



Budowa II linii metra w Warszawie, fot. NBI

Tunele – współczesne potrzeby cywilizacyjne i technologiczne możliwości ich zaspokojenia



■ **dr hab. inż. Piotr Czaja, prof. AGH**, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Od najdawniejszych czasów tajemnicze lochy i tunele zwiększały poziom obronności osad ludzkich. Według przekazów historycznych, pierwszy tunel zbudowali Babilończycy pod rzeką Eufrat wyłącznie dla celów obronnych. Zastosowali jedyną możliwą wtedy metodę, tzw. odkrywkową, polegającą na okresowej zmianie koryta rzeki, wykonaniu wykopu w jej dnie i zbudowaniu ceglanej kamiennej obudowy murew przykrytej i uszczelnionej iłem.

Pierwszym tunelem transportowym jest kolejowy transalpejski tunel Mont-Cenis w Alpach francuskich o długości 13,7 km, ukończony już w 1871 r. Przy jego budowie zastosowano mechaniczne wiercenie otworów strzałowych.

Poza klasycznym przeznaczeniem tuneli do celów transportowych – tunele drogowe i kolejowe – funkcja tuneli została rozszerzona na wiele innych dziedzin życia człowieka, takich jak np. cele obronne, zaopatrzenie w wodę aglomeracji miejskich, odprowadzanie ścieków, podziemna uprawa roślin, potrzeby laborato-

riów badawczych z zakresu fizyki jądrowej (akceleratory w USA czy w Szwajcarii), magazyny, parkingi itp. Niektóre tunele wybudowano wyłącznie dla podniesienia bezpieczeństwa podróżowania w terenie górzystym. Przykładowo, już w 1779 r. we Włoszech zbudowano tunel San Nicola o długości 177 m, którego głównym przeznaczeniem była ochrona linii kolejowej przed lawinami śnieżnymi i kamiennymi. Dziesiątki tuneli lub tzw. półtuneli konstruowano w podobnym celu w Japonii, gdzie drogi i linie kolejowe są „przyklejone” do stromych zboczy gór. W 1987 r.

[4] w Szwajcarii postanowiono wybudować 365-metrowy tunel w miejscu, gdzie na odcinku górskiej drogi prowadzącej do wsi Isenthal dochodziło często do wypadków spowodowanych opadaniem kamieni. Najpoważniejszym jednak powodem budowy tuneli jest w obecnych czasach usprawnienie komunikacji i skrócenie czasu podróżowania. I tak, tunele pod Alpami połączyły Włochy z Francją, Szwajcarią, Austrią. Japoński tunel Seikan pozwolił na skrócenie czasu podróży kolejną z Sapporo, największego miasta na wyspie Hokkaido, do położonego na wyspie Honsiu Tokio

Tab. 3. Polskie tunele drogowe [2]

Lp.	Tunele drogowe – metro	Długość [m]	Rok otwarcia
1.	Metro warszawskie	23 100	1995/2008
2.	Warszawa – tunel Wistostrada	930	2003
3.	Tunel pod rondem gen. Jerzego Ziętka w Katowicach	657	2006
4.	Tunel im. św. Rafała Kalinowskiego	230	2007
5.	Tunel Krakowskiego Szybkiego Tramwaju	1538	2008
6.	Tunel w Lalikach pod Sobczakową Grapą	678	2010

Częściej w budownictwie komunikacyjnym pojawia się zapotrzebowanie na tunele w obrębie aglomeracji miejskich. Korkujące się trakty komunikacyjne wskazują na duże potrzeby w tym zakresie, podobnie jak na rozwiązania szybkiej komunikacji zbiorowej przez budowę szybkiego tramwaju czy sieci metra. Analizując jednak plany budownictwa tunelowego zamieszczone w pracy [2], w najbliższych latach budować się będzie wiele tuneli drogowych – autostradowych – jako przeprawy pod wniesieniami oraz obwodnice wielkich miast.

2. Korzyści z budowy tuneli

Wyższy koszt budowy tunelu w porównaniu do krętej drogi jest często argumentem przemawiającym przeciw jego budowie. Wydaje się, że w dyskusjach o kosztach budowy tunelu i porównywanie ich z kosztami budowy dróg na powierzchni nie uwzględnia się niektórych istotnych czynników. Do argumentów za wyborem tuneli należy dodać takie, jak: brak potrzeby wykupywania działek, tym samym nie jest potrzebna zgoda właścicieli gruntu, brak problemów z zimowym utrzymaniem dróg górskich, bezpieczeństwo lawinowe i wobec opadających skał, mniejsze zużycie energii przez pojazdy poruszające się po drodze płaskiej względem energii zużywanej przy jeździe w górzystym terenie. Ponadto wspinanie się pojazdu na szczyt drogowej przeprawy górskiej wymaga dużej ilości energii, która przy zjeździe z góry nie jest odzyskiwana, a wręcz przeciwnie – dalej zużywana na hamowanie. W dalszej perspektywie to oszczędność ton paliwa, a z nim wiąże się poprawa ochrony środowiska, możliwość ujęcia i utylizacji spalin w tunelu.

W kwestii swobody inwestowania w tunele ostatnio pojawiły się przeszkody w postaci żądań wnoszonych przez właścicieli gruntów i samorządy polegających na obciążaniu użytkownika podziemnych

wyrobisk podatkami, np. od nieruchomości. Wyrok Trybunału Konstytucyjnego z 13 września 2011 roku [16] odrzucający prawo samorządów do pobierania takich opłat powinien zakończyć ten bezsensowny spór.

Poważnym ograniczeniem wszelkich tego typu inwestycji jest obciążanie inwestora bardzo wysokimi kosztami wykonywania analiz oddziaływania budowli podziemnej na środowisko. Przykładowo, w górnictwie odkrywkowym często koszt sporządzania raportów oddziaływania na olbrzymie obszary w dużym stopniu osłabia ekonomiczny sens inwestycji.

Po groźnych pożarach w tunelach alpejskich pojawiły się liczne głosy, że tunele, zwłaszcza drogowe, są zbyt niebezpieczne dla ruchu samochodowego. Zarzut ten można jednak łatwo obalić, prezentując najnowsze osiągnięcia i trendy w światowym budownictwie tunelowym, chociażby budowę odpowiednio przygotowanych tuneli serwisowych.

Ostatni wypadek belgijskiego autokaru z dziećmi w tunelu w Szwajcarii (28 ofiar śmiertelnych) może zwrócić uwagę projektantów tuneli. Zarzut, że w tunelu nie powinno być zatoki zakończonej murem prostopadłym do osi jezdni, jest sztuczny. Podobnie rozumując, można by dojść do wniosku, że przy drodze nie może być ani drzew ani żadnego wiaduktu.

Trend w rozwoju komunikacji z wykorzystaniem tuneli drogowych, kolejowych i transportu miejskiego bardzo dobrze obrazuje sytuacja w Niemczech, gdzie utrzymuje się w miarę stałe tempo budowy tuneli. Przykładowo, w latach 1996, 1997 i 1998 [3] wybudowano łącznie odpowiednio 172, 174 i 203 km tuneli o łącznej rocznej objętości urobionych skał odpowiednio 13,7, 16,6, 19,3 mln m³. W 1999 r. rozpoczęto budowę kolejnych tuneli, których łączna długość wyniesie 362 km [3].

Generalnie, światowe osiągnięcia w budownictwie tunelowym w ostatnich latach są rewelacyjne i potwierdzają opłacalność nawet tych najtrudniejszych i jeszcze do niedawna niewyobrażalnych przedsięwzięć technicznych.

3. Światowy postęp w technologii budowy tuneli

Spśród bardzo wielu czynników decydujących o niezwykle wysokim poziomie techniki tunelowej do niewątpliwych osiągnięć ostatnich dekad zaliczyć należy:

- rozwój maszyn i technologii do urabiania skał tak słabych, jak i bardzo ciężkich oraz sprzętu mechanicznego do załadunku i transportu urobionej skały,

- rozwój techniki strzelniczej, w tym nowych materiałów wybuchowych oraz metod mechanicznego transportu i załadunku do otworów strzałowych, a także nieelektrycznej i elektronicznej inicjacji wybuchu,

- postęp w budowie kombajnów tunelowych TBM, zarówno pod względem trwałości, niezawodności działania, jak również precyzji sterowania i kontroli procesu drążenia tunelu,

- rozwój obudowy żelbetowej prefabrykowanej (segmentowej) pozwalającej na pełną mechanizację jej wznoszenia,

- rozwój obudowy betonowej monolitycznej wynikający z postępu w technologii betonu pozwalającego na uzyskiwanie tworzyw o bardzo wysokich wytrzymałościach, ze szczególnym uwzględnieniem betonów pompowanych i samozagęszczalnych,

- postęp w technologii deskowania dla robót betonowych, w szczególności rozwój systemów deskowania powtarzalnego, przekładanego lub przesuwanego,
- rozwój środków, sprzętu i technologii do wykonywania betonów natryskowych,

- postęp w rozwoju materiałów i technologii iniekcyjnych, poprawiających właściwości skał słabych i wodoprzepuszczalnych,

- bardzo wysoki poziom techniki geodezyjnej i sprzętu do obsługi geodezyjnej budowy tuneli.

Współczesne metody budowy tuneli można podzielić na cztery grupy: metoda górnicza podziemna, metoda górnicza odkrywkowa, metoda mechaniczna za pomocą tarcz TBM, metoda zatapiania tuneli.

We wszystkich metodach zasadniczą przeszkodą w łatwym prowadzeniu robót są skutki grawitacji, sprawiające, że najdrobniejszy element skały odspojony od calizny dąży do wypełnienia przestrzeni przygotowanej dla tunelu. Wielką niewiadomą dla budowniczych tuneli jest skała ze swoimi geomechanicznymi właściwościami. Ta dobra to skała twarda, choć trudno urabialna, ale zdolna przenieść zwiększone naprężenia, gwarantując stateczność wyrobiska. Skała słaba, łatwo urabialna, nie jest zdolna do przeniesienia dodatkowego obciążenia, łatwo się odkształca, przez co jest bardzo poważnym utrudnieniem w budowie wyrobiska podziemnego. Tunel jako wyrobisko wielkogabarytowe jest bardzo trudny w wykonaniu ze względu na znaczne ciśnienia występujące w górotworze rejestrowanym na konturze wyłomu. Stan

naprężenia i odkształcenia w obudowie tunelu o kształcie kołowym może być rozwiązany za pomocą zagadnienia Lamé ze wszystkimi późniejszymi modyfikacjami istotnymi w zagadnieniach budownictwa podziemnego. Na znacznej głębokości stan ten jest zbliżony do stanu naprężenia i odkształcenia w obudowie szybu. Dla zadanego ciśnienia pierwotnego skał w określonym maszywie wielkość obciążenia obudowy najłatwiej zobrazować wymaganą grubością obudowy betonowej szybu o przekroju kołowym. Rośnie ona liniowo ze wzrostem jego średnicy i z kwadratem panującego na danej głębokości ciśnieniem skał, zgodnie z wzorem:

$$d = a \left(\sqrt{\frac{f_{cd}^*}{f_{cd}^* - mp \sqrt{3}}} - 1 \right)$$

gdzie:

d – grubość obudowy betonowej szybu o przekroju kołowym, m,

a – promień wyrobiska kołowego (szybu), m,

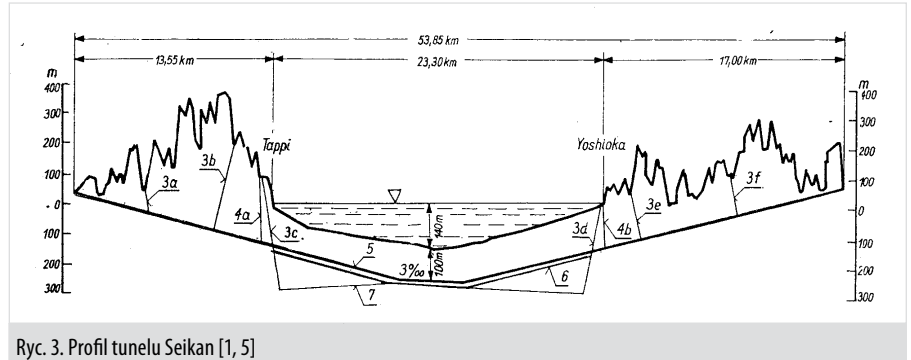
f_{cd}^* – wytrzymałość obliczeniowa betonu wg PN-B-03264: 2002, MPa,

m – współczynnik korekcyjny stosowany w budownictwie szybowym,

p – ciśnienie obliczeniowe na obudowę betonową szybu, MPa.

Zależność grubości obudowy od średnicy wyrobiska kołowego (szybu) i wielkości ciśnienia obrazują wykresy na rycinie 2.

Wdrożenie nowych technologii ma istotny wpływ na tempo budowy tunelu, ale jednocześnie jest ono bardzo silnie uzależnione od warunków geologicznych. Zagadnienie to można zobrazować na przykładzie budowy następujących dwóch obiektów: tunelu Seikan [1] i Eurotunelu [7, 8]. Ich długości są porównywalne, funkcje również. Tunel Seikan, wykonany jako tunel pojedynczy, budowano w latach 1964–1988, tj. przeszło 24 lata, natomiast Eurotunel, składający się z dwóch tuneli komunikacyjnych, budowano w latach



Ryc. 3. Profil tunelu Seikan [1, 5]

1987–1994, czyli tylko siedem lat. Na zastosowaną metodę drążenia tuneli zasadniczy wpływ miały warunki geologiczne, hydrogeologiczne i ówczesny stan techniki tunelowej. W japońskim tunelu masyw skalny cechował się wysoką wytrzymałością, ale był mocno spękany i zawodniony. Nie zdecydowano się wtedy na próbę stosowania kombajnów tunelowych pełno-przekrojowych, będących w początkowej fazie rozwoju. Kombajny takie, w produkcji których obecnie właśnie Japonia jest jednym z liderów na światowym rynku, z powodzeniem zastosowano przy budowie Eurotunelu czy przy drążeniu wielu innych tuneli, jak Gotthard Base Tunnel [12] czy metro w Szanghaju w Chinach [9, 10].

W klasycznej metodzie górniczej zasadniczym problemem jest utrzymanie wyrobiska o dużym przekroju do czasu wykonywania obudowy ostatecznej. W większości przypadków wymagana jest obudowa wstępna lub tymczasowa, realizowana na wiele sposobów. Wraz z rozwojem budownictwa tunelowego w wielu krajach wypracowano różne sposoby dzielenia całego przekroju tunelu na segmenty pozwalające etapowo wykonać obudowę ostateczną, co odróżnia od siebie poszczególne metody drążenia nazwane od nazw państw, w których je stosowano. I tak, w literaturze spotkamy metody austriacką, belgijską, niemiecką, norweską lub tzw. nową austriacką.

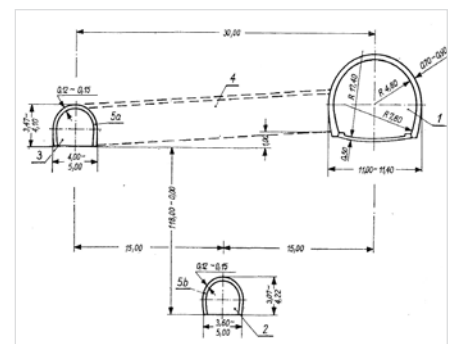
Efekty zastosowania różnych technologii drążenia tuneli zilustrowane zostaną

w kolejnym rozdziale na przykładzie metody niemieckiej zastosowanej przy budowie tunelu Seikan oraz trzech przykładów technologii TBM zastosowanych przy budowie Eurotunelu, tuneli dla metra w Szanghaju i tunelu Gotthard Base.

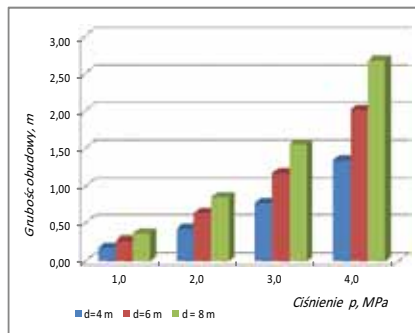
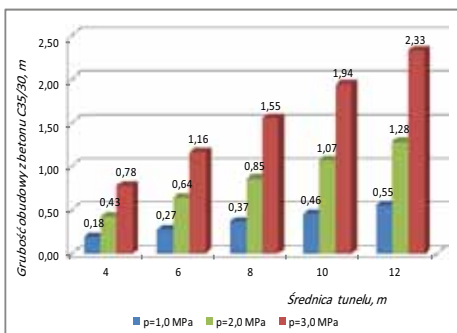
4. Analiza dwóch technologii drążenia tuneli

4.1. Niemiecka metoda drążenia tunelu na przykładzie budowy japońskiego tunelu Seikan [1, 5]

Tunel Seikan łączący dwie główne japońskie wyspy Honsiu i Hokkaido pod dnem cieśniny Tsugaru, można bez wahania zaliczyć do najbardziej śmiałych i odważnych inwestycji komunikacyjnych drugiej połowy XX w. Główny tunel tej podmorskiej przeprawy o długości 53 850 m ma w przekroju powierzchnię równą 70 m² i zapewnia obecnie dwutorowy ruch superszybkich japońskich pociągów Shinkansen. Obiekt dźierży miano najdłuższego podmorskiego tunelu kolejowego. Jego geometrię i usytuowanie pokazano na przekroju przez cieśninę Tsugaru (ryc. 3), natomiast przekrój przez tunele ukazujący schemat rozmieszczenia wszystkich wyrobisk przedstawiono na rycinie 4.



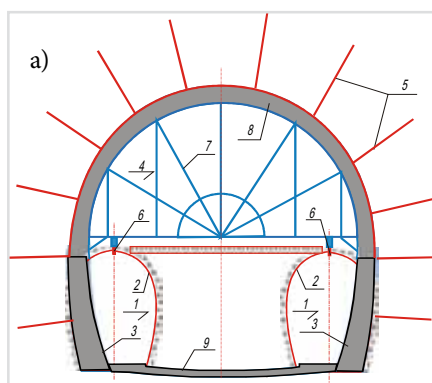
Ryc. 4. Przekrój poprzeczny przez obiekty tunelu Seikan [1, 11]: 1 – tunel główny, 2 – tunel pilotująco-odwadniająca, 3 – tunel pomocniczy (serwisowy), 4 – wyrobiska łączące tunel główny z tunelem pomocniczym co 600 m



Ryc. 2. Zależność grubości obudowy od średnicy wyrobiska kołowego (szybu) i wielkości ciśnienia na obudowę: a) grubość obudowy w funkcji średnicy szybu, b) grubość obudowy w funkcji ciśnienia

Zarys technologii wykonania tunelu głównego można zilustrować przekrojem przedstawionym na rycinie 5a. W pierwszej kolejności przy spągu wykonywano

równoległe dwa wyrobiska spągowo-ociosowe (1) w obudowie stalowej dwudzielnej (2), o przekroju pozwalającym na wykonanie spągowej części betonowej obudowy ostatecznej (3). W odległości ok. 15–20 m za czołem przodków wyrobisk spągowo-ociosowych urabiano i wybierano stopniowo skały zalegające w stropowej części tunelu (4), zabezpieczając wyłom stalowo-kotwową obudową wstępną (5). Pod osłoną tej obudowy na zwieńczeniu obudowy wyrobisk spągowo-ociosowych montowano szyny jezdne (6) odeskowania przesuwnego (7). Następnie wykonano żelbetową obudowę kaloty tunelu (8), uzyskując ostatecznie docelowy kształt budowli. Po usunięciu reszty skał z pasa oddzielającego wyrobiska spągowo-ociosowe zdemontowano wewnętrzne łuki obudowy tymczasowej, obcinając równocześnie wystające z obudowy betonowej resztki łuków ociosowych. Na zakończenie profilowano i betonowano spąg (9).



Ryc. 5. Technologia drążenia tunelu Seikan: a) schemat obrazujący technologię wykonania tunelu (opracowanie własne), b) widok przodka tunelu [13]: 1 – wyrobiska spągowo-ociosowe wyprzedzające, 2 – obudowa stalowa tymczasowa wyrobisk spągowo-ociosowych, 3 – przyspągowa obudowa ostateczna ociosów, 4 – wyrobisko kaloty, 5 – stalowo-kotwowa obudowa wstępna kaloty, 6 – szyny jezdne pod deskowanie przesuwno, 7 – rama deskowania przesuwnego, 8 – obudowa ostateczna kaloty, 9 – obudowa spągu

Jednym z większych wyzwań tej budowy było zagrożenie wodne. Związęte, lecz mocno popękane skały budujące górotwór nie gwarantowały szczelności, za-

tem musiały być starannie uszczelnione przez iniekcję wyprzedzającą. Technologia oraz środki iniekcyjne z lat 70. XX w. były bardzo nowoczesne i skuteczne. Już wtedy Japończycy posiadali iniektory mineralne zaprezentowane w tabeli 4, charakteryzujące się bardzo krótkim czasem żelowania i nadzwyczaj dużą szczelnością.

Tab. 4. Cechy zaczynów cementowych do iniekcji w tunelu Seikan [1, 5]

Zaczyn cementowy		Stosunek mieszaniny szkło wodne zaczyn cementowy	Czas żelowania min/s	Wytrzymałość na ściskanie MPa
Typ cementu	W/C			
Wielkopieczowy koloidalny cement żużlowy	100	1,0	1–31	7,8
	150	1,0	2–27	2,2
	200	1,0	3–40	1,3

Obecnie do prac iniekcyjnych w masywie skalnym oprócz zaczynów cementowych oferowany jest olbrzymi arsenał środków chemicznych europejskich i pozaeuropejskich producentów. Podobnie bardzo bogata jest oferta w odniesieniu do maszyn (wiertnic i pomp) do wykonania prac iniekcyjnych. Jedynym hamulcem w szerokim ich stosowaniu są znaczne koszty oraz obawa o stan środowiska podziemnego, zwłaszcza wodnego.

Oddany w 1988 r. tunel Seikan był wtedy nie lada osiągnięciem technicznym, mimo iż budowano go aż 24 lata. Kilka lat później budownictwo tunelowe opanowały systemy tarcz zmechanizowanych zwane TBM (Tunneling Boring Machines), których możliwości technicznie znacznie przewyższają wspaniałe rezultaty uzyskane przy budowie tunelu Seikan.

4.2. Metody TBM w budownictwie tunelowym

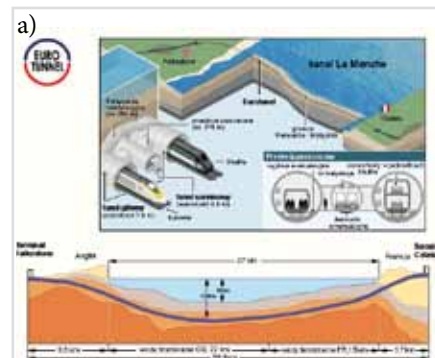
Zagadnieniu mechanizacji budownictwa tunelowego poświęca się obecnie bardzo dużo uwagi. Znaczna część trudności zaprezentowanych na przykładzie tunelu Seikan przy zastosowaniu technologii TBM praktycznie przestaje mieć znaczenie. Głównym kryterium zastosowania tarcz zmechanizowanych jest długość tunelu oraz dostępne środki na jego budowę.

Przykładem wspaniałych rezultatów przy zastosowaniu technologii TBM mogą być trzy przykładowe realizacje: Eurotunelu (1987–1994), metra w Szanghaju (1992–2012) i tunelu Gotthard Base (2003–2016).

4.2.1. Eurotunel

Tunel łączący Wielką Brytanię z Francją pod kanałem La Manche jest realizacją marzeń i planów snutych od czasów

Napoleona Bonapartego. Jego budowa została podjęta w momencie, gdy technika tunelowa na świecie osiągnęła poziom szczytowy. Pomimo że cały tunel jest nieco krótszy od japońskiego Seikan, jego trasa podwodna jest najdłuższa na świecie i wynosi 38 km. Tunel wykonany jest w skrajnie korzystnych warunkach górniczo-geologicznych. Topografię i przekrój przez tunel prezentuje rycina 6a, b [7, 8].



Ryc. 6. Podstawowe parametry techniczne Eurotunelu [7, 8]: projekt tunelu, b) portal wlotowy tunelu [8]

Doskonałe warunki geologiczne na trasie, tzn. łatwo urabialna formacja kredowa oraz wodoszczelne i mechanicznie wytrzymałe skały nadległe pozwoliły na wykonanie tunelu za pomocą tarcz TBM.

Podstawowe parametry techniczno-projektowe Eurotunelu, który stanowią dwa tunele przewozowe i jeden tunel serwisowy:

- okres projektowania: 1972–1975,
- średnica tunelu przewozowego: 7,60 m,
- długość każdej nitki tunelu: 50 km,
- głębokość posadowienia względem dna kanału: 40–75 m,
- długość tunelu pod wodą: 38 km,
- okres realizacji robót górniczych: trzy lata (od 1 grudnia 1987 r. do 1 grudnia 1990 r.),
- data oddania tunelu do eksploatacji: 6 maja 1994 r.

Parametry komunikacyjne tunelu:

- szybkość pociągu: 160 km/h,
- czas przejazdu pociągu (z terminalu na terminal): 35 min,

Tab. 5. Charakterystyka tunelu Gotthard Base [12]

Parametry tunelu	
Liczba pojedynczych tuneli	2
Długość tunelu zachodniego	56,978 km
Długość tunelu wschodniego	57,091 km
Średnia odległość między tunelami	40 m
Całkowita długość wszystkich wyrobisk podziemnych stanowiących tunel	151,84 km
Średnica każdego pojedynczego tunelu	8,83–9,58 m
Odległość pomiędzy tunelami łączącymi tunele główne	ok. 325 m
Liczba tuneli łączących	176
Maksymalna grubość skał nadległych (głębokość tunelu względem powierzchni)	2500 m
Kalendarz prac przy budowie tunelu	
Rozpoczęcie prac – wiercenia badawcze	1993
Prace przygotowawcze	1996
Drażenie mechaniczne	2003
Zakończenie drażenia	2012
Planowane zakończenie prac montażowych	2016
Objętość urobionych skał	28,2 mln t, tj. 13,3 mln m ³
Całkowity koszt budowy tunelu	10,1 mld USD
Projektowana przepustowość tunelu	200–250 pociągów na dobę
Długość tuneli wydrążona za pomocą tarczy TBM	ok. 66,3 km (43,7%)
Długość tuneli wydrążona za pomocą robót strzałowych	ok. 90 km dla dwóch tuneli
Maksymalna temperatura skał in situ	ok. 50 °C
Maksymalna temperatura w miejscu pracy ludzi	28 °C
Liczba zatrudnionych przy budowie pracowników	2600 osób
Parametry zastosowanych TBM	
Liczba zastosowanych TBM	4 (dwie od strony północnej, z miejscowości Bodio w kierunku Faido (firmy Herrenknecht Gripper TBM S-210 „Sissi” oraz S-211 „Heidi”), dwie od strony południowej, z miejscowości Erstfeld w kierunku Sedrun (S-229 „Gabi I” i S-230 „Gabi II”)
Całkowita długość TBM	440 m (wraz z wyposażeniem zaplecza)
Całkowity ciężar jednej tarczy TBM	3000 t
Moc zainstalowana w jednej tarczy	5 MW
Siła nacisku tarczy na skałę	27 500 kN
Prędkość obrotowa tarczy	6 obr./min

- składy pociągów Le'Shuttle (promy) przeznaczone do obsługi ruchu osobowego między Folkestone i Calais zabierają 120 samochodów osobowych i 12 autokarów; przez tunel przejeżdżają też składy towarowe z tirami oraz pociągi o zmiennym składzie kursujące między Paryżem, Brukselą i Londynem,
- niezależnie od warunków pogodowych tunel otwarty jest przez 24 godziny na dobę i przez 52 tygodnie w roku,
- tunel w kanale jest najdłuższym tunelem podmorskim na świecie.

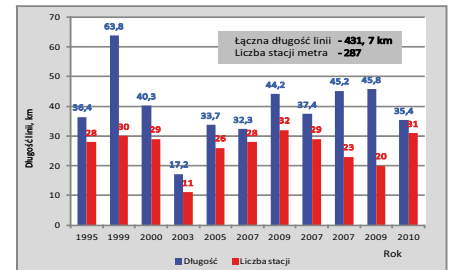
4.2.2. Metro w Szanghaju

Współczesna gospodarka Chin sokuje i zachwyca niezwykłym rozmachem i tempem realizacji wybranych przedsięwzięć. Igrzyska olimpijskie w 2008 r. potwierdziły techniczne możliwości Chińczyków w dziedzinie rozbudowy infrastruktury sportowej i turystycznej.

Dwa lata po olimpiadzie Szanghaj był gospodarzem światowej wystawy Expo, gdzie również poczyniono wielkie inwestycje służące temu światowemu wydarzeniu najwyższej rangi. Dzisiaj zarówno pekiński kompleks olimpijski ze słynnym stadionem „Ptasie Gniazdo”, jak i Centrum Wystawowe Expo są celem milionowych rzeszy chińskich turystów.

Jeszcze w 1990 r. Szanghaj, określany jako centrum gospodarcze Wschodu, był gigantem z kolosalnymi transportowymi kłopotami w obrębie samej metropolii. Światowe budownictwo tunelowe nie zna przypadku, aby w niespełna 20 lat zbudować system transportowy wysuwający się na pierwsze miejsce pod względem długości linii kolei podziemnej. Londyn, Paryż czy Moskwa budowały te systemy przez dziesiątki, a nawet setki lat. W Szanghaju w ciągu 19 lat zbudowano

434 km linii i 278 stacji zdolnych do przewiezienia milionów pasażerów dziennie [9]. Rekordowy wynik uzyskano 22 października 2010 r., przewożąc 7,548 mln pasażerów. Roczny rekord to 2,1 mld pasażerów [9]. Tempo rozbudowy metra pokazano na rycinie 7, natomiast widok przykładowych podziemnych stacji za [9] zaprezentowano na rycinie 8.



Ryc. 7. Tempo rozbudowy metra w Szanghaju (opracowanie własne na podstawie [9, 10])



Ryc. 8. Podziemna infrastruktura metra w Szanghaju [9, 10]

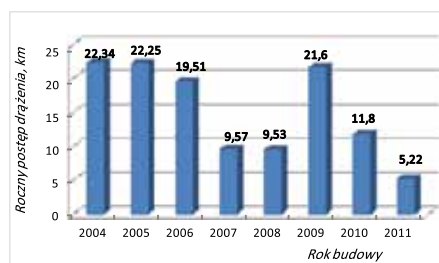
Całe metro wykonano przy użyciu 15 zmechanizowanych tarcz tunelowych TBM, osiągając fantastyczne rezultaty. Budowa ta jest przykładem olbrzymich możliwości technologii TBM, zwłaszcza w przypadku dostępności odpowiednich środków finansowych.

4.2.3. Gotthard Base Tunnel

Jak wspomniano, w Alpach wykonano już 90 tuneli o łącznej długości ponad 720 km. W rejonie przełęczy św. Gottharda (2108 m n.p.m.) w Alpach Lepontyjskich funkcjonują już dwa tunele o angielskiej nazwie Saint Gotthard: tunel kolejowy o długości 15,1 km, otwarty w 1882 r. (Saint Gotthard Rail), oraz tunel drogowy o długości 16,9 km, oddany do użytku w 1980 r. [11] (Saint Gotthard Road).

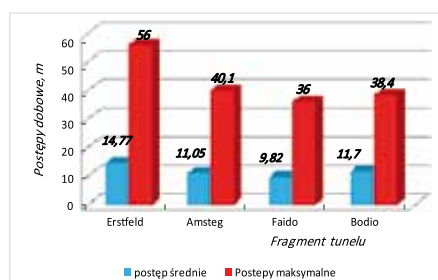
Po tragicznym pożarze 24 października 2001 r. w tunelu drogowym Saint Gotthard Road, w którym zginęło 11 osób, a wielu podróżnych zostało rannych, reputacja długich tuneli drogowych została mocno nadszarpnięta. Utwierdziło to twórców programu rozbudowy kolei szwajcarskich w przekonaniu o potrzebie rozbudowy tuneli kolejowych. Od 1993 r. trwały prace przygotowawcze do budowy najdłuższego na świecie górnego tunelu kolejowego Gotthard Base Tunnel. Tunel ten charakteryzują dane zamieszczone za [11] w tabeli 5.

Przy korzystnych warunkach geologiczno-geologicznych dla zastosowanych czterech kombajnów TBM firmy Herrenknecht uzyskano absolutnie rekordowe wyniki, które zaprezentowano za [12] na rycinie 9.



Ryc. 9. Roczne postępy czterech kombajnów tunelowych TBM na budowie tunelu Gotthard Base [12]

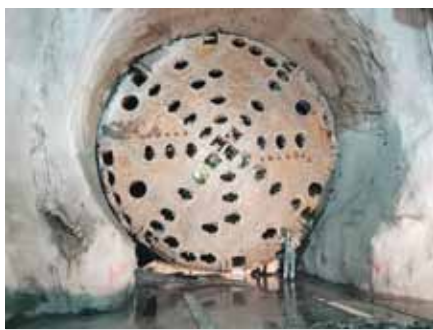
Podobnie, do rekordowych należy zaliczyć postępy dzienne, które w bardzo dobrych warunkach geologicznych osiągnęły wartość 56 m gotowego tunelu w obudowie panelowej. Postępy poszczególnych maszyn przedstawiono za [12] na rycinie 10.



Ryc. 10. Dzielne postępy tarcz TBM na budowie tunelu Gotthard Base [12]

Tunel ten jest również najnowszym potwierdzeniem potęgi współczesnej geodezji, dzięki której drążenie tuneli na tzw. zbiecie kończyło się dokładnością mierzoną w centymetrach. Precyzję zbiecia zaprezentowano na rycinie 11.

Trzy powyższe inwestycje, setki zbudowanych tuneli metodą mechaniczną w Europie i na świecie oraz bardzo bogate plany na przyszłość dowodzą, że techno-



Ryc.11. Moment zbiecia tuneli wykonywanych tarczami TBM [12]

logia ta jest konkurencyjna do klasycznej metody górniczej. Wymaga jednak bardzo wysokiej kultury technicznej we wszystkich fazach jej realizacji i we wszystkich branżach procesu inwestycyjnego, co nie zawsze jest najmocniejszą stroną wielu placów budowy.

5. Zakończenie

Osiągnięcia światowego budownictwa tunelowego można dziś prezentować bardzo szeroko. Zagadnieniu temu poświęcono tysiące publikacji w specjalistycznych czasopismach technicznych. Jesteśmy już bardzo blisko połączenia tunelami kontynentów rozdzielonych do tej pory bezmiarem wód. W Szwajcarii – królestwie tuneli – rodzi się nowa koncepcja metra ogólnopaństwowego nazwanego Swissmetro [15]. Podobnie jak teraz kolej miejska łączy dzielnice wielkich aglomeracji miejskich, będzie komunikować ważniejsze miasta tego kraju, oddalone od siebie o setki kilometrów. W częściowo spróżniowanych tunelach o średnicy 3,5 m poruszać się będą z prędkością ok. 500 km/h po poduszcze magnetycznej bezkolowej pociągi napędzane silnikami linowymi, przypominające swym wyglądem pocisk w lufie armatniej. Przejazd tym środkiem transportu na odcinku długości 104 km pomiędzy Zurychem i Bernem z obecnych 60 minut może być skrócony do 12 minut [15].

Na bazie tego pomysłu opracowywany jest też projekt Eurometra, które wyrobiskami podziemnymi, niewychodzącymi na powierzchnię, połączą metropolie europejskie, sprawiając, że kolejową podróż między Wiedniem i Paryżem można będzie skrócić z 17 do niecałych dwóch godzin.

Należy się cieszyć, że w światowych sukcesach tunelowych mają swój udział polscy inżynierowie pracujący dla obcych firm wykonawczych. Budowaliśmy tunele wodne w Niemczech. Nasi eksperci pracowali przy budowie tuneli w Hongkongu, Turcji, Włoszech, lecz w naszym kraju, tam

gdzie tunele mogłyby znacznie ułatwić komunikację, uznawano je zawsze za zbędne, zbyt kosztowne i niebezpieczne, a czasami, co zakrawa na ironię, również za obiekty niszczące środowisko naturalne.

Pierwszy w Polsce zbudowany w XXI w. tunel drogowy Laliki wykonała firma słowacka, a projekt tunelu dla drogi szybkiego ruchu S7 projektuje firma z Niemiec. Kto będzie jego wykonawcą? Warto pamiętać, że początkiem wszelkich sukcesów w tym zakresie jest dobra edukacja inżynierska.

Literatura

- [1] Barchański B., Czaja P.: *Japoński Seikan Tunnel*. „Przegląd Górniczy” 1979, nr 10.
- [2] Czaja P., Nawrat S. et al.: *Obecna sytuacja w budownictwie tunelowym w Polsce, perspektywy do 2020 roku, teraźniejszość i przyszłość w dziedzinie stosowanych obudów*. Opracowanie AGH, Kraków 2011 (mps).
- [3] Haack A.: *Tunnelling in Germany. Statistic (1998/1999). Analysis and Outlook*. „Tunnel” 1999, Jg. 18, Nr. 3.
- [4] Kübler, P., Keller C., Kalbermatter P., Bracher G.: *Monocoque construction for the Isenthal loop tunnel*. „Tunnel” 1995, Jg. 14, Nr. 2, S. 8–14.
- [5] Mochida Y.: *Construction of the Undersea Seikan Tunnel*. Tokyo 1978.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_longest_tunnels_in_the_world
- [7] <http://nautijorge.blogspot.com>
- [8] <http://wiadomosci.wp.pl> (afp. com Denis Charlet)
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai_Metro
- [10] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metro_Shanghai
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Gotthard_Road_Tunnel
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Gotthard_Base_Tunnel
- [13] <http://science.howstuffworks.com/engineering/structural/tunnel2.htm>
- [14] <http://home.no.net/lotsberg>
- [15] <http://www.swissmetro.ch/en/project>
- [16] Wyrok Trybunału Konstytucyjnego z 13 września 2011 r., sygn. akt P33/09. DzU. 2011, nr 206, poz. 1228, z 29 września 2011 r.

ARTYKUŁ OPACOWANY NA PODSTAWIE REFERATU WYGŁOSZONEGO NA KONFERENCJI AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ BUDOWNICTWO PODZIEMNE I BEZPIECZEŃSTWO W KOMUNIKACJI DROGOWEJ I INFRASTRUKTURZE MIEJSKIEJ, KRAKÓW, 19–20 KWIETNIA 2012.