



Most Hongkong – Zhuhai – Makau – połączenie ze wschodnią wyspą, fot. marcuspon, fotolia.com

Morska przeprawa mostowa Hongkong – Zhuhai – Makau

tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

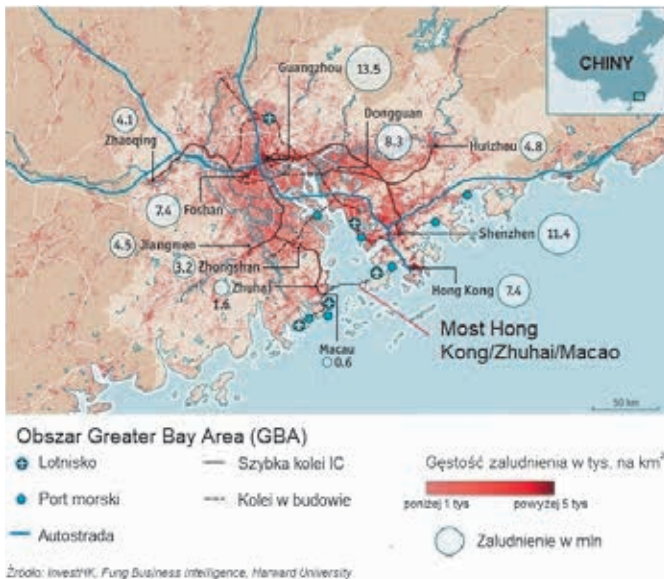
Delta Rzeki Perłowej niezupełnie przypomina rejon zatoki San Francisco, aglomeracje wokół Zatoki Tokijskiej czy Nowego Jorku. Jest jednak bezsprzecznie jedną z największych stref transportowo-przeładunkowych na świecie, z takimi portami morskimi jak Hongkong, Shenzhen i Kanton (Guangzhou) z trafiającymi tu rocznie ponad 63 mln kontenerów (TEU), oraz licznymi lotniskami wokół zatoki, obsługującymi 140 mln pasażerów.

Miasto Shenzhen, graniczące z Hongkongiem, jest największym skupiskiem zakładów przemysłu elektronicznego Chin i aspiruje do roli Doliny Krzemowej ChRL. Shenzhen pod względem ludności jest kilkunastokrotnie większe od kalifornijskiego San Jose, centrum Doliny Krzemowej, i prawie dwukrotnie większe populacyjnie od całego rejonu wokół zatoki San Francisco. Deltę Rzeki Perłowej często przyrównuje się do Doliny Krzemowej i San Francisco Bay Area, zwłaszcza w kontekście oddanego do użytku w październiku 2018 r., długiego na 55 km, mostu morskiego łączącego Hongkong z Zhuhai i Makau.

Stworzony przez Deng Xiaopinga 40 lat temu (1979) eksperymentalny obszar ekonomiczny w tym rejonie niewątpliwie

stał się motorem ekonomii Chin i fabryką dla całego świata. Niewielka osada rolnicza, jaką było Shenzhen, liczące wtedy mniej niż 30 tys. mieszkańców, stała się metropolią z zaludnieniem przekraczającym obecnie 13 mln mieszkańców. Przyłączenie do Chin obszaru Hongkongu (1997) i Makau (1999), zgodnie z hasłem *jeden kraj, dwa systemy*, a także włączenie Chin do Światowej Organizacji Handlu (WTO) w grudniu 2001 r. spowodowały gwałtowne pobudzenie gospodarki, szczególnie w strefach ekonomicznych, z głównym partnerem handlowym, jakim stały się Stany Zjednoczone.

Delta Rzeki Perłowej to najbardziej wysunięte na południe jedno z trzech głównych centrów ekonomicznych Chin,



Lokalizacja mostu



Zdjęcie satelitarne mostu, fot. ESA

o populacji blisko 70 mln i PKB 1300 mld USD. Na północy kraju powstało drugie z centrów, na osi Pekin – Tiencin – zatoka Pohaj (Beijing – Tianjin – Bo Hai), które skupia 10 miast o łącznej populacji 100 mln i PKB 1500 mld USD. Natomiast w środku Chin istnieje aglomeracja delty rzeki Jangcy z głównym miastem Szanghaj, zamieszkiwana przez 130 mln ludzi i wytwarzająca PKB o wartości 2000 mld USD rocznie. Ponad jedna piąta (21%) Chińczyków pracuje w tych trzech centrach przemysłowych i wytwarza blisko 40% PKB kraju.

Wielomiliardowy projekt połączenia Hongkongu z Makau przeprawą mostową został po raz pierwszy zaproponowany przez założyciela firmy nieruchomości Hopewell Holdings, Gordona Wu, jeszcze w latach 80. XX w. Głównym powodem były ograniczona liczba pracowników i limitowane zasoby naturalne Hongkongu. Pomysł budowy mostu ewoluował przez następnych kilkanaście lat, dając najpierw priorytet budowie nowego lotniska w Hongkongu – Chek Lap Kok na wyspie Lantau – a później budowie szybkiego podziemnego połączenia

kolejowego pomiędzy Szanzhen i Hongkongiem. Jednak na początku nowego milenium wraz z dynamicznym wzrostem ekonomicznym i dla większej integracji obszaru zatoki władze lokalne Hongkongu, Makau i Guangdong, przy akceptacji rządu centralnego w Pekinie, powróciły do planu połączenia brzegów zatoki. W latach 2003–2006 zlecono przeprowadzenie badań warunków budowy mostu. Po pięciu latach studiów i negocjacji w 2008 r. trzy strony uzgodniły projekt przeprawy morskiej i sposób finansowania tej inwestycji. Budowę mostu Hongkong – Zhuhai – Makau (HZMB) rozpoczęto pod koniec 2009 r., a uroczyste otwarcie nastąpiło po dziewięciu latach, 24 października 2018 r. W trakcie budowy doszło do kontrowersji związanych z montażem i odbiorem konstrukcji oraz ochroną siedliska białych delfinów, a w konsekwencji do opóźnień realizacji projektu. Ogólny koszt inwestycji wyniósł 18,3 mld USD i był prawie dwukrotnie wyższy od pierwotnie zakładanego.

Trzeba jednak podkreślić, że projekt mostu HZMB zawierał wiele wyzwań o niespotykanej do tej pory na świecie skali

Elementy konstrukcji mostu, wizualizacja: Krzysztof Dąbrowiecki





Estakada wzdłuż lotniska, fot. Krzysztof Dąbrowiecki

i złożoności, m.in. pod względem technicznym, hydrologicznym, meteorologicznym, logistycznym czy administracyjnym. Wprawdzie poligonem doświadczalnym w budowie takiej przeprawy było połączenie brzegów zatoki Hangzhou w pobliżu Szanghaju [5] oraz dziesiątki mostów wybudowanych przez rzekę Jangcy [6], to jednak wymagania wynikające z lokalizacji HZMB wielokrotnie przewyższały stopień trudności dotychczasowych projektów i konstrukcji. Pełną skalę tego przedsięwzięcia może zobrazować jedynie zdjęcie satelitarne wykonane przez ESA (European Space Agency).

Unikatowość projektu HZMB polega nie tylko na tym, że jest to obecnie najdłuższa morska przeprawa mostowa na świecie, ale głównie z uwagi na lokalizację, która obejmuje niezwykle ruchliwe obszary wodne i powietrzne. Most główny w kształcie węża liczy 29,6 km długości, a z dojazdami po obu stronach zatoki w sumie ma 55 km, w tym 6,7 km to podmorski tunel. Lokalizacja przeprawy narzuciła liczne ograniczenia projektowe, m.in. związane z wysokością pylonów mostów, które wymusiły zaprojektowanie tunelu morskiego, co w konsekwencji wymagało stworzenia dwóch sztucznych wysp na końcach tunelu.

Most musiał również spełniać wymóg odporności na uderzenia statków o wyporności do 300 tys. t. Dodatkowo obszar, na którym powstał, nawiedzają tajfuny o znacznej sile oraz trzęsienia ziemi, dlatego wytrzymałość konstrukcji musiała sprostać najwyższym wymaganiom antysejsmicznym. Projektowana żywotność przeprawy została zwiększona ze standardowych 100 do 120 lat i z powodu braku norm dla wydłużonej żywotności konstrukcji w chińskich przepisach budowlanych projektanci skorzystali z przepisów europejskich.

Przeprawa HZMB przecina wody zatoki Hongkongu ze wschodu na zachód, czyli głównego kierunku ruchu morskiego do strefy ekonomicznej. Dla zminimalizowania blokady nawigacji do portów po obu stronach zatoki zbudowano trzy mosty podwieszane dla poszczególnych kanałów ruchu. Normy projektowo-budowlane musiały nie tylko spełniać wymagania określone w odpowiednich chińskich przepisach, ale także uwzględniać standardy Hongkongu i Makau. Stąd konieczność ich dostosowania i ujednolicenia, w tym tak istotnego elementu organizacji ruchu, jak kierunek ruchu samochodów – lewostronny w Hongkongu i Makau, prawostronny w Chi-

Widok na mosty łączące lotnisko i BCF z HK, fot. Krzysztof Dąbrowiecki





Estakada prowadząca do mostu, fot. Krzysztof Dąbrowiecki

nach. Nie mniej istotną sprawą dla tego przedsięwzięcia była ochrona białych delfinów, mających swoje siedlisko w ujściu Rzeki Perłowej. W projekcie uwzględniono wysokie standardy ochrony naturalnego środowiska wodnego, zwłaszcza w okresie budowy, w tym m.in. zaniechano stosowania młotów udarowych do wbijania pali w dno zatoki dla ograniczenia hałasu i drgań podwodnych.

Wszystkie stawiane wymogi zmusiły projektantów, jak to określił Meng Fanchao, główny inżynier mostu, w wywiadzie dla chińskiej telewizji CGTN, do zmiany podejścia w planowaniu i organizacji budowy mostu, które zostały zdefiniowane przez dużą skalę, prefabrykację, standaryzację i montaż w warunkach morskich. W projekcie o takiej skali standaryzacja elementów konstrukcji była nieunikniona i nieodzowna, ale dzięki temu ich wykonanie było możliwe równocześnie w wielu miejscach kraju. Transport do punktów instalacji i montaż prefabrykatów były prowadzone w tym samym czasie na kilku odcinkach z wykorzystaniem dziesiątek barek i pływających dźwigów o specjalnej konstrukcji i dużej nośności. Taka organizacja poszczególnych etapów pracy wpłynęła zasadniczo na skrócenie czasu wykonania całego projektu.

Most Hongkong – Zhuhai – Makau składa się z trzech głównych części: mostu i tunelu morskiego, punktów przekraczania granicy w Hongkongu, Zhuhai i Makau oraz dróg dojazdowych do punktów granicznych w tych trzech strefach. Morski most i tunel od granicy Guangdong / Hongkong do punktów granicznych Zhuhai i Makau zostały zbudowane wspólnie przez trzy rządy regionalne, a pozostała część na terytorium Honkongu była nadzorowana i finansowana przez zarząd tego miasta. Punkty graniczne regionów i drogi łączące zostały zbudowane niezależnie przez lokalne administracje.

Główny odcinek mostu od strony Makau w formie wiaduktu o długości 22,9 km przedzielony jest trzema mostami podwieszonymi. Stalowo-betonowy wiadukt został postawiony w miejscach o małej głębokości wody, nieprzeznaczonych do żeglugi statków pełnomorskich. Konstrukcja składa się z ciągłych, stalowych dźwigarów skrzynkowych o rozpiętości 110 m każdy. Wiadukt posiada łącznie 124 przęsła i 660 morskich podpór, których średnice wynoszą od 2,3 do 2,8 m. Ze względu na znaczne różnice w geologii i głębokości dna wysokość filarów waha się od 7 do 107 m.

Most Jiuzhou, pierwszy od strony Makau, to dwupylonowy, stalowo-betonowy, podwieszony most wantowy w układzie

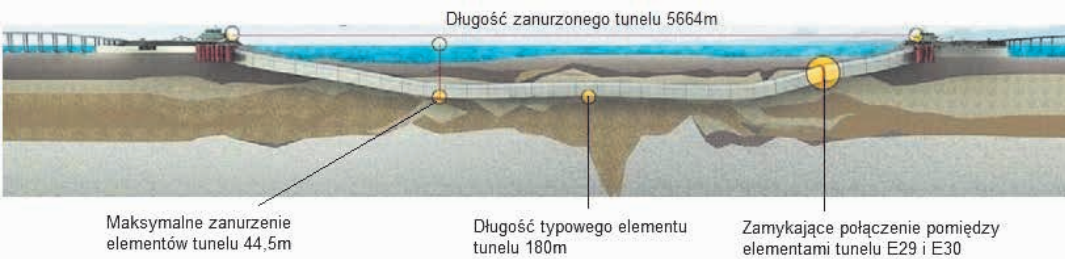
want w środkowej płaszczyźnie mostu. Obiekt o całkowitej długości 693 m ma konfigurację przęseł 85 + 127,5 + 268 + 127,5 + 85 m. Przęsła są podtrzymywane przez wanty zakotwione w dwóch 120-metrowych pylonach. Skupiają one po osiem par want i swoim wypukłym kształtem symbolizują rozpięte na wietrze żagle. Główny projektant tej konstrukcji, Naeem Hussain z firmy Arup, przyznał, że „zapropozowano, aby wszystkie trzy mosty były wantowe z centralnymi pylonami, ale o różnych kształtach, tak by uzyskać wizualną zbieżność i jednocześnie różnorodność między nimi. Ze względów środowiskowych zastosowano jednopodporową konstrukcję opartą na palach wbitych w dno morskie. Minimalizuje to przeszkody w przepływie wody i lepiej wpływa na środowisko chińskich białych delfinów”. Hussain dodał także: „Na etapie szczegółowego projektowania ponownie przeanalizowano projekt wszystkich trzech mostów, jednak most Jiuzhou został zachowany w oryginalnej formie, z żaglowymi pylonami”.

Most Jianghai jest drugim z kolei podwieszonym mostem od strony Makau. To trójpylonowa konstrukcja wantowa o całkowitej długości 994 m, z rozkładem przęseł 110 + 129 + 258 + 258 + 129 + 110 m, ze stalowym skrzynkowym dźwigarem o szerokości 39 m i głębokości 4,5 m. Kable wantowe zakotwione są w pasie środkowym w jednej płaszczyźnie. W tym przypadku kształt pylonów symbolizuje trzy delfiny wynurzające się z wody.

Most Qingzhou, usytuowany pośrodku zatoki, jest najdłuższą podwieszoną, wantową konstrukcją mostową, liczącą 1150 m, o konfiguracji przęseł 110 + 236 + 458 + 236 + 110 m. Opływowy dźwigar stalowy, podobnie jak poprzednie mosty, ma szerokość 39 m i głębokość 4,5 m. 12 par lin wantowych zakotwiono w dwóch płaszczyznach na zewnętrznych krawędziach dźwigarów. Splecione górne połączenia każdego pylonu symbolizują chińskie węzły harmonii i jedności.

Meng Fanchao zaznaczył, że ten most „ma symboliczne znaczenie, z wyraźnym naciskiem na estetykę i kulturę. Każdy, kto go zobaczy, najprawdopodobniej się zgodzi, że jest to coś więcej niż konstrukcja stworzona przez człowieka. Jest to przede wszystkim przekaz kulturowy”.

Mosty podwieszone znajdują się w miejscu podatnym na drgania wywołane silnym wiatrem, dlatego też w fazie projektowania zbudowano odpowiednie modele i przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym badania wibracji indukowanej wirami powietrza (*vortex-induced vibrations* – VIV). Wyniki



Maksymalne zanurzenie elementów tunelu 44,5m

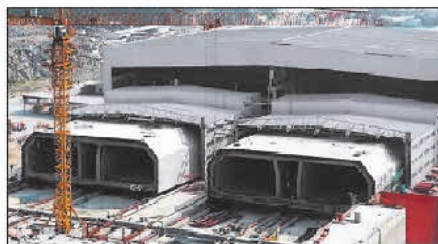
Długość typowego elementu tunelu 180m

Zamykające połączenie pomiędzy elementami tunelu E29 i E30

Główna konstrukcja: wodoodporny cement C45



Typowy element tunelu, 8 x 22,5m



Prefabrykacja elementów tunelu

Tunel podmorski, szkic Krzysztof Dąbrowiecki

testów, w tym modelu sekcji w skali 1:50 i skali 1:20 oraz modelu pełnego mostu w skali 1:70, potwierdziły znaczne drgania w oryginalnym projekcie dźwigara, dlatego zasugerowano zastosowanie, poza aerodynamicznym kształtem dźwigara, pasywnych środków do tłumienia drgań (*tuned mass dampers* – TMD).

Istotną częścią opisywanej przeprawy morskiej jest bezspornie podwodny tunel. Bliskość lotniska w Hongkongu nie pozwalała na budowę mostu o pylonach wyższych niż 88 m. Dlatego projektanci, nie mając innego wyjścia, zdecydowali się na dość unikatowe rozwiązanie, choć wydaje się, że sam pomysł oparto na istniejących podobnych rozwiązaniach łączących most i podwodny tunel. Przykładem jest m.in. most pomiędzy Kopenhagą i Malmö (1999) ze sztuczną wyspą Peberholm i czterokilometrowym podwodnym tunelem czy most Busan – Geoje wraz z tunelem (Korea Płd., 2010). Koreańska konstrukcja ma najdłuższy na świecie tunel podmorski o długości 3,2 km, położony 48 m poniżej średniego poziomu wody. Jednak w przypadku HZMB rozmiary konstrukcji, warunki hydrogeologiczne i meteorologiczne spotęgowały stopień trudności budowy, który dzięki temu zaowocował setkami chińskich innowacji i oryginalnych rozwiązań. Przedstawiony szkic tunelu z wymiarami obrazuje złożoność i stopień trudności tego rozwiązania.

Całkowita długość tunelu wynosi 6,75 km, w tym pod wodą znajduje się ok. 5,7 km konstrukcji. Jest to obecnie najdłuższy podwodny tunel na świecie, osadzony na dnie morskim na głębokości 44,5 m. Tunel został złożony z 33 prefabrykowanych cementowych bloków, wykonanych z wodoodpornego materiału. Ze względu na środowisko morskie konstrukcja znajduje się pod wpływem silnych czynników korozyjnych występujących w wodzie i glebie morskiej. Zanurzenie ponad 40 m pod wodą powoduje powstawanie wysokiego ciśnienia działającego na ściany sekcji tunelu. Te uwarunkowania zmusiły projektantów do poszukiwania, wnikliwego dobierania i testowania odpornych na korozję materiałów, w tym stali zbrojeniowej. Przeprowadzono także wiele testów mechanicznych powłok ochronnych prętów zbrojeniowych.

Z suchego doku, gdzie odbywała się prefabrykacja, do miejsca montażu gotowe elementy o wymiarach 11,5 x 37,95 m i średniej długości 180 m były holowane i precyzyjnie układane na wcześniej przygotowanym dnie. Bardzo ważne było określenie sił działających na poszczególnych etapach transportu i zanurzenia sekcji tunelu, jak momenty zginające i skręcające, siły

ścinające i normalne, oraz stabilności pionowej, jak np. odpowiedni wypór, aby zagwarantować bezpieczeństwo prac podczas montażu. Ze względu na liczne parametry, m.in. istnienie dużej zależności kształtu i wymiarów elementów tunelu, lokalne warunki falowe i wiatrowe, głębokość wody podczas transportu oraz miejsce zanurzenia, konieczne były wnikliwe badania numeryczne i basenowe modeli. Na ich podstawie opracowano parametry stabilności wykorzystane do transportu i zanurzenia sekcji tunelu.

Przejście z mostu do tunelu mogło być zrealizowane tylko przez dwie

nowo usypane wyspy, usytuowane od najbliższego lądu od kilku do kilkunastu kilometrów. Minimalna odległość między krawędziami sztucznych wysp wyniosła 5250 m. Sztuczne wyspy o długości 625 m każda ze względu na miękkie dno morskie utworzono przez zastosowanie 120 stalowych cylindrów wbitych w dno morskie. Każdy z nich miał średnicę 22,5 m, wysokość 55 m i ważył 550 t. Cylindry zostały wyprodukowane w zakładach w Szanghaju, oddalonych o ponad 1000 km od miejsca budowy. Po wbiciu i połączeniu stanowiły one obrys owalnych koferdamów, wewnątrz których po osuszeniu zbudowano fundamenty pod tunelową infrastrukturę, w tym połączenie z mostem. Konstrukcja zabudowy nad wejściem do tunelu nieco przypomina kształtem nadbudówkę statku, co dobrze harmonizuje z otoczeniem morskim. Most i tunel zapewniają podwójną trójpasmową jezdnię przeznaczoną dla samochodów o dopuszczalnej prędkości 100 km/h. Szerokość tunelu wynosi 2 x 14,25 m, prześwit tunelu w pionie ma 5,1 m. Sztuczne wyspy wyposażone są w platformy ratunkowe, które umożliwiają wysłanie ekip do tunelu w ciągu trzech minut i do siedmiu minut na most w sytuacji, gdy zaistnieje potrzeba pomocy.

Punkty przekraczania granicy (*boundary-crossing facilities* – BCF) zostały zbudowane i są administrowane niezależnie przez władze lokalnych rządów według koncepcji trzy regiony, trzy niestandardowe kontrole. BCF dla Hongkongu jest zlokalizowany przy lotnisku na wyspie Lantau. BCF Zhuhai, po przeciwnej stronie zatoki, znajduje się na stałym lądzie. BCF Makau natomiast na sztucznej wyspie o powierzchni 209 ha na wodach kontynentalnych autonomicznego regionu Makau. Zrekultywowana ziemia sztucznej wyspy podzielona została na cztery obszary: zaplecze administracyjne HZMB, obszar łączący z Zhuhai w granicach Chin, obszary administracyjne BCF Zhuhai i Makau. Wyspa połączona jest 13,4-kilometrową drogą ekspresową z regionalną pętlą delty Rzeki Perłowej leżącą na chińskim terytorium, obiegającą zatokę od Nanping do Hong Wan.

Oddany do użytku most HZMB, który znajduje się na terenie Chin oraz dwóch specjalnych obszarów administracyjnych, Hongkongu i Makau, ma sporo restrykcji związanych z przekroczeniem granicy, w tym konieczność uzyskiwania specjalnego zezwolenia przejazdowego dla indywidualnych kierowców czy korzystania z autobusów transportowych kursujących pomiędzy BCF po obu stronach zatoki. Dlatego wydaje się, że w przyszłości będzie miał poważnego współzawodnika. W budowie

znajduje się most Shenzhen – Zhongshan, który oddalony jest o kilkadziesiąt kilometrów na północ od HZMB i połączy brzegi zatoki w obrębie chińskiego terytorium. Zagwarantuje on większą łaćwość i wygodę przejazdu, bez ograniczeń związanych z odprawami na granicach. Przewidywany termin zakończenia inwestycji to 2024 r. Budowany most Shenzhen – Zhongshan będzie trzecim obiektem mostowym przecinającym zatokę Rzeki Perłowej.

Opisując wyzwania związane z budową HZMB, Meng Fanchao z dumą podkreślił: „Przed 1970 r. gdzie było globalne centrum budowania mostów? W Europie i Ameryce. Od 1970 r. do początku XXI w. gdzie było to centrum? W Japonii. Japończycy w okresie rozkwitu gospodarki zbudowali jedne z największych na świecie mostów i tuneli. Od początku XXI w. można powiedzieć, że centrum znajduje się w Chinach”. Niewątpliwie Fanchao ma rację. Kiedy analizuje się rozwój budownictwa mostowego w Chinach w ostatnich 20 latach, okazuje się, że powstaje tutaj najwięcej najbardziej nowoczesnych i skomplikowanych konstrukcji mostowych, bardzo często bijących rekordy długości czy wysokości. Przykładami są Wielki Most Danyang – Kunshan o długości ponad 164 km (2011), 720-metrowy podwieszony most Duge o wysokości konstrukcji 565 m ponad przełęczą (2016), 900-metrowy most wiszący przez kanion rzeki Sidu o wysokości 496 m (2009) czy opisana przeprawa morska Hongkong – Zhuhai – Makau (2018).

Literatura

- [1] Yeung A.: *Design and Construction of Hong Kong – Zhuhai – Macao Bridge Project*. Singapore 2017.
- [2] Zhang X.: From the 'Workshop of the World' to an emerging global city-region: Restructuring of the Pearl River Delta in the advanced services economy. PhD Thesis, University of Amsterdam, 2015.
- [3] Quanke S., Yue C., Li Y., de Witt H.: *Hongkong Zhuhai Macao Bridge Link in China Stretching the limits of Immersed Tunnelling* (online). Dostępny w Internecie: <https://tec-tunnel.com/wp-content/uploads/2012/11/Abstract+paper-1615119-Hong-Kong-Zhuhai-Macao-Link.pdf> (dostęp 21 lutego 2019).
- [4] Hussain N., Wong C., Carter M., Kwan S., Mak T.-W.: *Hong Kong Zhuhai Macao link*. „Procedia Engineering” 2011, Vol. 14, pp. 1485–1492.
- [5] Dąbrowiecki K.: *Most Hangzhou – najdłuższy transoceaniczny most świata*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, nr 1, s. 26–29.
- [6] Dąbrowiecki K.: *Most Szanghaj Chongming na rzece Jangcy*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, nr 2, s. 22–24.
- [7] *Government Information Bureau of the Macao Special Administrative Region*. „Macao Yearbook” 2016.
- [8] Materiały Biura Transportu i Budownictwa Hongkongu, 2018.
- [9] Materiały zarządu mostu Hongkong – Zhuhai – Makau, 2018.
- [10] Materiały European Space Agency (ESA) i Earth Watching, 2018.
- [11] Materiały China Global Television Network (CGTN), 2018.
- [12] Materiały Arup, 2018.
- [13] Materiały COWI i Dissing & Weitling, 2018.
- [14] Materiały Visual China Group (VCG Photo), 2018.



Most Jiuzhou, fot. Arup



Sztuczna wyspa z wyjazdem do tunelu, fot. HZMB



Montaż sekcji mostu, fot. HZMB

Hong Kong BCF, fot. HZMB

