

## Wymagania projektowe dla tuneli kolejowych

Adrian KAŻMIERCZAK<sup>1</sup>, Jolanta Maria RADZISZEWSKA-WOLIŃSKA<sup>2</sup>

### Streszczenie

W realizowanym przez Instytut Kolejnictwa temacie pt. „Standardy Techniczne – Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – Wytyczne projektowania” opracowano dokumentację, w której Tom III.2 Tunele, zawiera wytyczne do podjęcia prac nad zaprojektowaniem nowych linii kolejowych, a także ich budowy. W artykule opisano aspekty projektowania tuneli kolejowych przy uwzględnieniu wymagań budowlanych oraz zagadnień w istotny sposób wpływających na bezpieczeństwo użytkowania tych budowli.

**Słowa kluczowe:** systemy tunelowe, portale, bezpieczeństwo pożarowe tuneli, ewakuacja, wentylacja, tabor szynowy

### 1. Wstęp

Podziemne budownictwo komunikacyjne, które ma na celu omijanie naturalnych przeszkód takich jak góry i akwenty, zaczęło rozwijać się w XIX w. Na przyspieszenie jego rozwoju miał wpływ intensywny rozwój kolejnictwa zapoczątkowany wynalezieniem przez Roberta Stephensona pierwszej lokomotywy parowej i budowa w latach 1826–1830 pierwszych dwóch tuneli na linii kolejowej Liverpool – Manchester. Korzyści wynikające z możliwości skracania dróg dojazdu, wpłynęły na budowę na masową skalę tuneli kolejowych i drogowych. To spowodowało dalszy rozwój techniki i technologii ich wykonania z wykorzystaniem coraz efektywniejszych materiałów oraz urządzeń. Przykładem jest pierwszy tunel kolejowy Fréjus o długości 13 636 m, wydrążony w masywie Mont-Cenis w Alpach francuskich. Budowę tunelu ukończono w 1871 r. Do budowy po raz pierwszy zastosowano wiertnicę poruszającą się po szynach i napędzaną sprężonym powietrzem. Wiertnica była wyposażona w zestaw 10 świdrów chłodzonych wodą również wtryskiwaną za pomocą sprężonego powietrza. Szczególny wpływ na rozwój technologii miało wynalezienie w 1866 r. przez A.B. Nobla dynamitu, a później innych środków wybuchowych (m.in. żelatyny wybuchowej w 1876 r., prochu bezdymnego w 1888 r.). Następnym tunelem kolejowym zbudowanym w Europie w latach 1871–1881 był tunel Saint Gotthard o długości 15 km. Mniej więcej w tym

samym czasie budowano tunel kolejowy w Hoosac w Massachusetts w USA. Przełom nastąpił po 1950 r. kiedy pojawiły się maszyny do drążenia tuneli, umożliwiające wykonanie praktycznie każdej budowli podziemnej [9].

### 2. Projektowanie i budowa tuneli

Projektowanie tunelu przebiega wieloetapowo, gdyż projekt powstaje w wyniku równoległe prowadzonych studiów ogólnych, geologicznych i ekonomicznych. Na etapie budowy tunelu kontynuowane są prace związane z monitorowaniem i kontrolą zachowania podłoża, konstrukcji wstępnych i ostatecznych tunelu oraz oddziaływania robót tunelowych na otoczenie.

W zależności od przeznaczenia tuneli oraz od hydrologicznych warunków planowanej lokalizacji, tunele są obecnie budowane według metody podzielonej na trzy podstawowe grupy (klasyczne, tarczowe oraz odkrywkowe). W rozwiązaniu klasycznym, górniczym wyrobisko powstaje bez naruszenia warstwy podłoża ponad stropem tunelu. Należą do nich:

- klasyczne metody górnicze (belgijska, paryska, niemiecka),
- nowa Metoda Austriacka Budowy Tuneli – konwencjonalna i jej odmiana ADECO-RS (*Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils*).

<sup>1</sup> Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: akażmierczak@ikolej.pl.

<sup>2</sup> Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: jradziszewska-wolinska@ikolej.pl.

W metodzie tarczowej stosuje się zmechanizowane tarcze umiejscowione na przodzie maszyny. Zadaniem tarcz jest rozdrabnianie gruntu, a rozdrobniony materiał jest wydobywany na powierzchnię. Wydrążona przestrzeń jest obudowywana. W tej metodzie stosuje się maszyny do tunelowania TM (*Tunnelling Machines*), które dzielą się na maszyny wierzące TBM (*Tunnel Boring Machines*) oraz tarcze SM (*Shield Machines*). Wyróżnia się tarcze typu otwartego i tarcze typu zamkniętego:

- tarcze typu otwartego:
  - TBM Gripper,
  - TBM-S,
  - SM *full-face* (bez podparcia, z podparciem mechanicznym, ze wspomaganie sprężonym powietrzem, z podparciem płuczką, z podparciem szlamem z urobionego materiału gruntowego),
  - SM *with part heading* (bez podparcia, z podparciem mechanicznym, ze wspomaganie sprężonym powietrzem, z podparciem płuczką);
- tarcze typu zamkniętego:
  - TBM EPB,
  - TBM SS (Slurry).

W technice odkrywkowej robi się wykop z powierzchni terenu z jednoczesnym zapewnieniem stateczności uskołu naziemu, a następnie wykonuje się obudowę tunelu w wykopie, po czym następuje jego zasypanie z zagęszczeniem zasypki. W tej grupie znane są następujące metody:

- berlińska klasyczna,
- berlińska – odmiana hamburska,
- ścian szczelinowych (rozpartych lub kotwionych),
- ścian szczelinowych – odmiana mediolańska / stropowa.

W przypadku zróżnicowanego ukształtowania terenu oraz warunków geologicznych występujących na trasie planowanego tunelu możliwe jest łączenie wymienionych metod.

Przekrój tunelu powinien zapewnić zachowanie skrajni wynikającej z warunków eksploatacyjnych, która uwzględnia skrajnie budowlaną, normatywną dla poszczególnych rodzajów taboru oraz wymaganą przestrzeń na drogi ewakuacyjne, osprzęt (w tym urządzenia systemu wentylacyjnego) i odwodnienie. Wymagane jest także uwzględnienie efektu aerodynamicznego, który jest jednym z istotnych czynników mających wpływ na kształtowanie minimalnego przekroju poprzecznego jednotorowych oraz dwutorowych tuneli dla Kolei Dużych Prędkości.

W celu zapewnienia wymaganego kryterium dotyczącego zdrowia (ochrony narządu słuchu pasażerów) konieczne jest ograniczenie wahań ciśnienia lub szybkości, z jaką zmienia się ciśnienie, gdy jeden lub więcej pociągów wjeżdża i przejeżdża przez tunel. Do spełnienia tego kryterium, maksymalne różnice ciśnienia w tunelach nie powinny przekraczać 10 kPa [5].

Dodatkowo, dla pociągów poruszających się z prędkością większą niż 200 km/h wymaga się spełnienia medycznego kryterium komfortu. Wynika to ze zmian ciśnienia

wewnątrz pociągów, będących efektem działania ciśnień zewnętrznych i stopnia szczelności składu pociągu. Spełnienie medycznego kryterium komfortu, należy określać według normy PN-EN 14067-5+A1:2011 [3] za pomocą jednej z wymienionych metod:

- pomiarów w pełnej skali,
- szacowania na podstawie równań aproksymacyjnych,
- przewidywania przy użyciu sprawdzonych metod numerycznych,
- pomiarów za pomocą testów modeli ruchomych w mniejszej skali (1/25 lub większej).

Podczas projektowania tuneli, ważnym aspektem, który należy uwzględnić, są portale tunelowe, które mogą być wpasowane w krajobraz (wtopione w otoczenie) lub wstawione w krajobraz (stanowiące wyodrębniony element architektoniczny). Ponadto, przy projektowaniu wlotów do tuneli kolejowych należy uwzględnić zjawisko uderzenia sonicznego (*sonic boom*), powodowanego wjazdem / wyjazdem pojazdu kolejowego dużych prędkości z tunelu. Kształtowanie osi podłużnej tunelu w profilu i planie zależy od:

- przebiegu linii kolejowej,
- wymagań eksploatacyjnych,
- warunków geotechnicznych, geologicznych oraz hydrogeologicznych posadowienia tunelu,
- sposobów odwodnienia,
- infrastruktury podziemnej i naziemnej,
- metody budowy.

Podczas projektowania tuneli kolejowych szczególną uwagę należy zwrócić na wykorzystanie monitoringu, który zgodnie z Normą Eurokod 0 [2] powinien być wprowadzony w stadium projektowania, wykonywania i utrzymania. Ponadto, zastosowane materiały konstrukcyjne (stal, beton) muszą spełniać wymagania w zakresie wytrzymałości, a cała konstrukcja powinna spełniać wymagania w zakresie stanu granicznego nośności i użyteczności. Niezbędne jest również zapewnienie izolacyjności budowli i jej odwodnienia dostosowanego do warunków hydrogeologicznych oraz zastosowanej metody budowy tunelu.

### 3. Bezpieczeństwo w tunelach kolejowych

Oprócz uwzględnienia kosztów, na każdym etapie projektu oraz budowy tunelu, należy dążyć do otrzymania akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa, na który wpływa m.in. wyposażenie, wentylacja i cała infrastruktura współistniejąca (przejścia między nitkami tunelu, lokalizacja wyjść ewakuacyjnych), a także sposób organizowania działań służb ratowniczych i rodzaj taboru, który będzie eksploatowany w tunelu. Na bezpieczeństwo w tunelach składają się cztery aspekty. W celu sprowadzenia rezydualnego ryzyka do maksymalnie niskiego poziomu, należy je realizować według podanej kolejności:

- zapobieganie,

- łagodzenie skutków,
- ewakuacja,
- ratownictwo.

Podczas opracowywania planu awaryjnego dla tunelu należy wyróżnić następujące możliwe zagrożenia:

- incydenty typu „gorącego”: pożar, wybuch i następnie pożar, emisja toksycznego dymu lub gazów,
- incydent typu „zimnego”: zderzenie, wykolejenie,
- dłuższe zatrzymanie pociągu,
- zagrożenia inne takie jak:
  - przypadki wtargnięcia do tunelu osób postronnych,
  - akty terroryzmu, jako czyny celowe oraz dokonane z premedytacją, których celem jest spowodowanie zniszczeń, obrażeń i śmierci,
  - zagrożenia dla osób przebywających w sąsiedztwie tunelu, którego konstrukcja może grozić zawaleniem i doprowadzić do katastrofy.

Najważniejszym wymaganiem w zakresie bezpieczeństwa pożarowego tunelu jest zapewnienie odporności ogniowej konstrukcji tunelu o klasie nośności ogniowej nie niższej niż R 120, określonej w odniesieniu do krzywej standardowej „temperatura – czas” [7]. W przypadku pożaru, wewnętrzna powierzchnia budowli musi pozostać nie naruszona na czas wystarczający do samodzielnego ratowania się, ewakuacji pasażerów i personelu oraz interwencji służb ratowniczych. Zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (UE) 2016/364 [4], wyroby budowlane i elementy konstrukcyjne wewnątrz wszystkich tuneli również muszą spełniać wymagania w zakresie odporności ogniowej.

Rola oraz zasady działania służb ratowniczych (zgodne z odpowiednimi przepisami krajowymi) są oparte na założeniu, że służby ratownicze interweniujące w przypadku incydentu w tunelu, za priorytet przyjmują ochronę życia, natomiast wymagania dotyczące czasu lub sposobu prowadzenia akcji wynikają z wewnętrznych procedur. Należy zaznaczyć, że chociaż incydenty w tunelach kolejowych pociągające za sobą wiele ofiar śmiertelnych rzadko występują, należy założyć możliwość wystąpienia takiego incydentu, o bardzo małym prawdopodobieństwie, w przypadku którego nawet dobrze wyposażone służby ratownicze będą miały ograniczone możliwości działania, jak np. rozległy pożar pociągu towarowego.

W celu ograniczenia skutków ewentualnych pożarów w tunelach kolejowych, indywidualnie dla każdego tunelu, należy rozważyć, a także wprowadzić dodatkowe środki techniczne oraz organizacyjne, które nie są wymagane w przepisach zasadniczych. Do środków służących „kontrolii dymu” zalicza się m.in. następujące pasywne i aktywne rozwiązania techniczne:

- ograniczenie rozprzestrzeniania się dymu przez zastosowanie kurtyn i klap dymowych oraz drzwi ognioodpornych,
- ograniczenie oraz kontrolowanie rozprzestrzeniania się dymu za pomocą wentylacji,

- powiększenie „przestrzeni magazynowania” dymu przez zastosowanie dużej przestrzeni podsuftowej na stacjach pełniących rolę buforu bezpieczeństwa,
- usuwanie dymu przez wentylację mechaniczną (kanały, szyby, szachty).

Dla każdego tunelu dłuższego niż 1 km, musi być opracowany plan awaryjny, zgodny z dostępnymi środkami do samoratownia, ewakuacji, walki z ogniem i ratownictwa. Przed otwarciem pojedynczego tunelu lub ciągu tuneli należy przeprowadzić kompleksowe ćwiczenia obejmujące procedury ewakuacji i ratownictwa z udziałem wszystkich kategorii personelu określonego w tym planie.

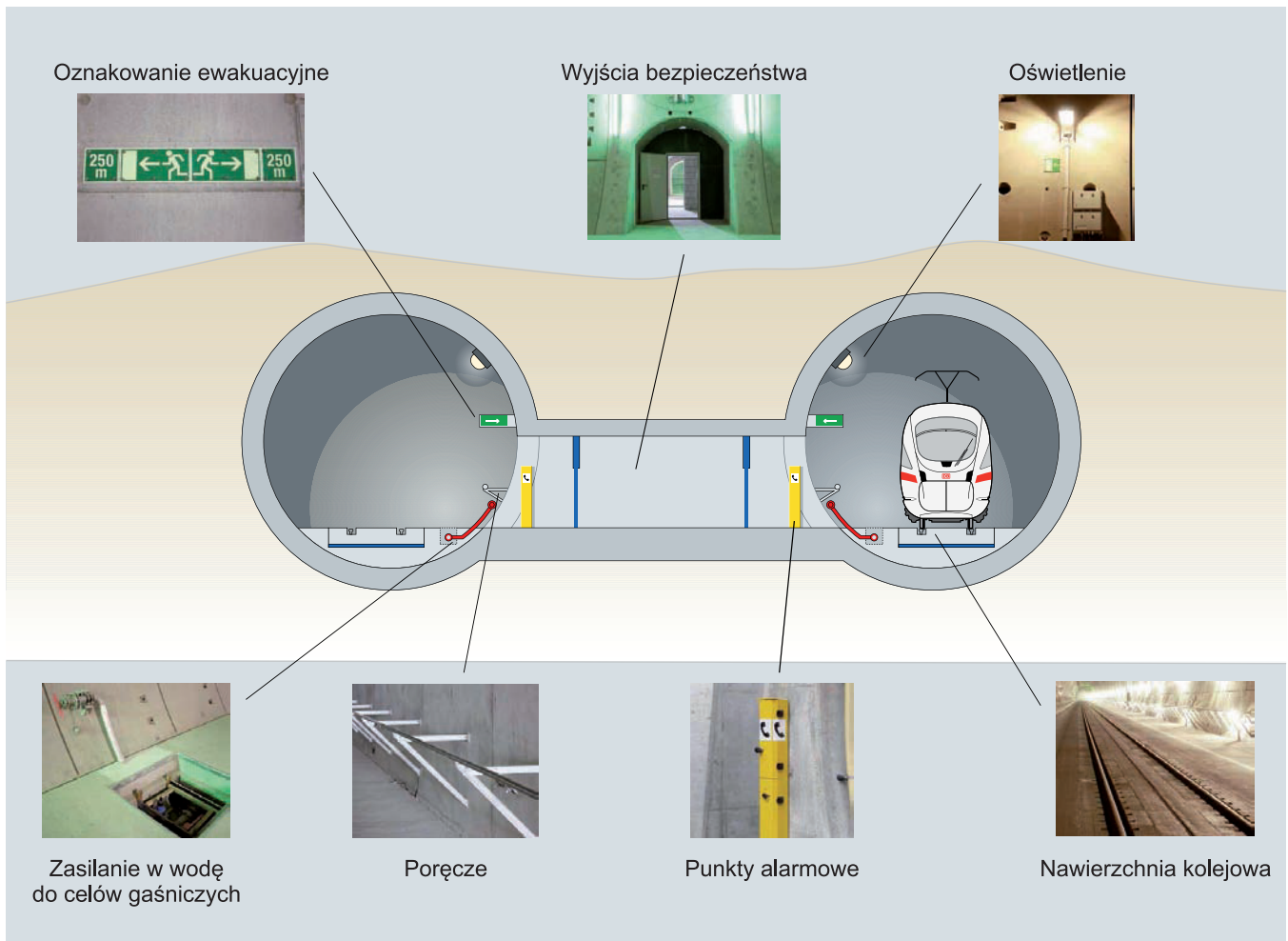
Zgodnie z wymaganiami TSI SRT [7], w tunelach muszą być wybudowane chodniki ewakuacyjne umożliwiające ewakuację pasażerów oraz personelu znajdującego się w tunelu, a także obszar bezpieczny, którego powierzchnia musi odpowiadać maksymalnej pojemności pociągów eksploatowanych na linii, na której jest położony tunel i musi być dostępny zarówno dla osób, które podjęły samodzielną ewakuację z pociągu, jak i dla służb ratowniczych. Ponadto, należy utworzyć odpowiednio wyposażone miejsca ewakuacji i ratownictwa przed wjazdem do tunelu i za wyjazdem z każdego tunelu o długości > 1 km oraz wewnątrz tunelu, zgodnie z kategorią taboru przewidzianego do eksploatacji.

W celu zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa, tunele muszą również spełniać wymagania w zakresie oznakowania dróg ewakuacyjnych, oświetlenia awaryjnego, łączności awaryjnej, zasilania w energię elektryczną oraz w wodę na potrzeby służb ratowniczych (rys. 1). Pomieszczenia techniczne muszą być zabezpieczone przed dostępem osób nieupoważnionych oraz być wyposażone w system wykrywania ognia w celu ostrzeżenia zarządcy infrastruktury (np. przez instalację wykrywania i sygnalizacji pożaru).

#### 4. Tabor

Tabor przejeżdżający przez tunel powinien spełniać wymagania dotyczące:

- środków zapobiegania pożarom uwzględniających następujące wymagania:
  - właściwości ogniowe materiałów i elementów łącznie z pokładowymi urządzeniami sterowniczymi,
  - środków specjalnych dotyczących płynów łatwopalnych,
  - wykrywania zagrzanego łożyska osi;
- środków wykrywania i gaszenia pożaru obejmujących wymagania dla:
  - gaśnic przenośnych,
  - systemów wykrywania ognia (automatycznych systemów gaśniczych dla jednostek ładunkowych z silnikiem Diesla, systemów zwalczania i kontroli nad ogniem dla lokomotyw towarowych oraz towarowych członów napędnych);



Rys. 1. Przykład przekroju tuneli jednotorowych wraz z przejściem poprzecznym; opracowano na podstawie [1]

- sytuacji awaryjnych dotyczących:
  - systemu oświetlenia awaryjnego w pociągach,
  - systemu kontroli dymu,
  - urządzeń alarmowych i środków łączności dla pasażerów,
  - zdolności do ruchu z pożarem na pokładzie,
  - ewakuacji (pasażerów i maszynisty),
  - możliwości przerwania przez maszynistę samoczynnego hamowania zainicjowanego przez pasażera w czasie przejazdu przez tunel.
- utrzymywania infrastruktury kolejowej w stanie zapewniającym bezpieczny ruch kolejowy, w tym nadzór nad funkcjonowaniem:
  - urządzeń sterowania ruchem kolejowym,
  - przytorowych urządzeń kontroli bezpiecznej jazdy pociągów;
- zarządzania nieruchomościami będącymi elementem infrastruktury kolejowej;
- budowy, rozwoju i modernizacji sieci kolejowej.

Ponadto, pojazdy poruszające się z prędkością  $\geq 200$  km/h powinny spełniać wymagania w zakresie szczelności ciśnieniowej [6].

## 5. Zarządzanie tunelem

Zarządca tunelu zobowiązany jest przestrzegać wymagań UTK w zakresie zarządzania tunelową infrastrukturą kolejową, a w szczególności:

- prowadzenia ruchu kolejowego;

## 6. Podsumowanie

Według danych światowych tunele stanowią około 7% rynku budownictwa infrastrukturalnego. W Europie, tunele metra stanowią 35% ogólnej wartości kontraktów tunelowych, tunele kolejowe 29%, a tunele drogowe 30% [8]. Polska nie należy do krajów będących w czołówce budującej tunele, co w dużej mierze wynika z ukształtowania terenu. Jednak konieczność dostosowania przepustowości komunikacyjnej do szybko rosnących potrzeb związanych z transportem towarów oraz przemieszczania się pasażerów wymusza

również u nas budowę tuneli kolejowych, w tym dla kolei dużych prędkości, co w najbliższych latach będzie stanowić duże wyzwanie dla jednostek je realizujących.

## Bibliografia

1. ITA-COSUF Regulations, Guidelines and Best Practice – “Current practice on cross-passage design to support safety in rail and metro tunnels”.
2. PN-EN 1990: Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji.
3. PN-EN 14067-5+A1:2011: Kolejnictwo. Aerodynamika. Część 5: Wymagania i procedury badań oddziaływań aerodynamicznych w tunelach.
4. Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2016/364 z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie klasyfikacji reakcji na ogień wyrobów budowlanych na podstawie Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 (Dz.U. L.68 z 15.3.2016).
5. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej (Dz.U. UE. L.2014.356.1).
6. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej (Dz.U. UE. L.2014.356.228).
7. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1303/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie aspektu „Bezpieczeństwo w tunelach kolejowych” systemu kolei w Unii Europejskiej (Dz.U. UE. L. 2014.356.394).
8. Siemińska-Lewandowska A.: *Miejskie inwestycje tunelowe w Polsce*, Budownictwo, lipiec – wrzesień 2019 r.
9. Tajduś A., Cała M., Tajduś K.: *Geomechanika w budownictwie podziemnym i tunelowaniu, Projektowanie i budowa tuneli*. Wydawnictwa AGH, 2012.

*Opracowano na podstawie pracy pt: Standardy Techniczne – Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – Wytyczne projektowania. Tom III.2 Tunele; autorzy: Jolanta Maria Radziszewska-Wolińska; Adrian Kaźmierczak; Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji Instytutu Kolejnictwa, lipiec 2021.*