

# Moje przemyślenia na temat projektowania mostów



tekst: prof. dr MICHEL VIRLOGEUX, École Nationale des Ponts et Chaussées, zdjęcia: ARCHIWUM AUTORA

Szanowny Rektorze, szanowni Członkowie Senatu Politechniki Wrocławskiej, szanowne Koleżanki i Koledzy, szanowni Państwo! Otrzymanie tytułu doktora honoris causa Politechniki Wrocławskiej jest bardzo dużym wyróżnieniem ze względu na renomę tej uczelni. To tu kształciło się wielu naukowców i badaczy, którzy poszerzali swoją wiedzę, a następnie przekazywali ją tysiącom studentów. Jeszcze bardziej uświadomiłem sobie ten zaszczyt, gdy zobaczyłem tablicę z listą dotychczasowych laureatów tego tytułu, z których wielu było niezwykle znanych na całym świecie.

Nominacje doktorów honoris causa z całego świata, a przede wszystkim z Europy, to dobry znak ewolucji Europy po straszliwej wojnie światowej sprzed 80 lat. Ewolucji, która przypomina pewne okresy w średniowieczu i w XVIII w., kiedy idee, artyści, muzycy przechodzili z kraju do kraju, aby wznosić katedry lub zasiadać na dworach królów i książąt. Przywołanie tej humanistycznej ewolucji Europy jest dziś tym bardziej potrzebne, że czasy kulturowego postępu są zagrożone wkroczeniem wojsk rosyjskich na Ukrainę, brutalnie przerywającym 80 lat pokoju i zagrażającym rozwojowi demokratycznej i humanistycznej Europy.

Wiem, że tę nominację zawdzięczam kilku polskim i europejskim przyjaciołom, którym pragnę podziękować za inicjatywę i wsparcie. W pierwszej kolejności dziękuję Janowi Biliszczukowi, profesorowi Politechniki Wrocławskiej i projektantowi najbardziej eleganckich polskich mostów. Muszę podziękować też naszemu wspólnemu przyjacielowi Michelowi Wojnarowiczowi, który wprowadził mnie do Polski i przedstawił profesorowi Biliszczukowi. Dziękuję rektorowi prof. Arkadiuszowi Wójsowi oraz członkom Senatu Politechniki Wrocławskiej. Szczególne podziękowania należą się także uczelniom, które poparły moją kandydaturę: Senatowi Politechniki Warszawskiej na podstawie opinii prof. Wojciecha Radomskiego i Senatowi Politechniki Krakowskiej na podstawie opinii prof. Kazimierza Flagi oraz prof. Györgyowi Balázsowi z Budapeszteńskiego Uniwersytetu Techniczno-Ekonomicznego. Jestem tym bardziej zaszczycony, że jestem tylko projektantem i inżynierem mostów, wykładowcą projektowania i budowy mostów w École Nationale des Ponts et Chaussées.

\*\*\*

Projektowanie i wznoszenie mostów to bardzo wąska dziedzina naszej cywilizacji, specyficzna dziedzina architektury, ale ważna dla jakości miejsc, w których są budowane, a także dla komunikacji i transportu w naszych społeczeństwach.

Znalazłem kiedyś klasyfikację sztuk według Hegla. Moją początkową reakcją było zdziwienie i satysfakcja z pierwszej pozycji architektury na tej liście. Ale jest zupełnie odwrotnie: Hegel klasyfikował sztukę według coraz mniejszych ograniczeń

generowanych przez materiały lub narzędzia. I tak architekturę ograniczają materiały budowlane, sprzęt stosowany podczas budowy i warunki terenowe, rzeźbę – materiały, jak marmur i narzędzia, malarstwo – płótno, farby i pędzle, taniec – granice ludzkiego ciała, muzykę – instrumenty, dlatego poezja jest sztuką najbardziej wolną, zdaną tylko na wyobraźnię poety.

Z drugiej strony, z czysto praktycznego punktu widzenia, architektura w szerszym ujęciu jest najbardziej użyteczna dla społeczeństwa, tworząc mieszkania, budynki użyteczności publicznej i sieci komunikacyjne. Muszę podkreślić, że mosty są częścią globalnej architektury, o czym świadczy wiele międzynarodowych publikacji prezentujących najbardziej ikoniczne budowle wzniesione na całym świecie w ostatnich latach. Chciałbym w tym miejscu podkreślić, że nie zgadzam się z zaleceniem Fritza Leonhardta (1909–1999), kiedy powiedział, że nie wolno mi mówić o architekturze mostów, bo to mogłoby doprowadzić ludzi do przekonania, że mosty muszą projektować architekci. Wolę założyć z góry, że projektant musi być inżynierem, zdolnym do określenia przepływu sił w konstrukcji od przyłożonych obciążeń przez podpory aż do podłoża. Ale zawsze albo prawie zawsze współpracuję z architektem, bo sam nie potrafię stworzyć szczegółowych kształtów starannie oddających przepływ sił, na których można grać również światłem i cieniem. Niekiedy architekt, z którym współpracuję, wymaga dużych zmian, które skłaniają mnie do innego podejścia. Ostatecznie to projektant będzie ponosił wyłączną odpowiedzialność w przypadku zaburzeń konstrukcyjnych, awarii, a nawet nadmiernych kosztów. Jest jak *baumeister* z dawnych czasów.

## Od Witruwiusza do współczesności

Jakie są więc główne cele projektowe? Zacytuję pierwszego bardzo znanego inżyniera, Witruwiusza, który napisał słynny traktat *O architekturze ksiąg dziesięć* (*De Architectura libri decem*). 20 wieków temu ustalili trzy cele projektu: *utilitas, firmitas, venustas*.

**Utilitas**, czyli użyteczność. Oznacza to, że konstrukcja musi być przydatna dla społeczeństwa, a ponieważ mosty są zwykle budowane za publiczne pieniądze, oznacza to również, że koszty muszą być kontrolowane. Nie musi być to cena najniższa z możliwych, ale żeby nie była przesadzona. A to jest niezwykle ważne w dzisiejszych czasach, kiedy musimy ograniczyć materiały i energię potrzebną do budowy naszych konstrukcji ze względu na zmiany klimatyczne, zmniejszanie się światowych zasobów naturalnych i pogłębiające się ubóstwo dużej części ludności nawet w naszym zachodnim świecie.

**Firmitas** – siła, odporność konstrukcji. Jest to oczywiste, ale muszę dodać do tego potrzebę trwałości. Coraz częściej mówimy

o trwałym świecie, dla mnie pierwszym celem ekologicznym jest, aby to, co zostało wzniesione za publiczne pieniądze, było użyteczne i służyło jak najdłużej.

**Venustas** – piękno, elegancja. Pierwszym celem eleganckiego projektu jest dopasowanie do otoczenia. Nie wolno nam projektować mostu ani żadnej innej konstrukcji w celu publikowania atrakcyjnych zdjęć w przeglądach architektonicznych, ale wznosić konstrukcję dobrze wpisaną w otoczenie i stworzoną na potrzeby danego miejsca. Oczywiście musimy dążyć do elegancji, z ładnymi kształtami świadczącymi o przepływie sił, z grą światła i cienia.

Projekt musi być stopniowo rozwijany, aby osiągnąć te cele. Niestety ewolucja branży budowlanej jest obecnie taka, że wielu inżynierów interesuje się jedynie ścisłym stosowaniem norm i wytycznych ze względu na ryzyko roszczeń prawnych w sądach. W głównych analizach w celu zapewnienia niezbędnego bezpieczeństwa konstrukcyjnego normy uwzględniają obciążenia ze współczynnikami bardzo dalekimi od realnych wartości obciążeń i sił. Praktyczne zasady są kalibrowane mniej lub bardziej konserwatywnie, aby obejmowały wiele różnych sytuacji i ocenę skutków złożonych zjawisk.

Normy są coraz bardziej wyśrubowane, a ich zastosowanie wymaga analizy coraz większej liczby przypadków obciążeń, coraz większej liczby ich kombinacji. Wraz z rozwojem narzędzi numerycznych inżynierowie mają tendencję do tworzenia obwiedni kombinacji, które straciły jakiegokolwiek fizyczne znaczenie. Ci inżynierowie tylko manipulują liczbami, które nie mają związku z rzeczywistymi siłami.

W ten sposób nie można opracować dobrego projektu mostu. Projektowanie mostu to posuwanie się krok po kroku, bardzo dalekie od mitu natchnionego projektanta patrzącego na kwiat lub ptaka lecącego za jego oknem, biorącego ołówki i projektującego most. Aby stworzyć efektywny projekt mostu, konieczne jest przeprowadzenie prostych obliczeń wstępnych, oszacowanie wpływu obciążeń stałych z uwzględnieniem etapów wznoszenia konstrukcji, ale także wpływu głównych oddziaływań na konstrukcję, jak ruch taboru, parcie wiatru, wpływy termiczne. Nie ma potrzeby wykonywania szczegółowych obliczeń w celu opracowania projektu koncepcyjnego. Lata temu używałem do tego tylko małego suwaka logarytmicznego, a teraz kalkulatora kieszonkowego. Na szczegółowe obliczenia przyjdzie pora w późniejszych etapach projektu, przy analizach detali mostu.

**Dlatego uniwersytety i grandes écoles muszą nadal nauczać klasycznej analizy konstrukcji, aby przyszli inżynierowie mogli namacalnie poznać skalę sił w swoich mostach, aby mogli poczuć przepływ sił.** To właśnie jeden z moich profesorów, Jean Salençon, nazwał *l'appropriation des connaissances*, czyli przyswajaniem wiedzy.

## Mosty zaprojektowane przez Michela Virlogeux

A teraz nadszedł czas, aby pokazać niektóre mosty i omówić sposoby, w jakich zostały zaprojektowane przy moim udziale. Zaczę od złożenia hołdu Fritzowi Leonhardtowi, który chociaż nie chciał mówić o architekturze mostów, to w swojej książce *Brücken* (Mosty) zaprezentował najlepszą lekcję architektury mostów. Mówiąc o ich estetyce, unikał słowa architektura. Przytoczę niektóre z jego kryteriów projektowych: wzmocnienie funkcji mostu, proporcje, porządek, jakość kształtów, integracja z miejscem i naturą, kolor, różnorodność.

## Most Seyssel

To był także główny cel Jörga Schlaicha (1934–2021), który opuścił nas w zeszłym roku. Pośrednio kładł nacisk na wyobraźnię i kreatywność oraz podkreślał związek między estetyką a etyką. Jednak głównym celem pozostało wpasowanie mostu w otoczenie. Każde otoczenie może bezpośrednio inspirować wybór konkretnego typu mostu, jak w przypadku mostu Seyssel z pylonem w miejscu wyspy na środku Rodanu (ryc. 1). Ale aby przejść od pomysłu do ostatecznego projektu, trzeba było wykonać wiele pracy.



Ryc. 1. Most Seyssel

## Most Chateaubriand

Most Chateaubriand nad rzeką Rance jest konstrukcją łukową, posadowioną na skale (ryc. 2). W tym miejscu muszę stwierdzić, że projektant musi umieć krytykować własne konstrukcje, w tym przypadku przyznaję, że to ja popełniłem błąd.

Most znajduje się powyżej tamy na Rance, a poziom wody może zmieniać się o 8 m w ciągu dnia. Woda jest niska w nocy, a wysoka w ciągu dnia, aby wytwarzać energię elektryczną w środku popołudnia. Pomiąłem ten fakt, a przez to wezłowania łuku zanurzają się w wodzie w ciągu dnia. Z pewnością nie jest to efekt, który chciałem osiągnąć.



Ryc. 2. Most Chateaubriand w czasie wysokiego poziomu wody

## Most Morbihan

Dzięki tej lekcji łuk wzniesionego później mostu Morbihan jest dobrze połączony z brzegami (ryc. 3). Sporządzono dużą serię szkiców, aby właściwie rozmieścić słupy na łuku i na brzegach, przy czym pomost przechodzi w sposób ciągły od jednego

przyczółka do drugiego, tak jakby łuk był przedłużeniem gruntu. Wreszcie, po odwiedzeniu mostu Kintai w Japonii, zaproponowałem utworzenie chodników po obu stronach łuku, aby umożliwić pieszym przejście nad rzeką.



Ryc. 3. Most Morbihan

### Mosty Antrenas oraz Truc de la Fare

Małe mosty również wymagają uwagi. Most Antrenas to mały łuk nad autostradą w środkowej Francji, bardzo widoczny na szczycie przełęczy (ryc. 4a). Jest to po prostu stalowa rura podtrzymująca wstępnie sprężoną płytę betonową. W pobliżu jest jeszcze drugi wiadukt, który zaprojektowałem jako kontrpunkt do poprzedniego (ryc. 4b). W wiadukcie Antrenas sily przenosi ściskany łuk, a w Truc de la Fare rozciągane ciągnio.



Ryc. 4a. Most Antrenas



Ryc. 4b. Most Truc de la Fare

W obu przypadkach przejście od koncepcji do ostatecznego projektu wymagało wiele pracy. W przypadku Truc de la Fare wraz z architektem opracowałem eleganckie detale, aby idealnie zrównoważyć stałe obciążenia i pokazać przepływ sił przez kształty. Kolory są ważne w tych dwóch strukturach.

### Nowy most Altiani

Musieliśmy też wznieść most w pobliżu pięknego, murowanego mostu łukowego zbudowanego na Korsyce w XVIII w. w Altiani, po drugiej stronie rzeki Tavignano (ryc. 5). Zdecydowaliśmy się na łuk, nawiązując do starego obiektu, ze względu na spójność, ale także jako znak dla naszych poprzedników, którzy wznieśli elegancką konstrukcję znacznie mniejszymi środkami. Była to okazja do udokumentowania pracy przejścia od koncepcji do ostatecznych kształtów przez dostosowanie liczby drugorzędnych podpór i stopniowe zmniejszanie objętości betonu w celu uzyskania lekkości i przejrzystości.



Ryc. 5. Nowy most Altiani

### Wiadukt Chirac

Klasyczne mosty mogą mieć interesujący wygląd pomimo stosunkowo niskich kosztów. Filary wiaduktu Chirac w środkowej Francji pozostawiają otwartą dolinę i chronią przyrodę (ryc. 6). Konstrukcja stalowa jest bogata, architekt nadał eleganckie kształty kolumnom podtrzymującym most, a kolory wzmocniły ogólny odbiór.



Ryc. 6. Wiadukt Chirac

### Wiadukt Verrières

Innym przykładem, na znacznie większą skalę, jest wiadukt Verrières na tej samej autostradzie (ryc. 7). Pokazuje to, że projekt musi uwzględniać nawet sprzęt montażowy. Ponieważ wysokie filary – dobrze zlokalizowane w miejscu budowy – mają zmienną



Ryc. 7. Wiadukt Verrières

szerokość, aby oprzeć się siłom wiatru działającym na pomost, ich szczegółowe kształty zostały wybrane tak, by umożliwić wykorzystanie form samowspinających się, dostosowanych do zmiennej szerokości filara.

### Wiadukt Les Angles

Ostatnim przykładem klasycznych mostów jest wiadukt Les Angles w Awinionie, obsługujący dwie linie TGV z Paryża do Marsylii i z Marsylii do Montpellier (ryc. 8). Pomimo niezwykle surowych ograniczeń stosowanych dla pociągów dużych prędkości oraz dylatacji spawanych szyn, rozkład przęseł jest regularny, aby spełnić wymagania zamówienia, ale także dla osiągnięcia innego celu, który uważam za niezwykle ważny: jedności. Most musi wyglądać jak jeden, a nie jak seria różnych konstrukcji.



Ryc. 8. Wiadukt Les Angles

Jeśli chodzi o detale, architekt musiał się napracować, aby przejść od stożkowatego kształtu filarów, dobranego tak, aby udrożnić bieg rzeki, do kwadratowego kształtu korony filaru na górze, niezbędnego podczas budowy mostu metodą wspornikową dla zapewnienia stateczności wahadła. Należało również, aby nadać betonowi filarów i pomostu biały kolor pałacu papieskiego w Awinionie, zlokalizowanego tuż przed nim.

### Nowy most Limoges

Powiedziałem kilka minut temu, że architekci mogą czasami nadać projektowi inną orientację. Bardzo dobrym przykładem jest konkurs na projekt mostu nad rzeką Vienne w Limoges (ryc. 9).



Ryc. 9. Nowy most Limoges

Ponieważ wszystkie mosty w tym mieście są łukami murowanymi, a niektóre pochodzą z XIII w., zdecydowaliśmy się zaprojektować łuk i wykonaliśmy różne szkice podczas naszej pierwszej wizyty w tym miejscu. Ale architekt Charles Lavigne nagle im się sprzeciwił, mówiąc, że nie uwzględniliśmy wymagań właściciela, który chciał, aby miasto „ponownie przywłaszczyło sobie” brzegi rzeki. Od razu zdecydowaliśmy się na zorganizowanie przejścia między brzegami a pomostem. Ciąg pieszy (schody) umieściliśmy na ukośnych elementach konstrukcji, który następnie przechodzi do pomostu. Trójkątne kształty mostu bezpośrednio wywodzą się z tej koncepcji.

Wynik jest dobry i odpowiada naszym celom, ale nie jestem w pełni usatysfakcjonowany, kiedy bowiem most został ukończony zgodnie z naszymi rysunkami, zdałem sobie sprawę, że krawędź schodów nie jest tożsama z krawędzią łuku. Nie przewidziałem poprawnie końcowych efektów wizualnych i czuję się nieswojo z realnym rezultatem.

Gdy się okazuje, że coś nie jest zadowalające lub gdy pojawia się nieoczekiwany problem i nie należy tego poprawiać ani rozwiązywać jakimś dodatkiem lub poprawką, to musimy wrócić do początku i ponownie rozważyć całościowy projekt, dodając rozwiązanie tej trudności do naszych ograniczeń i celów.

### Most Térénez

Przejdę teraz do kilku głównych konstrukcji, jak np. wantowy most Térénez nad rzeką Aulne z zakrzywionym w planie pomostem (ryc. 10). Ten most jest dobrym przykładem, jak projekt jest całkowicie zdominowany przez przepływ sił. Droga prowadząca z głębi łądy jest równoległa do rzeki, następnie przecina rzekę pod kątem 90° i wreszcie podąża wzdłuż drugiego brzegu.

Pierwszy projekt został już zaproponowany, kiedy wezwano mnie do pomocy. Uznałem wówczas, że unikatowym rozwiązaniem, wyjątkowo korzystnym dla komfortu ruchu, jest zaprojektowanie mostu wantowego zakrzywionego w planie. Nie było to łatwe zadanie, ponieważ odciągi zakotwiczone do zakrzywionego pomostu generują bardzo duże momenty zginające poprzeczne w pylonach i mogą przecinać skrajnię ruchu. Po wielu pracach i długim czasie udało mi się zaprojektować wieże po wewnętrznej



Ryc. 10. Most Térénez

stronie łuku, z kolumną nad pomostem nachyloną na zewnątrz łuku w kierunku wynikającego z tego działania want pod stałym obciążeniem oraz w kształcie odwróconej litery V pod pomostem, dostosowanym do pionowego obciążenia konstrukcji pomostu. Kształt został natychmiast dostosowany do wyrażenia przepływu sił przez architekta.

### Most Normandzki

W końcu miałem też okazję zaprojektować trzy duże mosty, poczynając od mostu w Normandii (ryc. 11). Minęło 19 lat między moim pierwszym udziałem w tym projekcie, gdy jako młody inżynier zacząłem pracę, a otwarciem mostu dla ruchu.

Kiedy stałem się odpowiedzialny za projekt, postanowiłem przeprowadzić się przez rzekę bez podpory w Sekwanie. Wybrałem ciągłą konstrukcję o długości 2140 m pomiędzy szczelinami dylatacyjnymi ze względu na jedność, proporcje i przejrzystość. Architekt postanowił zamocować lampy do oświetlenia nocnego na wantach, aby uniknąć wizualnego konfliktu pomiędzy pionowymi słupkami latarni a nachylenymi odcciągami.



Ryc. 11. Most Normandzki (pont de Normandie)

### Wiadukt Millau

Wiadukt Millau to najśłynniejszy z moich mostów, zaprojektowany wspólnie z Lordem Normanem Fosterem (ryc. 12). Kiedy dołączył do naszego zespołu, koncepcja konstrukcyjna była już wybrana, z głównymi liniami filarów i pylonów podporządkowanych potrzebom konstrukcyjnym. Ale mieliśmy wspólny cel smukłości, przejrzystości i jedności. Aby jak najlepiej wpisać się w miejsce, poprosiłem o wynurzenie filarów z ziemi i przywrócenie po pracach naturalnego stanowiska, ze specjalnym potraktowaniem dwóch głównych filarów ze względu na lokalne warunki. Zażądałem również, aby pomost sprawiał wrażenie wnikania w głąb wzgórz na obu końcach. By osiągnąć ten cel, musieliśmy za-



Ryc. 12. Wiadukt Millau

projektować bardzo specyficzne przyczółki, wąską dolną część i szeroką górną część, mającą dokładnie kształt pomostu, nie wspominając o ciężkiej pracy związanej z projektowaniem filarów o różnych wymiarach, wzdłużnych i poprzecznych, z połową paneli o lekko wypaczonej powierzchni, aby uzyskać światło i cień, tak aby powstałe kształty mogły być budowane przy użyciu rusztowań samowspinających się.

### Trzeci Most Bosforski

Wspominałem, że uniwersytety i szkoły wyższe muszą uczyć klasycznej analizy strukturalnej, aby skutecznie zrozumieć siły i odkształcenia. Ale to nie wystarczy. Jak podkreślał Leonhardt, należy sprzyjać rozwojowi wyobraźni i kreatywności, a także poczucia piękna i elegancji. Oznacza to, że studenci studiów inżynierskich muszą również otrzymać wykształcenie artystyczne, przynajmniej architektoniczne, i muszą brać udział w życiu kulturalnym, przynajmniej w celu ułatwienia przyszłych dyskusji i debat z architektami, właścicielami i społeczeństwem.

Zanim zakończę słowami podziękowania, muszę przeprosić żonę i dzieci, bo mieć za męża i ojca kogoś, kto poświęcił się projektowaniu i budowie mostów, możliwie sprawnemu i eleganckiemu, nie jest najkrótszą drogą do szczęścia.

I muszę podziękować wszystkim tym, którzy mnie kształcili, byli moimi wzorami lub inspiratorami, albo pracowali ze mną w najlepszych warunkach. Ponieważ byłaby to długa lista, wymienię tylko Jacques'a Mathivata, Rogera Lacroix, René Walthera i Jörga Schlaicha, którzy stali się moimi mentorami, a stopniowo przyjaciółmi. Chcę też oddać hołd Jean-François Kleinowi, który odszedł od nas w 2018 r. po długiej chorobie.

Zakończę wzmianką o Trzecim Moście Bosforskim (ryc. 13). Jego projekt przygotowaliśmy w ramach konkursu na zaprojektowanie i budowę, rozpoczynając pracę w lutym 2012 r. od białej kartki. Most jest dokładnie taki, jaki go sobie wymarzyliśmy, Jean-François Klein i ja, z zasugerowaną przeze mnie koncepcją hybrydową i bardzo eleganckimi wieżami zaprojektowanymi przez Kleina, które nadają temu mostowi kształt bardzo odmienny od wyglądu klasycznych mostów wiszących, mających bardzo sztywne pylony z ich pionowymi kolumnami. Kształt wybrany ze względu na swoją oryginalność, elegancję, lekkość nadaje temu mostowi majestatyczną siłę.



Ryc. 13. Trzeci Most Bosforski

Wykład wygłoszony 15 listopada 2022 r. na Politechnice Wrocławskiej podczas uroczystości nadania tytułu doktora honoris causa. Tłum. z jęz. ang. Marco Teichgraber, tytuł, niezbędne skróty i wybór ilustracji Jan Biliszczuk



Czytaj więcej