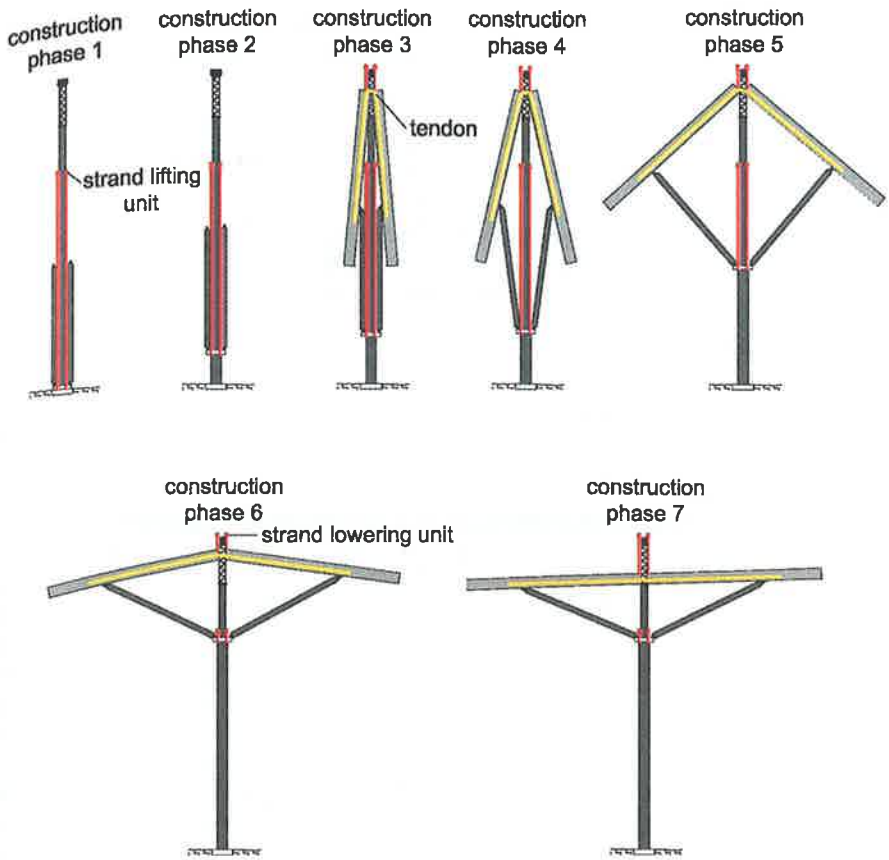
Po dostosowaniu pozycji elementów tworzących konstrukcję mostu (faza konstrukcji nr 7 na rys. 6), co może być wykonane przy pomocy linowych urządzeń podnoszących lub obniżających oraz przez naprężanie członu konstrukcji pracującego na rozciąganie, który łączy dźwigary mostu, beton in-situ układany jest w złączach i zastrzałach. Fazy konstrukcyjne od 1 do 7 pokazane na rys. 6 muszą być następnie przeprowadzone na drugiej podporze. W kolejnym kroku instaluje się brakujące części dźwigara, który także składa się z prefabrykowanych elementów w kształcie U, kable sprężające są naprężane, a dźwigar mostu jest wypełniany warstwami betonu.

zie konstrukcyjnej nr 3 na rys. 6).
zas obracania dźwigarów mostu.
acania dźwigarów w fazach 4 i 5.



ria.

ze o wysokości 4 m na górze
dźwigarów ze skalnymi klifami
dy punkty podstawy zastrzałów
6), punkty końcowe dźwigarów
ozycję końcową.
strukcję mostu (faza konstrukcji
ych urządzeń podnoszących lub
acującego na rozciąganie, który
złączach i zastrzałach. Fazy
epnie przeprowadzone na drugiej
dźwigara, który także składa się
żające są naprężane, a dźwigar



Rysunek 6. Fazy budowy mostu Salzach.

W końcu do konstrukcji dodawana jest płyta pomostu. Podobnie jak w projekcie płyty pomostu w moście Egg-Graben [1], podłużne kable sprężające są zaprojektowane z plastikowymi przewodami i urządzeniami kotwiącymi.

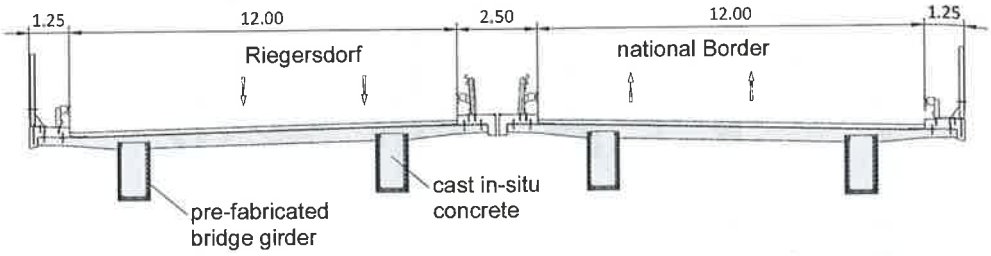
Ponieważ płyta pomostu ma szerokość zaledwie 5,5 m, nie montuje się sprężania poprzecznego. Dlatego jako zbrojenie płyty pomostu stosuje się poprzecznie stal nierdzewną. 70 mm warstwa betonu o właściwościach wymaganych dla powierzchni drogowej jest układana „fresh in fresh", po wylaniu płyty pomostu.

Mimo, że budowa mostu rozpoczyna się od dość wrażliwych elementów, ostatecznie otrzymuje się monolityczny, betonowy most o jednolitym przekroju. Projekt mostu plasuje się w dolnym zakresie rozpiętości, dla których zastosowanie metody wznoszenia balansowego są zasadne. Gmainer [7] sugeruje, że zasięg rozpiętości powinien wynosić od 50 m do 250 m, jeśli chodzi o zastosowanie metody wznoszenia balansowego.

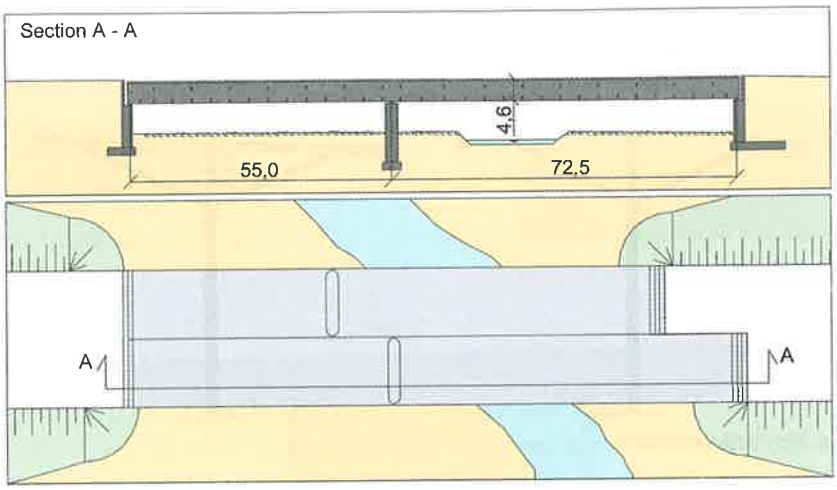
3. Most nad rzeką Lafnitz

W tej części artykułu opisane będzie projektowanie mostów o niskich podporach według metody wznoszenia balansowego na przykładzie mostu przez rzekę Lafnitz w południowo-wschodniej Austrii. Rzekę Lafnitz i Lahnbach przekracza się jadąc nową autostradą S7, „Fürstenfelder Schnellstraße", pomiędzy Riegersdorfem a granicą austriacko-węgierską. Długość mostów Lafnitz i Lahnbach wynosi odpowiednio ok. 120 m i 100 m.

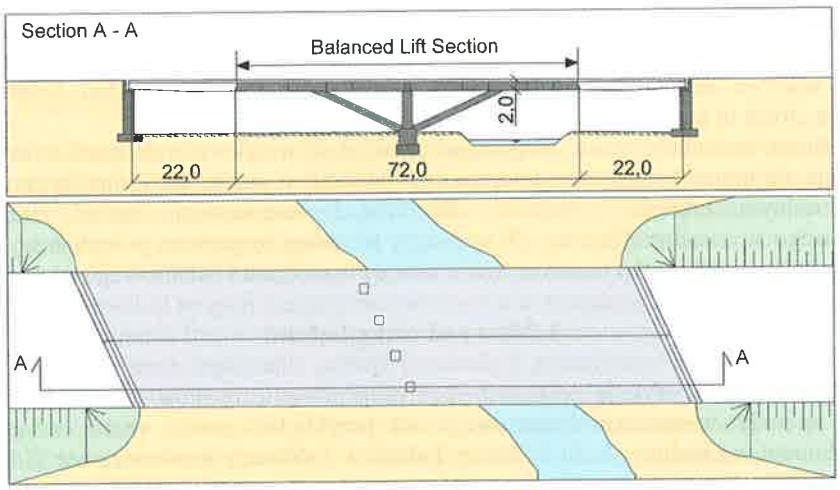
Przekrój poprzeczny autostrady S7 (rys. 7) na tym odcinku jest wyznaczony dla dwóch osobnych pasów, dlatego mosty powinny być budowane osobno, każdy o szerokości 14,5 m.



Rysunek 7. Przekroje poprzeczne mostów.

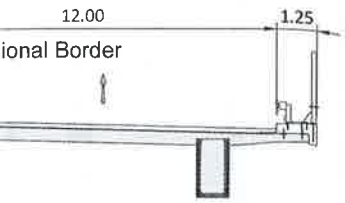


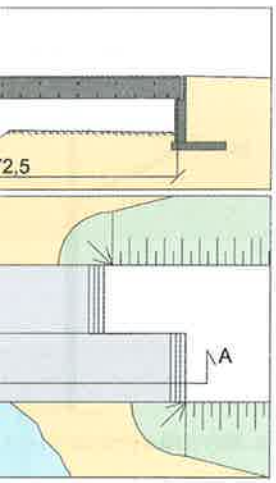
Rysunek 8. Projekt oryginalny: stalowo-betonowy most zespolony nad rzeką Lafnitz.



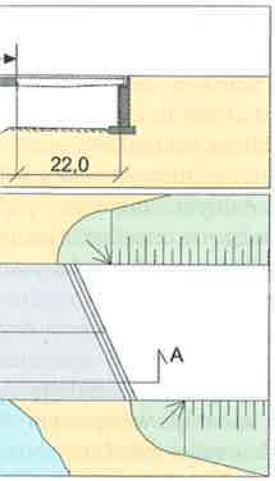
Rysunek 9. Projekt oparty na metodzie wznoszenia balansowego dla mostu kablobetonowego nad rzeką Lafnitz.

ku jest wyznaczony dla dwóch
bno, każdy o szerokości 14,5 m.





ką Lafnitz.

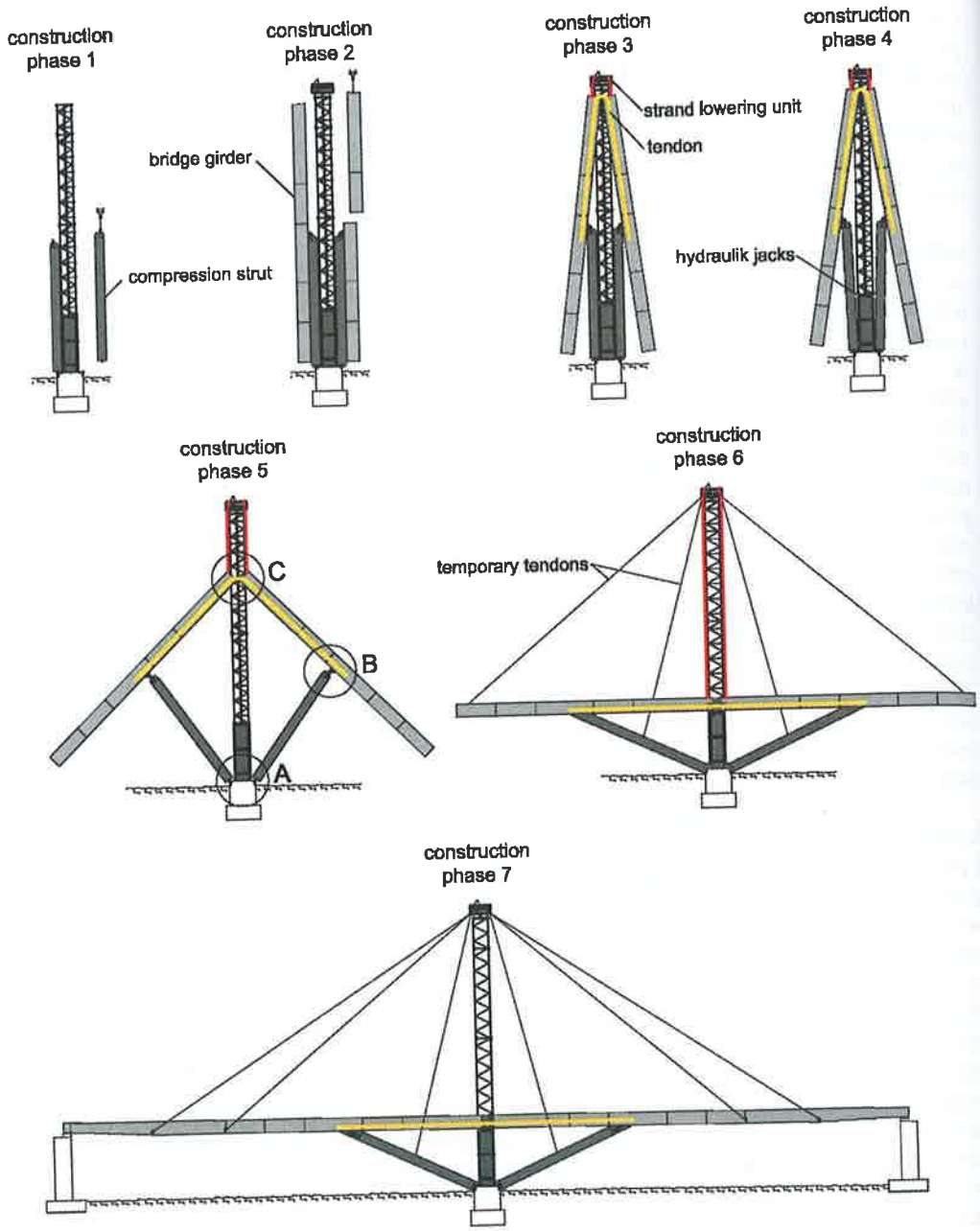


kablobetonowego nad rzeką Lafnitz.

Miejsca budowy obydwu mostów w ramach autostrady S7 są wrażliwe ekologicznie i są częścią obszaru „Natura 2000". Zasadniczo mosty są potrzebne, aby umożliwić przeprawę przez rzekę i stworzyć możliwości przejścia zwierzyny. Firma ASFINAG zarządzająca autostradą nie akceptuje budowy z użyciem rusztowania montażowego, aby uniknąć wtargnięcia w naturalne środowisko. Plac budowy powinien być tak mały, jak to możliwe i powinien skupiać się przy podporze środkowej oraz przyczółkach. Spełnienie wszystkich tych warunków jest możliwe wyłącznie dzięki metodzie wspornikowej, metodzie nasuwania podłużnego lub metodzie wznoszenia balansowego.

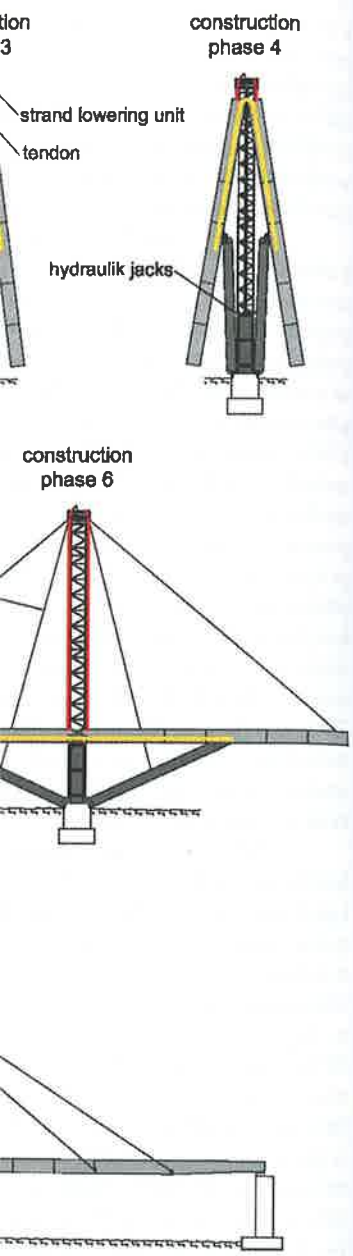
Zanim przedstawiono projekt alternatywny, oparty na metodzie wznoszenia balansowego, planowano wybudować mosty metodą podłużnego nasuwania dźwigarów mostu (rys. 8). Aby wytrzymać momenty zginające podczas procesu nasuwania, przekrój poprzeczny był bardzo wysoki w porównaniu do wysokości przekroju poprzecznego osiągniętej przy metodzie wznoszenia balansowego. Duża różnica w wysokościach, 4,6 m w stosunku do 2,0 m, wynika z zastrzałów, które bardzo redukują rozpiętość (rys. 9). Projekt alternatywny dla mostu kablobetonowego opierał się na przekroju poprzecznym z blachownicą, rys. 7. Zaproponowano budowę odcinka środkowego środników za pomocą metody wznoszenia balansowego (rys. 9), montaż odcinków końcowych środników ruchomymi dźwigami umieszczonymi za przyczółkami oraz budowę płyty pomostu przy pomocy wózka szalunkowego podobnie, jak w projekcie oryginalnym. W trakcie przygotowywania projektu alternatywnego przyczółki i położenie podpór środkowych obrócono w planie o 30° względem podłużnej osi mostu, aby zareagować na położenie koryta rzeki oraz aby uzyskać lepszy prześwit przejścia dla zwierząt. Zmiany te doprowadziły do projektu mostu o dwóch równych przęsłach. Wykazano, że koszty budowy mostów kablobetonowych wykonywanych metodą wznoszenia balansowego wyniosły tylko 70% kosztów wyliczonych dla mostów zespolonych. Kiedy firma ASFINAG zarządzająca autostradą została przekonana o korzyściach finansowych wynikających z zastosowania metody wznoszenia balansowego, został zlecony projekt szczegółowy dwóch mostów nad rzekami Lafnitz i Lahnbach.

Pierwsze etapy budowy mostów w ramach autostrady S7 nie różnią się od konwencjonalnych metod budowy mostów. Należy zbudować fundamenty, przyczółki i podpory. Jeśli buduje się most o niskich podporach, potrzebna jest podpora pomocnicza, połączona z podporą betonową. Podpora pomocnicza składa się z dwóch części dźwigu wieżowego umieszczonego po obu stronach podpory, połączonych u góry platformą. W celu obniżenia wagi zastrzały wykonane są z pustych, zbrojonych elementów prefabrykowanych o małej grubości i są montowane tak, by przylegały do podpory (rys. 10, faza 1). W przypadku metody wznoszenia balansowego waga dźwigarów mostu ma wielkie znaczenie przy operacjach podnoszenia (mosty z wysokimi podporami) lub opuszczania (mostu z niskimi podporami). Z tego powodu nie tylko zastrzały, ale także dźwigary wykonane są z ultralekkich elementów prefabrykowanych. W celu umożliwienia budowy mostów o różnych wielkościach i długościach przęseł, opracowano wiele rodzajów dźwigarów o różnych przekrojach poprzecznych. Dźwigary o wybranym przekroju poprzecznym są następnie montowane, tak by przylegały do podpory i zastrzałów (rys. 10, faza 2). Dźwigary zaprojektowano jako cienkościenne elementy prefabrykowane w kształcie U. Grubość ścianki wynosiła 70 mm, a grubość dolnej płyty wynosiła 120 mm – wymiary te są identyczne z wymiarami dla części prefabrykowanych mostu Salzach. Dźwigary o długości całkowitej 35,5 m musiały być podzielone na dwie części, odpowiednio po 19 m i 16,5 m, z powodu ograniczonej przestrzeni dostępnej na miejscu budowy. Obie części są łączone za pomocą 20 mm złącza z wysokiej wytrzymałości zaprawy oraz 4 monosplotów, które zapewniają naprężenie w złączu w kolejnych fazach budowy.



Rysunek 10. Fazy konstrukcyjne mostu Lafnitz.

W celu rozpoczęcia operacji podnoszenia lub opuszczania, dwa dźwigary mostu muszą być połączone. Wykonuje się to przez pochylanie dźwigarów i instalację kabla składającego się z 16 monosplotów (rys. 10, faza 3). Kabel, zaznaczony na żółto na rys. 10,



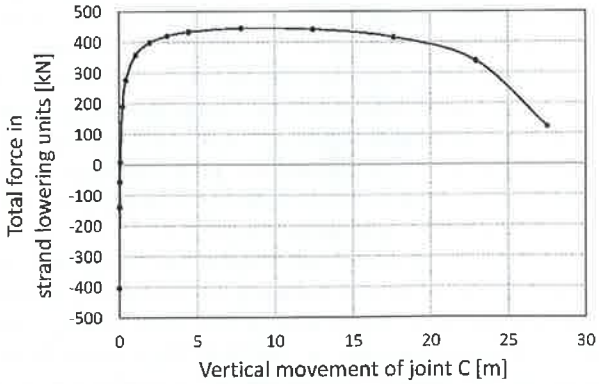
szczania, dwa dźwigary mostu
e dźwigarów i instalację kabla
zaznaczony na żółto na rys. 10,

ma zapewnić równowagę podczas procesu opuszczania przez przenoszenie sił rozciągających. Proces opuszczania rozpoczyna się po lekkim naprężeniu monosplotów.

Podobnie, jak w metodzie obniżania połówek łuku, która wymaga przemieszczenia połówek łuku z początkowej pionowej pozycji do stabilnej pozycji startowej procesu opuszczania, dźwigary mostu także muszą być przesunięte do bezpiecznej pozycji startowej. Obrócenie dźwigarów mostu z pozycji pionowej do pozycji pochylonej, pokazane w fazie 3 na rys. 10, jest łatwo osiągalne poprzez stosowanie niewielkich sił poziomych do górnych końców dźwigarów. Jednak mała zmiana w kształcie mechanizmu składającego się z dźwigarów mostu, kabla łączącego i zastrzałów w przejściu z fazy 3 do fazy 4 musi być przeprowadzona symetrycznie, w sposób kontrolowany, albo przez ciągnięcie dolnych końców dźwigarów lub przez rozpychanie zastrzałów. Wybrano tę drugą opcję, aby ograniczyć prace tylko do okolicy środkowej podpory. Do górnej części podpory zamontowano dwa podnośniki hydrauliczne. Siła pozioma o wartości 20 kN i skok 275 mm dla każdego podnośnika są wystarczające do przejścia z fazy 3 do fazy 4 budowy, jak pokazano na rys. 10.

W fazie 5 przeprowadza się proces obniżania, rys. 10. Stosunek między siłą całkowitą w urządzeniach linowych opuszczających, a ruchem pionowym górnego punktu dźwigara mostu, oznaczonego jako punkt C, pokazano na rys. 11.

Podczas procesu opuszczania cały mechanizm jest układem statycznie wyznaczalnym, jak w przypadku metody obniżania połówek łuku. Zaletą metody wznoszenia balansowego jest to, że wszystkie siły są w równowadze w układzie konstrukcyjnym składającym się z dźwigarów, kabla łączącego i zastrzałów, dlatego żadne siły nie muszą być przenoszone przez wanty zakotwione w gruncie. Po bliższym przyjrzeniu się (rys. 11) można dostrzec, że stosunek siły i przesunięcia pionowego jest zdecydowanie nieliniowy, zaczynając się nawet wartością ujemną 400 kN. Siła ujemna oznacza, że na początku procesu obniżania trzeba było zastosować siłę pionową, pchająca w dół od wierzchołka podpory pomocniczej. Już po niewielkim przesunięciu o zaledwie 70 mm siła ta zmienia się w siłę rozciągającą. Oczywiście pchanie w dół przy złączu C, aby rozpocząć proces obniżania, jest opcją niepraktyczną i wręcz niebezpieczną. Dlatego przygotowano projekt z dwoma podnośnikami poziomymi, zlokalizowanymi na wierzchu podpory, oraz opracowano projekt technologii dla interakcji między podnośnikami poziomymi a urządzeniami linowymi opuszczającymi. Kiedy osiąga się maksymalny skok podnośnika poziomego równy 500 mm, siła rozciągająca w urządzeniach linowych opuszczających wynosi 80 kN.



Rysunek 11. Relacja między siłą całkowitą w urządzeniu linowym opuszczającym a ruchem pionowym złącza C.

Dźwigary mostu są następnie powoli obracane do pozycji poziomej (rys. 10, faza 5). Maksymalna siła całkowita w urządzeniach linowych opuszczających podczas tej operacji wynosi 650 kN i spada do 150 kN w pozycji końcowej. Zastrzały są istotne w procesie obracania. Kiedy most znajdzie się w swojej pozycji końcowej, znaczenie zastrzałów nie zmniejsza się, ponieważ stają się one integralną częścią ukończonego mostu. Dzięki zastrzałom długości przęseł są zredukowane, co umożliwia budowę mostu szczuplejszego w porównaniu z mostem bez zastrzałów. Rysunki projektowe złączy A, B i C w pozycji początkowej oraz w poziomej pozycji końcowej pokazano na rys. 12. Obrót przy złączach A i B o odpowiednio ok. 75° i 165° wymaga ostrożnego wyszczególnienia stalowych płyt i połączenia z betonem, biorąc pod uwagę wszystkie mimośrody pojawiające się podczas zmiany geometrii, kiedy dźwigary mostu są obracane od początkowej pozycji pionowej do końcowej pozycji poziomej. Obrót dźwigarów o ok. 90° przy złączu C jest możliwy dzięki kołnierzowi prowadzącemu kable łączące, rys. 12.

Po zakończeniu części związanej ze wznoszeniem balansowym, geometria dźwigara mostu jest korygowana poprzez luzowanie lub napinanie kabla łączącego. Geometria układu jest utrzymana poprzez wypełnienie węzłów A i C betonem in-situ. Po zainstalowaniu kabli tymczasowych (rys. 10, faza 6) zastrzały i dźwigary mostu przy węzłach B są wypełniane betonem in-situ. Faza budowy numer 7, pokazana na rys. 10, polega na instalacji prefabrykowanych elementów dźwigara łączących część wznoszoną balansowo z przyczółkami. Po wyregulowaniu sił w kablach tymczasowych prefabrykowane elementy w kształcie U, tworzące dźwigar mostu, są wypełniane warstwami betonu in-situ. Po stężeniu betonu kable tymczasowe są zwalniane, a fazy budowy od 1 do 7 są powtarzane podczas budowy drugiego środnika mostu. Montaż pomostu za pomocą wózka szalunkowego wieńczy budowę mostu (rys. 7 i rys. 9).

4. Test wielkoskalowy metody wznoszenia balansowego

W trakcie projektu badawczego dotyczącego zastosowania cienkościennych elementów prefabrykowanych w budowie mostów było możliwe przeprowadzenie wielkoskalowego testu metody wznoszenia balansowego dla mostów opisanych we wcześniejszej części artykułu. Projekt wszystkich elementów (podpory, dźwigarów mostu, zastrzałów) oparty był na 70% skali projektów mostów w ramach autostrady S7, dlatego badana konstrukcja miała długość całkowitą 50,4 m.

Tak jak w oryginalnym projekcie konstrukcji, części mostu były wykonane z ultracienkich elementów prefabrykowanych, aby utrzymać minimalną wagę części, które miały być obracane podczas operacji wznoszenia balansowego. Jak wyjaśniono wcześniej, ściany dźwigarów o długości 25 m składają się z betonowych elementów o grubości 70 mm, które normalnie są używane jako elementy płytowe w budynkach. Rozmiary zewnętrzne przekroju poprzecznego dźwigarów mostu dokładnie odpowiadają przekrojom mostów na autostradzie S7 zredukowanym o 70%. Wysokość dźwigaru wynosiła 1,26 m, a szerokości wahała się od 0,7 m do 1,4 m i była największa przy punktach łączenia z zastrzałami (rys. 14). Jednak grubość elementów – ściany boczne 70 mm i płyta dolna 120 mm – jest taka sama, jak w przypadku mostów na autostradzie S7.

Ponieważ dźwigar cienkościenny, składający się wyłącznie betonu zbrojonego w kształcie U, o wadze 208 kN, byłby zbyt delikatny do transportu, montażu i jakichkolwiek operacji podnoszenia, przekrój poprzeczny musiał być wzmocniony. Kratownica zrobiona z prętów zbrojeniowych (poprzeczne pręty o średnicy 20 mm oraz krzyżulców o średnicy 12 mm) była zespawana do prętów zbrojeniowych wystających z prefabrykowanych elementów ściany bocznej u góry przekroju. Za pomocą kratownicy przekrój w kształcie U

ozycji poziomej (rys. 10, faza 5).
szczających podczas tej operacji
Zastrzały są istotne w procesie
ıcowej, znaczenie zastrzałów nie
cią ukończonego mostu. Dzięki
ia budowę mostu szczuplejszego
owe złączy A, B i C w pozycji
na rys. 12. Obrót przy złączach A
wyszczególnienia stalowych płyt
nośrody pojawiające się podczas
początkowej pozycji pionowej do
rzy złączu C jest możliwy dzięki

balansowym, geometria dźwigara
ıbla łączącego. Geometria układu
ı in-situ. Po zainstalowaniu kabli
u przy węzłach B są wypełniane
rys. 10, polega na instalacji
część wznoszoną balansowo
owych prefabrykowane elementy
twami betonu in-situ. Po stężeniu
d 1 do 7 są powtarzane podczas
pomocą wózka szalunkowego

ia balansowego

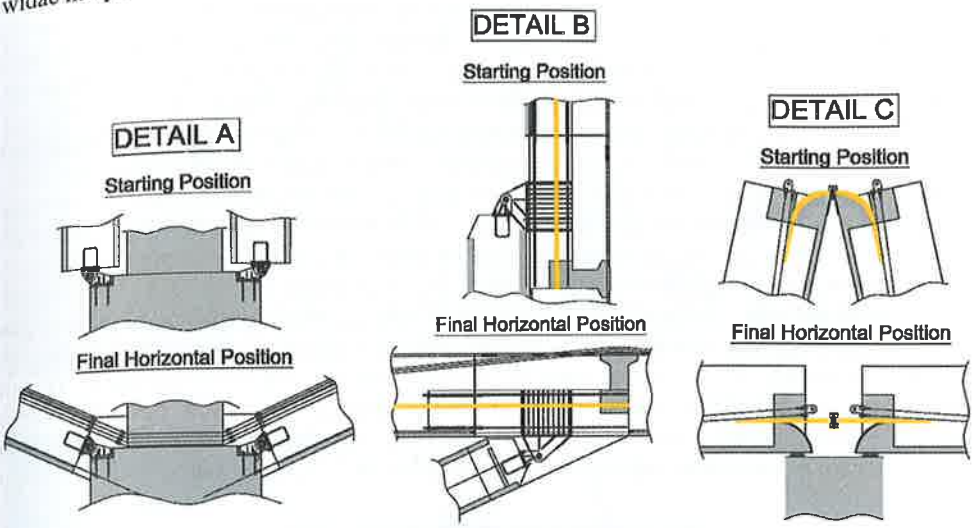
zastosowania cienkościennych
yło możliwe przeprowadzenie
go dla mostów opisanych we
ów (podpory, dźwigarów mostu,
ramach autostrady S7, dlatego

części mostu były wykonane
ć minimalną wagę części, które
vego. Jak wyjaśniono wcześniej,
ch elementów o grubości 70 mm,
ıdynkach. Rozmiary zewnętrzne
wiadają przekrojom mostów na
u wynosiła 1,26 m, a szerokości
punktach łączenia z zastrzałami
nm i płyta dolna 120 mm – jest

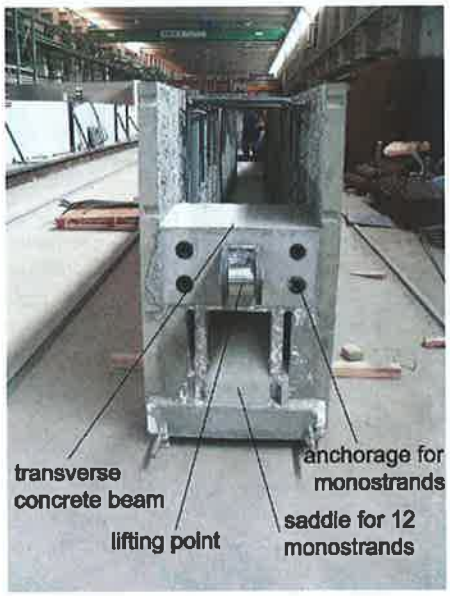
wyłącznie betonu zbrojonego
ısportu, montażu i jakichkolwiek
mocniony. Kratownica zrobiona
nm oraz krzyżulców o średnicy
stających z prefabrykowanych
atownicy przekrój w kształcie U

został przekształcony w przekrój skrzynkowy, który okazał się wystarczająco stabilny dla dalszych operacji montażu i podnoszenia. Dźwigary mostu zostały wyposażone w betonowe belki poprzeczne, aby umożliwić przyszłe sprężanie i instalację monosplotów.

Betonowa belka poprzeczna i kołnierz dla kabla przy złączu C są pokazane na fotografii końcowego odcinka dźwigara mostu (rys. 13), odpowiadając detalowi C („Detail C") na rys. 12. Betonowa belka poprzeczna przenosiła siłę czterech monosplotów. Dwa z tych monosplotów zostały naprężone zanim dźwigar mostu został przetransportowany na miejsce budowy. Dwa pozostałe monosploty zostały naprężone po zamontowaniu dźwigara w pozycji pionowej. Punkt podnoszenia jest także zakotwiony w belce poprzecznej, jak widać na rys. 13.



Rysunek 12. Złącza A, B i C przed i po procesie opuszczania.



Rysunek 13. Widok odcinka końcowego dźwigara mostu.

Przekrój w kształcie U byłby niepraktyczny dla zastrzałów podczas późniejszego wypełniania betonem, dlatego 13 m zastrzały zostały prefabrykowane jako puste elementy z betonu zbrojonego o szerokości 1,4 m, wysokości 0,875 m i wadze 15 ton każdy. Grubość ścian bocznych była taka sama, jak grubość płyty dolnej dźwigarów mostu. Górna i dolna płyta miały grubość 112 mm, by umiejscowić stożki kotwiące dla cięgien. Cięgna miały za zadanie przenieść część nacisku betonu podczas wypełniania pustych zastrzałów betonem in-situ.

Ponieważ mosty na autostradzie S7 są mostami z niskimi podporami i konstrukcja testowa opiera się na projekcie mostu na S7, potrzebna była podpora pomocnicza. Dlatego do płyty fundamentu przymocowano dwie sekcje dźwigu wieżowego, o długości 24 m i wadze 102 kN, które miały służyć jako podpory tymczasowe. Dwa stalowe profile o przekroju w kształcie C użyto, aby stworzyć pionowe tory prowadzące, między dwoma sekcjami dźwigu wieżowego. Górne części stalowych profili nie były ze sobą połączone, a odległość między pionowymi torami prowadzącymi wyniosła 800 mm.

Połączenia przegubowe na dole konstrukcji składały się ze stalowych płyt o grubości 30 mm na końcach zastrzałów oraz stalowych przewodów wypełnionych betonem, o średnicy zewnętrznej 150 mm, umieszczonych na fundamencie. Stalowe płyty musiały być bardzo dokładnie ustawiane na przewodach wypełnionych betonem, aby zapewnić odpowiednie połączenie przegubowe. Po umieszczeniu zastrzałów w poprawnej pozycji, tymczasowo przymocowano je do podpory i podpór pomocniczych.

Prefabrykowane dźwigary mogły następnie być przetransportowane ze stanowiska wytwórczego. Ruchomy dźwig ważący 100 ton podniósł jeden dźwigar mostu po drugim (rys. 14), aby zostały one przymocowane do górnych końców zastrzałów za pomocą 16 mm śrub. Mimo, że cylindryczne otwory w stalowych płytach łączących posiadały zapas zaledwie 1 mm, operacja została przeprowadzona bez problemów. Zbliżenie połączenia dźwigara mostu z zastrzałem, odpowiadającego detalowi B („Detail B") na rys. 12, pokazano na rys. 15.

Rysunek 14. Wielkoskalowa konstrukcja testowa podczas montażu.

rzałów podczas późniejszego
ykowane jako puste elementy
wadze 15 ton każdy. Grubość
igarów mostu. Górna i dolna
dla cięgien. Cięgna miały za
pustych zastrzałów betonem

kimi podporami i konstrukcja
podpora pomocnicza. Dlatego
wieżowego, o długości 24 m
asowe. Dwa stalowe profile
prowadzące, między dwoma
nie były ze sobą połączone,
800 mm.
ze stalowych płyt o grubości
ów wypełnionych betonem,
ie. Stalowe płyty musiały być
ch betonem, aby zapewnić
rzałów w poprawnej pozycji,
ych.
ransportowane ze stanowiska
en dźwigar mostu po drugim
zastrzałów za pomocą 16 mm
łączących posiadały zapas
lemów. Zbliżenie połączenia
etail B") na rys. 12, pokazano

Rysunek 15. Detal łączenia dźwigara mostu i zastrzału.

Rysunek. 16. Obniżanie górnych punktów dźwigarów mostu za pomocą dźwigów ruchomych.

Po zaledwie czterech dniach montażu most był gotowy na część związaną ze wznoszeniem balansowym. Aby rozpocząć proces obracania, dźwigary mostu musiały być pochylone, tak żeby ich górne końce się dotykały. Następnie na obu dźwigarach zainstalowano 12 monosplotów, które zakotwiono w punktach łączących z zastrzałami na każdym z dźwigarów. W górnej części dźwigarów stworzono podczas prefabrykacji okrągłe kołnierze o promieniu 544 mm (rys. 14). Po zainstalowaniu monosploty zostały lekko naprężone, aby zapobiec zwisaniu.

Proces opuszczania odbył się poprzez wolne i jednoczesne opuszczanie dwóch punktów górnych dźwigarów za pomocą dźwigów ruchomych (rys. 16). Maksymalna siła podnosząca obliczona na 270 kN odpowiadała sile podnoszącej zmierzonej przez dźwigi.

Po obróceniu mostu z pozycji pionowej do pozycji poziomej, geometria konstrukcji została sprawdzona i mogła być w prosty sposób regulowana przez naprężanie lub luzowanie zainstalowanych monosplotów. Okazało się to niepotrzebne, ponieważ geometria konstrukcji testowej znajdowała się w dopuszczalnym zakresie. Najpierw planowano wypełnienie zastrzałów i dźwigarów mostu betonem in-situ, co miałoby miejsce w przypadku budowy mostów na S7. Zadecydowano, by wypełnić tylko węzeł nad podporą, w celu zapewnienia większej wytrzymałości na poziome obciążenia wiatrem. Ultracienkie elementy prefabrykowane i połączenia węzła byłyby w ten sposób wciąż widoczne (rys. 17 i rys. 18).

Rysunek 17. Wielkoskalowy model części mostu Laftnitz poddawanej wznoszeniu balansowemu.

Rysunek 18. Dźwigar mostu z 70 mm elementami prefabrykowanymi.

gotowy na część związaną ze
nia, dźwigary mostu musiały być
Następnie na obu dźwigarach
ktach łączących z zastrzałami na
ono podczas prefabrykacji okrągłe
waniu monosploty zostały lekko

jednoczesne opuszczanie dwóch
mych (rys. 16). Maksymalna siła
ącej zmierzonej przez dźwigi.
poziomej, geometria konstrukcji
na przez naprężanie lub luzowanie
, ponieważ geometria konstrukcji
ajpierw planowano wypełnienie
y miejsce w przypadku budowy
nad podporą, w celu zapewnienia
iatrem. Ultracienkie elementy
ciąż widoczne (rys. 17 i rys. 18).

oszeniu balansowemu.

Dzięki wielkoskalowemu testowi można było pokazać, że metoda wznoszenia balansowego działa i że detale złączy mogą być wybudowane za pomocą prostych detali łączących ze stalowymi płytami i śrubami (złącze B) oraz kołnierza z kablami (złącze C). Promień kabli przy złączu C jest dużo mniejszy niż w przypadku zwykłego zastosowania cięgien sprężających. Redukcja siły najwyższej jako funkcji krzywizny kołnierza została wyznaczona eksperymentalnie [8]. Wykazano, że monosploty nie tracą nośności nawet przy małym promieniu 0,5 m.

W przyszłych projektach proces opuszczania nie powinien być przeprowadzany przy użyciu dźwigów ruchomych, ponieważ siła podnosząca zmienia się wraz z pionowym przesunięciem złącza C, jak pokazano na rys. 11. Ta zmiana siły prowadzi do ugięć podnośników teleskopowych dźwigów ruchomych, co musi być wyrównane przez operatorów dźwigów. Łatwiej by było przeprowadzić operacje podnoszenia lub opuszczania z użyciem podnoszących urządzeń linowych.

4. Wnioski

Dzięki użyciu metody wznoszenia balansowego rozpiętości dźwigarów mostu są zredukowane poprzez zastrzały, umożliwiając w ten sposób znaczące oszczędności pod względem materiałów konstrukcji. Zaproponowana metoda jest szczególnie korzystna w przypadku mostów z wysokimi podporami i przęsłami od 50 m do 250 m. Zastosowanie podpór tymczasowych pozwala na ekonomiczne wykorzystanie metody wznoszenia balansowego dla mostów o niewielkich podporach, jak na przykład w dwóch mostach na autostradzie S7.

Inną zaletą tej metody jest fakt, że operacje montażu są skoncentrowane przy podporze i że obracanie dźwigarów mostu może być przeprowadzone dużo szybciej niż przy poziomym nasuwaniu dźwigarów. Niewielka przestrzeń i duże tempo budowy mogą być korzystne w przypadku przeszkody, takiej jak linia kolejowa lub ruchliwa autostrada, przez którą most ma przebiegać, a przerwy w ruchu drogowym muszą być zredukowane do minimum.

Podziękowania

Niniejszym dziękuje się za wsparcie finansowe wielkoskalowych testów otrzymane od Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), ASFINAG, ÖBB Infrastruktur AG i Vereinigung Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke (VÖB) oraz dobrą współpracę z Schimetta Consult GmbH podczas szczegółowego projektowania mostów na autostradzie S7 oraz z Franz Oberndorfer GmbH & Co KG podczas budowy konstrukcji testowej w Gars am Kamp.

Literatura

[1] BERGER J., BRUSCHETINI-AMBRO Z., KOLLEGGER J., An innovative design concept for improving the durability of concrete bridges. Structural Concrete, 2011, 12, No. 3, 155–163

[2] EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete Structures. Design and detailing rules, 2005.

[3] Fédération international du béton (fib): 2014 fib Awards for Outstanding Concrete Structures, International Federation of Structural Concrete, Lausanne 2014.

[4] Troyano L. F., Bridge Engineering – A Global Perspective. Thomas Telford, Madrid, 2003.

[5] KASUGA A., Construction of Arch Bridges in Japan. Concrete Engineering for excellence and efficiency. Proceedings of the fib Symposium Prague 2011. Editor Sruma, V.

[6] RUCABADO R., MORENO A., CALVO M. Á., TÁBOAS P., Descending Manouever on Concrete Semi Arches, Deza High Speed Viaduct, Ave Galicia, Segment: Lalín (Anzo) – Silleda (Carboeiro), Spain. Proceedings of the 3rd fib International Congress – 2010, Washington, 2010.

[7] GMAINER S., Brückenklappverfahren – Unterschungen zur Entwicklung eines praxistauglichen Bauverfahrens. Dissertation, Vienna University of Technology, 2011.

[8] KOLLEGGER J., GMAINER S., LEHNER K., SIMADER J., Ultimate Strength of Curved Tendons, Structural Concrete, 2012, 13, No. 1, 42–50.

BUILDING BRIDGES USING THE BALANCED LIFT METHOD

Summary

This article explains the process of developing a new method called the balanced lift method, for the construction of bridges based on an alternative to bridge construction techniques that are used nowadays. The most common methods to build bridges are the ones using falsework or the cantilever method, but a rather uncommon method, the lowering of arches is seen as the origin of the balanced lift method. The idea was to create a method which would allow a bridge to be built in a very fast manner without the usage of falsework, using prefabricated elements and mounting all parts together in a position – in this case vertically – that would simplify the construction process. In order to reach the final state of the bridge, the vertically assembled parts are rotated into their final horizontal position. This article contains a description of the development of the method, a large scale test will be portrayed and two already designed bridges using the balanced lift method will be shown.