

# Największe europejskie budowle infrastruktury transportu kolejowego przełomu XX i XXI w. oraz badanie oddziaływań dużych prędkości na obiekty inżynieryjne

tekst: **prof. dr hab. inż. KAZIMIERZ TOWPIK**, Politechnika Warszawska; Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu

W publikacji opisano kilka największych obiektów mających znaczenie dla rozwoju europejskich kolei – tunel pod kanałem La Manche, połączenie Szwecji z Danią oraz tunel św. Gotarda. Wskazano kilka kierunków badań związanych z oddziaływaniem na obiekty inżynieryjne pociągów dużych prędkości.

## Wstęp

Nadrzędnym celem, którego osiągnięcie wymaga praktycznego wykorzystania wiedzy inżynierów transportu, jest ukształtowanie, eksploatacja i utrzymanie systemu transportowego kraju, zrównoważonego pod względem społecznym, ekonomicznym, przestrzennym, technicznym i ekologicznym. Aspekt społeczny oznacza równoprawność mobilności i możliwie najmniejszą uciążliwość transportu dla mieszkańców, aspekt ekonomiczny to organizacja transportu sprzyjająca rozwojowi gospodarki, aspekt ekologiczny to przede wszystkim zachowanie nieodnawialnych zasobów naturalnych, aspekt przestrzenny oznacza zagospodarowanie terenu sprzyjające minimalizowaniu przewozów, aspekt techniczny wreszcie to właściwy dobór standardów jakości, bezpieczeństwa i przepustowości systemów transportowych.

Jest to zadanie bardzo trudne, którego nie da się zrealizować bez aktywnego udziału świątłych i dobrze zawodowo przygotowanych techników i inżynierów transportu.

Rozważając złożone procesy logistyczne, metody wyboru środka transportu, strategie minimalizowania konfliktu pomiędzy kosztami przewozu a kosztami obsługi i wiele innych podobnych uwarunkowań, niezwykle istotnych dla prawidłowego funkcjonowania transportu, należy pamiętać, że procesy transportowe są uzależnione od rodzaju, stopnia rozwoju i stanu utrzymania infrastruktury transportu, zwłaszcza infrastruktury technicznej.

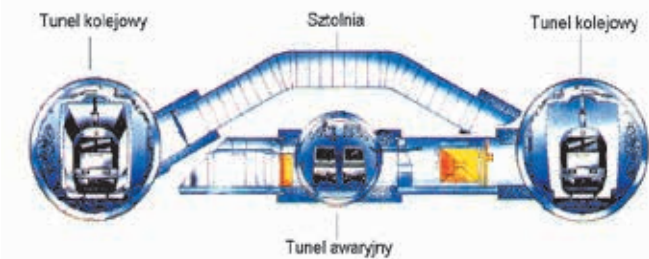
W Europie trwa ustawiczna rozbudowa sieci linii kolei dużych prędkości. Oprócz Francji, Niemiec i Hiszpanii również w innych krajach europejskich powstają nowe linie przystosowane do prędkości 300 km/h. Wzrastają również prędkości w ruchu towarowym, a do eksploatacji wprowadzany jest tabor o coraz większych naciskach osi. Ma to wpływ na wymagania techniczne stawiane infrastrukturze, a zwłaszcza na konieczność uzyskania daleko posuniętej odpowiedniości technicznej

systemu pojazd – droga szynowa. Liczne projekty badawcze umożliwiają zastosowanie w transporcie kolejowym najnowszych osiągnięć techniki, zwiększając konkurencyjność tej gałęzi transportu. Przejawem rozwoju infrastruktury transportu kolejowego są nowe inwestycje związane z wprowadzaniem inteligentnych systemów transportowych w celu ograniczenia wielkości przewozów, a tym samym również rozbudowy istniejącej infrastruktury. Niemniej jednak na przełomie wieków jesteśmy świadkami podejmowania inwestycji w dziedzinie infrastruktury transportu na skalę niespotykaną dotychczas w Europie.

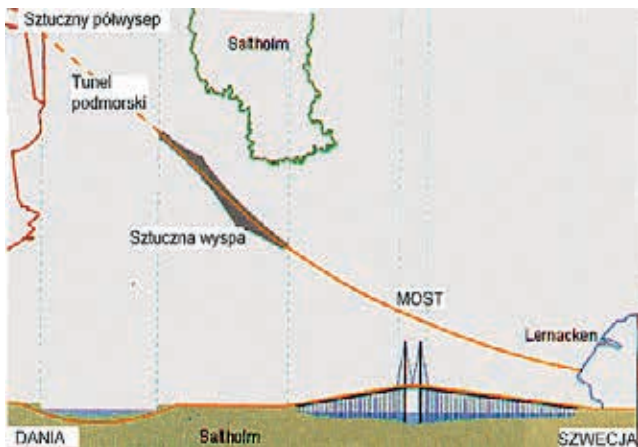
## Największe kolejowe budowle inżynieryjne w Europie na przełomie wieków

W listopadzie 1994 r. oddano do eksploatacji pierwsze w historii lądowe połączenie Francji z Wyspami Brytyjskimi tunelem pod kanałem La Manche. Tunel ten, o długości ok. 38 km, przebiega od terminalu Coquelles na wybrzeżu francuskim do terminalu Folkestone po stronie angielskiej. Połączenie zostało wykonane w postaci trzech tuneli biegnących równolegle (ryc. 1). Dwa skrajne przeznaczone są dla ruchu kolejowego, zaś środkowy pełni funkcję drogi awaryjnej. Poprzeczne sztolnie umożliwiają wyrównanie ciśnienia atmosferycznego w tunelach. Trasa, której przebieg uzależniony jest od budowy geologicznej, ma liczne łuki i znaczne pochYLENIA, schodząc miejscami do głębokości ok. 40 m poniżej poziomu dna morskiego.

Inną dużą inwestycją infrastrukturalną jest lądowe połączenie Danii ze Szwecją pomiędzy Kopenhagą a Malmö, zwane Öresundbron. Składa się ono z tunelu podmorskiego o długości ponad 4 km, sztucznej wyspy oraz mostu drogowo-kolejowego o blisko ośmiokilometrowej długości (ryc. 2). Tunel jest konstrukcją wykonaną z żelbetowych segmentów umieszczonych w rynn timer wykopanej w dnie morskim. Prócz dwóch torów kolejowych poprowadzono nim również dwujezdniowe połączenie



Ryc. 1. Widok tunelu pod kanałem La Manche i jego przekrój poprzeczny

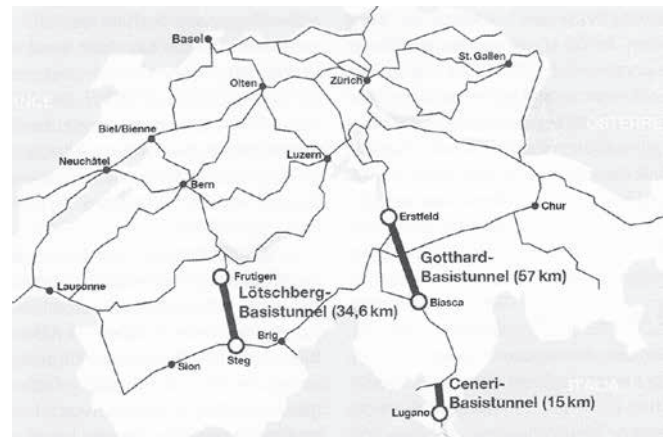


Ryc. 2. Łądowe połączenie Danii ze Szwecją: schemat trasy i widok mostu drogowo-kolejowego [8]

drogowe. Sztuczna wyspa (Peberholm) umożliwia przejście trasy z tunelu na most. Wysoka część mostu jest podwieszona do pylonów o wysokości 204 m. Pogłębienie cieśniny w rejonie mostu umożliwia przepływanie pod nim pełnomorskich

statków. Nowe połączenie Malmö – Kopenhaga przejmie obecnie ok. 40% kolejowych przewozów towarowych między Szwecją i kontynentem oraz obsługuje ruch pasażerski euro-regionu Öresund.

Najnowszym i największym obecnie obiektem infrastruktury kolei jest tunel św. Gotarda, położony na linii łączącej Mediolan z Bazyleą. Jest to najdłuższy i najgłębiej przebiegający tunel Europy. Jego budowa została ukończona w czerwcu 2016 r., a w grudniu 2016 r. rozpoczęła się normalna eksploatacja. Tunel stanowi fragment trasy NEAT (Neue Eisenbahn – Alpentransversale), nowego połączenia kolejowego przez Alpy, mającego istotne znaczenie dla ochrony środowiska, a także dla skrócenia czasu przejazdu między Szwajcarią i krajami Europy Zachodniej (ryc. 3) [1, 5].



Ryc. 3. Tunel św. Gotarda jako element kolejowego przejścia przez Alpy

Tunel ten, o długości 57 km, przebiegający między miejscowościami Erstfeld i Biasca, pod masywami Lötschberg i św. Gotarda, składa się z dwóch równoległych tuneli oraz 176 poprzecznych tuneli technicznych służących do ewakuacji oraz pomieszczenia urządzeń technicznych (wentylacyjnych i innych; ryc. 4).

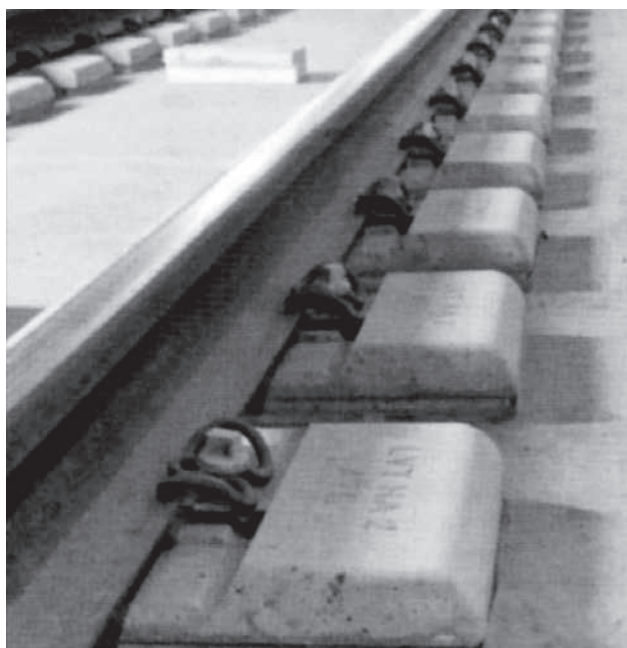


Ryc. 4. Widok tunelu św. Gotarda; źródło: materiały informacyjne Kummeler + Matter AG

Tunel podzielony jest na siedem sekcji. W sekcji czwartej i piątej umieszczono stacje techniczne Fado i Sedrun, umożliwiające pociągom zmianę toru. Ta ogromna inwestycja, której realizacja trwała 17 lat, wykonana została kosztem ponad 12 mld franków szwajcarskich. Wymagała wykonania niezwykle trudnych prac inżynierskich. Drążenie tunelu odbywało się za pomocą tarcz TBM (o średnicy 10 m), a częściowo przy użyciu materiałów wybuchowych. Wydobyto ok. 20 mln t materiału skalnego, który częściowo wykorzystywano do produkcji tubingów. Tunel był drążony jednocześnie z dwóch stron, a połączenie obu części nastąpiło w roku 2010. O precyzji wykonania robót świadczy fakt, że odchylenie w położeniu końców obu części tuneli w płaszczyźnie pionowej nie przekroczyło 10 mm, a w poziomej 80 mm. Trasa tunelu przebiega na wysokości nieprzekraczającej 500 m w stosunku do poziomu morza, a największe zastosowane pochylenia profilu torów nie przekraczają 12‰. W tunelu ułożono nawierzchnię bezpodsypaną typu LVT z betonowymi elementami podporowymi z otuliną, zatopionymi w płycie betonowej (ryc. 5) [4].

Nawierzchnię wykonywano na miejscu w tunelu, co wymagało opracowania i wyprodukowania odpowiednich, wielofunkcyjnych maszyn i urządzeń. Szyny o długości 120 m były dostarczane na miejsce ułożenia i zgrzewane elektrooporowo. Uzyskano bardzo dużą dokładność robót (np. odchyłki szerokości toru mieściły się w granicach od -0,5 do +1,5 mm z gradientem szerokości  $\leq 0,5$  mm).

Przy sterowaniu ruchem w systemie ETCS poziomu 2 przewidziano przejazdy od 50 do 80 pociągów pasażerskich na dobę z prędkością do 250 km/h. Umożliwi to skrócenie czasu przejazdu z Zurychu do Mediolanu z czterech do dwóch i pół godziny. Dzięki przepustowości 220–260 pociągów towarowych na dobę, osiągających prędkości do 160 km/h, możliwe będzie również zwiększenie o 69% przewozów towarowych (do 50 mln t ładunków rocznie) [3]. Możliwy będzie też transport dużych kontenerów. Dalszą częścią trasy alpejskiej będzie kolejny tunel Ceneri, którego budowę już rozpoczęto.



Ryc. 5. Widok nawierzchni kolejowej LVT ułożonej w torach tunelu św. Gotarda

Warto przypomnieć, że w wyniku szybkiej rozbudowy linii dużych prędkości powstaje również wiele nowych obiektów kolejowych poza Europą. Szczególnie szybki rozwój obserwuje się w Chinach, gdzie obecnie jest już w eksploatacji ponad 19 tys. km linii KDP. Powstają liczne obiekty infrastruktury kolejowej, stanowiące znaczny procent długości linii (ryc. 6) [2].



Ryc. 6. Estakada na linii dużych prędkości Wuhang – Guangzhou w Chinach, fot. A. Massel

### Niektóre kierunki badań oddziaływania dużych prędkości na obiekty inżynierskie

Pomimo osiągania coraz większych prędkości handlowych przez pociągi kursujące po liniach KDP (Chiny – 283,4 km/h, Francja – 271,8 km/h, Japonia – 267,4 km/h, Hiszpania – 259,6 km/h [2]) w dalszym ciągu prowadzi się badania nad wpływem oddziaływań pojazdów na obiekty inżynierskie, których celem jest sprawdzenie możliwości zwiększenia prędkości jazdy do ponad 320 km/h.

Nadmierne odkształcenia konstrukcji obiektu mogą mieć wpływ na powstawanie pionowych i poziomych odkształceń ułożonego na nim toru, przekroczenia dopuszczalnych naprężeń w szynach lub pojawienia się drgań pogarszających spokojność jazdy [7]. Przemieszczenia podłużne konstrukcji są następstwem zmian temperatury, ugięcia i skręcania podpór. Występują również wskutek oddziaływań obciążeń eksploatacyjnych, a w przypadku mostów betonowych w następstwie kurczliwości i pęcznienia betonu.

Analizując dynamiczne oddziaływania pociągów dużych prędkości na konstrukcję mostu, należy uwzględnić takie zasadnicze czynniki, jak rozpiętość obiektu, długości linii wpływu ugięcia rozpatrywanej części konstrukcji, częstotliwości drgań własnych całego elementu oraz charakter wzbudzanych drgań, masę konstrukcji, tłumienie konstrukcyjne oraz sprężystość i tłumienie w nawierzchni, jak również charakterystyki konstrukcyjne pojazdu oraz stan utrzymania pojazdu i nawierzchni kolejowej na moście.

Ocena oddziaływań pociągów dużych prędkości na konstrukcje obiektów inżynierskich wskazuje, że niezbędne jest ograniczenie wartości:

- strzałki maksymalnego ugięcia konstrukcji,
- kąta obrotu na podporze,
- maksymalnego poprzecznego przemieszczenia oraz skręcenia pomostu.

W przypadku mostów przy prędkości jazdy pociągów przekraczającej 200 km/h wichrowatość pomostu nie może przekraczać 0,5‰, a wichrowatość toru 2,5‰. Ułożenie na moście toru bezстыkowego z warstwą podsypki wymaga ograniczenia pionowych przemieszczeń końców pomostu do 3 mm, a w przypadku bezpośredniego ułożenia toru na konstrukcji mostu do 1,5 mm. Gdy pionowe przyspieszenia pomostu osiągają 0,7–0,8 g, obserwuje się w nawierzchni ułożonej na moście rozluźnienie warstwy podsypki. Układanie mat sprężystych pomiędzy warstwą podsypki i pomostem powoduje jedynie nasilenie tego zjawiska.

Natomiast w konstrukcjach bezpodsypkowych już przy niewielkich wartościach sił pionowych występuje rezonans pomostów, prowadzący do zwiększonych ugięć oraz większych pionowych przyspieszeń konstrukcji. Jest to przyczyną ograniczenia dopuszczalnych pionowych przyspieszeń pomostu z warstwą podsypki do 0,35 g, a do przy braku podsypki do 0,5 G. Stwierdzono również, że częstotliwość drgań pomostu nie powinna przekraczać 20 Hz.

Projektowanie mostów przeznaczonych dla linii z ruchem dużych prędkości wymaga wykonywania analiz dynamicznych. Złożoność badań powoduje, że często najlepszy efekt daje symulacja komputerowa zjawisk związanych z oddziaływaniami pociągu na obiekt. Np. w Austrii wykonuje się obliczenia numeryczne w celu oceny ryzyka związanego z oddziaływaniami pociągów dużych prędkości na mosty będące w eksploatacji [9].

Przy analizie dynamicznej mostów linii KDP stosowany jest dla prędkości jazdy przekraczającej 200 km/h model obciążenia pociągami pasażerskimi HSML (*high speed load model*). Rozróżnia się przy tym model HSML-A stosowany w przypadku mostów o rozpiętości do 7 m oraz HSML-B dla mostów z przęsłami swobodnie podpartymi i rozpiętości przekraczającej 7 m. Wyboru modelu do analizy dokonuje się dla warunków określonych w Eurokodzie według szczegółowego algorytmu postępowania podanego w kartach UIC.

Analizy zmęczeniowej obiektu dokonuje się dla mieszane go ruchu lekkiego z uwzględnieniem czterech modeli obciążeń przy różnej prędkości przemieszczania się obciążeń (od 40 m/s do wartości maksymalnej). Ma to na celu określenie dynamicznych charakterystyk mostu i wyznaczenie maksymalnych naprężeń występujących w konstrukcji. Sprawdza się również, czy nie pojawi się rezonans. Ocena wytrzymałości mostów w warunkach obciążeń dynamicznych wymaga oszacowania naprężeń rozciągających i ściskających oraz wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji przy założeniu co najmniej stu letniego okresu jej pracy.

Połączenie oddziaływania sił podłużnych w wyniku hamowania i rozruchu pojazdów trakcyjnych, ugięcia pomostu oraz działania sił termicznych może doprowadzać do pojawienia się dodatkowych naprężeń w współpracującym układzie elementów toru i obiektu. Stawia się warunek, aby pod pionowym obciążeniem przejeżdżającym pociągiem przemieszczenia poziome toru bezстыkowego nie przekraczały 10 mm, a w przypadku dodatkowych oddziaływań sił podłużnych wskutek hamowania lub rozruchu pojazdu – 5 mm.

Jednym z kierunków badań jest również poszukiwanie rozwiązań zmniejszających dodatkową emisję akustyczną w następstwie pobudzenia do drgań konstrukcji mostu

podczas przejazdu pociągu. Drgania te, o częstotliwościach w granicach 20–500 Hz, są źródłem dodatkowego hałasu, który sumuje się z hałasem toczenia się kół po szynach. Ta dodatkowa emisja w przypadkach mostów stalowych może zwiększać poziom hałasu o ok. 7 dB. Zjawisku temu można zapobiec przez wprowadzenie zmian w konstrukcji mostu, układanie nawierzchni bezpodsypkowych lub stosowanie mat pod warstwą tłucznia, jak również podkładów z warstwą polimeru na dolnej powierzchni oraz stosowanie przytwierdzeń sprężystych. Prowadzone są również badania nad sposobami ograniczenia hałasu aerodynamicznego, dominującego w przypadku szybkich pociągów, zwłaszcza związanego z wjazdem i opuszczaniem tunelu przez pociąg.

## Podsumowanie

Zmiany w transporcie wynikające z procesów globalizacji gospodarki i centralizacji usług transportowych znajdują swój wyraz w rozwoju technicznej infrastruktury transportu i stawiają przed inżynierami coraz to nowe wyzwania. Można sądzić, że najbliższa przyszłość to rozwój inteligentnych systemów transportowych, postępująca standaryzacja i harmonizacja wymagań technicznych oraz nacisk na skuteczniejszą ochronę środowiska. Należy również oczekiwać rozwoju nowych, niekonwencjonalnych systemów transportu, wymagających budowy innych niż obecnie obiektów inżynierskich.

Najbliższa przyszłość to dalsza dynamiczna rozbudowa linii dużych prędkości i stopniowe podnoszenie prędkości jazdy ponad obecne 320 km/h. Wymaga to kontynuacji badań nad oddziaływaniami pojazdów na obiekty infrastruktury i optymalizacją warunków współpracy koła z szyną oraz poszukiwania rozwiązań ograniczających oddziaływanie wibroakustyczne pojazdów szynowych jadących z dużymi prędkościami.

## Literatura

- [1] Germanier N.: *Die NEAT ist die optimale Lösung für den Güter und Personenverkehr durch die Schweizer Alpen*. „ETR Spezial” 2016, Nr. 5.
- [2] Hartill J.: *China still out in front*. „Railway Gazette International” 2015, No 7.
- [3] Huber P.: *Der Einbau der Bahntechnik im Gotthard-Basistunnel*. „ETR Spezial” 2016, Nr. 5.
- [4] Laborenz P., Stahl W., Silbermann T.: *Gottard Base Tunnel completes LVT installation*. „Railway Gazette International” 2015, No. 1.
- [5] Malinowski Ł.: *Najdłuższy i najgłębszy. Wszystko o tunelu Gotarda*. „Rynek Kolejowy” 2016, nr 8–9.
- [6] Stiebel D.: *Die Schallabstrahlung von Eisenbahnbrücken – ein Überblick über die Erfahrungen bei der Deutschen Bahn*. „ZEVrail” 2015, Nr. 139.
- [7] Towpik K.: *Koleje dużych prędkości – infrastruktura drogi kolejowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
- [8] Towpik K.: *Infrastruktura transportu kolejowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009.
- [9] Unterweger H., Taras A., Schörghofer A.: *Tragsicherheit von Bestandsbrücken für neue Hochgeschwindigkeitszüge*. „El-Eisenbahningenieur” 2016, Nr. 4, 5.

