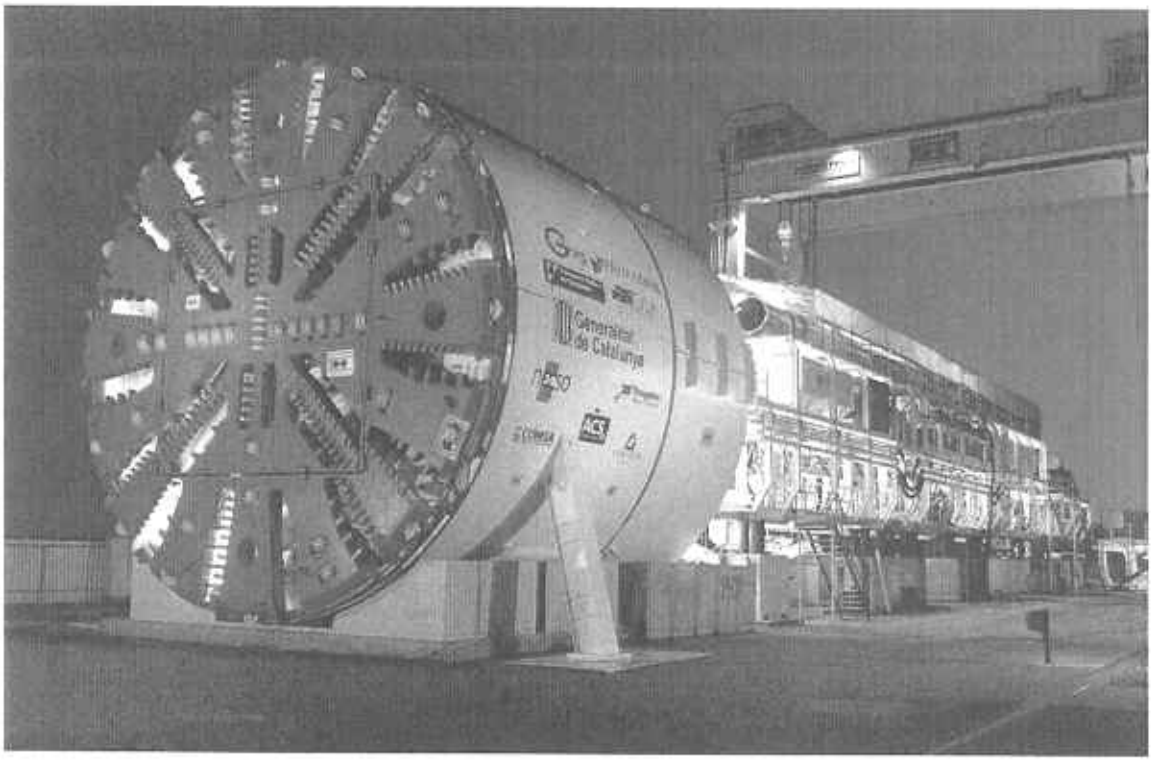
I/949.

ZASTOSOWANIE TARCZ EPB I ZAWIESINOWYCH W WARUNKACH WARSZAWSKICH

CZĘŚĆ I



OPRACOWAŁA:

DR HAB. INŻ. ANNA SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA

WARSZAWA – MAJ 2006

Spis treści

Wstęp

1. Doświadczenia światowe w stosowaniu TBM EPB i TBM zawiesinowej
2. Metro w Tuluzie – budowa linii B
   2.1 Informacje ogólne
   2.2 Warunki geologiczne
   2.3 Tunel dwutorowy drążony z zastosowaniem tarczy EPB
3. Metro w Barcelonie – budowa linii nr 9
   3.1 Informacje ogólne
   3.2 Warunki geologiczne
   3.3 Dane techniczne TBM EPB o średnicy 12 m
4. Budowa I linii metra w Sewilli
5. Budowa I linii metra w Chiraz w Iranie
6. Tunel pod Łabą w Hamburgu (Elbe 4 Rohre)
   6.1 Informacje ogólne
   6.2 Warunki geologiczne
   6.3 Drążenie tunelu
7. Tunel Lefortowo na obwodnicy Moskwy
   7.1 Informacje ogólne
   7.2 Warunki geologiczne
   7.3 Drążenie tunelu
8. Tunel Westerschelede w Holandii
9. Podsumowanie

Wstęp

Metoda tarczowa budowy tuneli jest znana od 180 lat. Po raz pierwszy tarcza została wykorzystana do budowy tunelu pod Tamizą w Londynie w 1826 roku. Od tego czasu technologia ta jest stale modernizowana, a nowoczesne tarcze zmechanizowane są urządzeniami umożliwiającymi drążenie tuneli w bardzo zróżnicowanych warunkach gruntowych, na terenach silnie zurbanizowanych, pod rzekami lub pod istniejącą zabudową. Z uwagi na uwarunkowania geologiczne i hydrogeologiczne II linii metra w Warszawie, w niniejszym opracowaniu ograniczono się do analizy zastosowań dwóch typów tarcz zmechanizowanych: tarczy zawiesinowej (Slurry Shield) oraz tarczy wyrównywanych ciśnień (Earth Pressure Balance). W dalszej części pracy stosowane będą określenia: tarcza (TBM) zawiesinowa i tarcza (TBM) EPB.

Tarcza zawiesinowa powstała i została opatentowana w 1964 roku. Jej autorem jest brytyjski inżynier J.V. Bartlett. Po raz pierwszy zastosowano ją w Europie do budowy tunelu metra pod Tamizą w Londynie. Jednocześnie trwały prace nad skonstruowaniem tarczy zawiesinowej w Niemczech i w Japonii, a prototypy znalazły zastosowanie na licznych budowach tuneli. W Japonii pierwsza tarcza zawiesinowa wystartowała w 1967 roku, a w 1978 roku pracowało tam 36 tego typu tarcz, z których największa miała średnicę 7,6 m.

Tarczę EPB zastosowano po raz pierwszy w 1976 roku w Japonii do budowy w mieście Nagoya tunelu kanalizacyjnego o średnicy 2,68 m i długości 1393 m. Prace prowadzono w trudnych warunkach gruntowych – w nawodnionych żwirach z otoczakami, 10 m poniżej poziomu terenu i jednocześnie poziomu zwierciadła wody gruntowej.

Jak widać z przytoczonych powyżej danych metoda tarcz zawiesinowych i EPB ma trzydziestoletnią historię i jest na całym świecie powszechnie wykorzystywana do budowy tuneli komunikacyjnych. Przedstawione poniżej przykłady zastosowania tych tarcz z ostatnich kilku lat dowodzą skuteczności metody i racjonalności rozwiązań.

1. Doświadczenia światowe w stosowaniu TBM EPB i TBM zawiesinowej

Poniżej zestawiono w formie tabelarycznej wybrane dane dotyczące stosowania tarcz zawiesinowej i EPB do budowy tuneli metra, kolejowych i drogowych na świecie na przestrzeni ostatnich 10 lat. Informacje usystematyzowano wg średnicy tarcz oraz ich typu. Przedstawiono 43 pozycje z zaznaczeniem stanu bieżącego inwestycji. W 90%

przypadków inwestorem są lub były władze miasta, w pozostałych 10 % odpowiednie Ministerstwa lub podmioty zarządzające infrastruktura np. kolejową. W dalszej części opracowania opisano wybrane budowy, celem szczegółowego przedstawienia zagadnień technicznych oraz możliwości zastosowania tarcz zmechanizowanych na budowie II linii metra w Warszawie.

Tablica 1. Zestawienie danych o stosowaniu TBM EPB i TBM zawiesinowej na świecie

Lp.	Miasto / Państwo	Typ tarczy	Średnica [m]	Rodzaj tunelu	Zaawansowanie
1	Barcelona / Hiszpania	EPB	12,06	metro	zakończona
2	Katzenberg / Niemcy	EPB	11,12 x 2	kolejowy	w budowie
3	Lizbona / Portugalia	EPB	9,80	metro	w budowie
4	Lizbona / Portugalia	EPB	9,80	metro	w budowie
5	Lizbona / Portugalia	EPB	9,80	przedłużenie metra	zakończona
6	Tunel Boltek / Holandia	EPB	9,75	kolejowy	zakończona
7	St. Clair River / Kanada	EPB	9,53	kolejowy	w budowie
8	Valencja / Wenezuela	EPB	9,53	metro	zakończona
9	Ateny / Grecja	EPB	9,46	metro	zakończona
10	Bolonia / Włochy	EPB	9,40	kolejowy	w budowie
11	Madryt / Hiszpania	EPB	9,33 x 2	metro	zakończona
12	Londyn / Wielka Brytania	EPB	8,13	kolejowy - Eurotunel	zakończona
13	Bosfor / Turcja	EPB	7,98	kolejowy	w budowie
14	Turyn / Włochy	EPB	7,77	metro, linia 1	w budowie
15	Tuluza / Francja	EPB	7,75	metro, linia B	zakończona

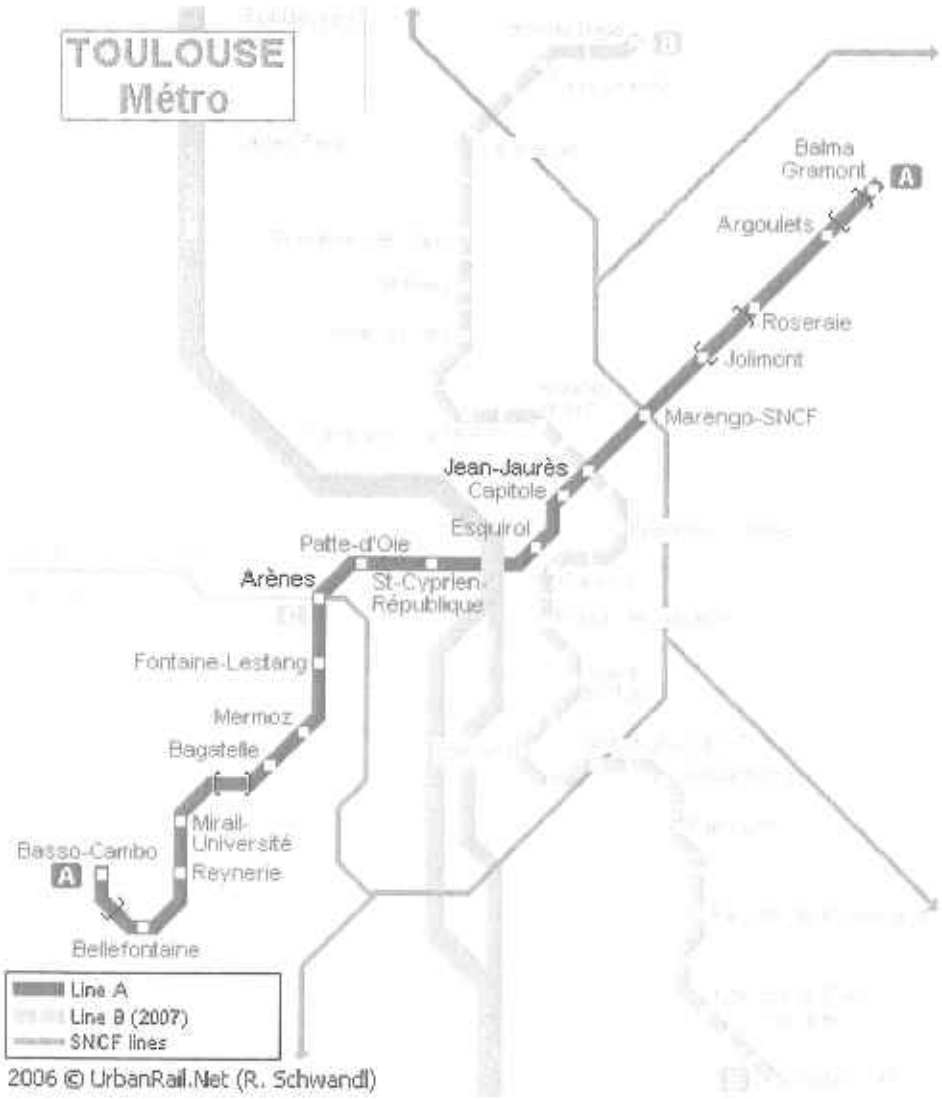
Lp.	Miasto / Państwo	Typ tarczy	Średnica [m]	Rodzaj tunelu	Zaawansowanie
16	Neapol / Włochy	EPB	6,74	metro, linia 1	w budowie
17	Edmonton / Kanada	EPB	6,53	metro	zakończona
18	Bangkok / Tajlandia	EPB	6,46	metro	zakończona
19	Nankin / Chiny	EPB	6,390 x 3	metro	zakończona
20	Moskwa / Rosja	EPB	6,15	metro	zakończona
21	Singapur / Singapur	EPB	6,15	metro	zakończona
22	Taipei / Taiwan	EPB	6,15	metro	zakończona
23	Sewilla / Hiszpania	EPB	6,05	metro, linia 1	w budowie
24	Londyn / Wielka Brytania	EPB	6,05	metro	w budowie
25	Toronto / Kanada	EPB	5,89 x 2	metro	zakończona
26	Caracas / Wenezuela	EPB	5,77	metro	zakończona
27	Kazań / Rosja	EPB	5,74	metro	w budowie
28	Caracas / Wenezuela	EPB	5,72	metro	zakończona
29	Czelabińsk / Rosja	EPB	5,64	metro	w budowie
30	Londyn / Wielka Brytania	EPB	5,13	przedłużenie metra	zakończona

Lp.	Miasto / Państwo	Typ tarczy	Średnica [m]	Rodzaj tunelu	Zaawansowanie
31	Hamburg / Niemcy	zawiesinowa	14,20	drogowy	zakończona
32	Moskwa-Lefortowo / Rosja	zawiesinowa	14,20	drogowy	zakończona
33	Moskwa-Srebrny Bór / Rosja	zawiesinowa	14,20	drogowy	zakończona
34	Paryż / Francja	zawiesinowa	11,59	drogowy, A86	zakończona
35	Westerschelde / Holandia	zawiesinowa	11,34	drogowy	zakończona
36	Sydney / Australia	zawiesinowa	10,71	metro	zakończona
37	Berlin / Niemcy	zawiesinowa	8,93 x 2	kolejowy	zakończona
38	Antwerpia / Belgia	zawiesinowa	8,27	kolejowy	zakończona
39	Londyn / Wielka Brytania	zawiesinowa	8,16 x 2	kolejowy	zakończona
40	Madryt / Hiszpania	zawiesinowa	7,32	kolejowy	zakończona
41	Wiedeń / Austria	zawiesinowa	6,80	metro	zakończona
42	Taipei / Taiwan	zawiesinowa	6,02	metro	zakończona
43	Ankara / Turcja	zawiesinowa	5,89	metro	zakończona

2. Metro w Tuluzie – budowa linii B

2.1 Informacje ogóle

I linia metra w Tuluzie (linia A) została oddana do eksploatacji w czerwcu 1993 roku. Już w lipcu 1993 zlecono prace studialne nad budową linii B. W 1999 roku opracowano studium wykonalności projektu, w maju i lipcu 2001 roku rozpoczęto budowę odcinka śródmiejskiego linii, a w grudniu 2001 odcinków peryferyjnych. Linia o przebiegu północ – południe, ma 16 km długości i 21 stacji, z których tylko jedna jest stacją przesiadkową na istniejąca linię A. Z wyjątkiem niewielkich odcinków peryferyjnych linia B przebiega w terenie silnie zurbanizowanym, a w ścisłym centrum pod budynkami zabytkowymi, wrażliwymi na osiadania.



Rys.1 Plan linii metra w Tuluzie [5]

Przewidziano, że stacje będą wykonywane w ścianach szczelinowych. Większość z tuneli to tunele dwutorowe o średnicy 6,80 m. Ich całkowita długość wynosi 11,60 km. Tunele jednotorowe o średnicy 4,66 m. mają 1,10 km długości, a na odcinkach peryferyjnych, o długości 2,6 km , przewidziano wykonanie tuneli metodą odkrywkową.

Budowę podzielono na 6 odcinków, z których każdy realizowany jest przez innych wykonawców zgrupowanych w konsorcja, które wyłoniono w drodze przetargu międzynarodowego:

Odcinek nr 1 to jedna stacja i tunel dwutorowy o długości 1074 m wykonywany metodą odkrywkową (do stacji Trois Cocus). Czas realizacji kontraktu – 25 miesięcy. Prace rozpoczęto 1 grudnia 2001 roku.

Odcinek nr 2 (północny) obejmuje 7 stacji (od szybu startowego na stacji Trois Cocus do stacji Jeanne d'Arc) i tunel dwutorowy o długości 4700 m drążony TBM EPB, specjalnie skonstruowaną na potrzeby tego projektu. Dodatkowo w kontrakcie przewidziano wykonanie 6 szybów wentylacyjnych o średnicy 6 m każdy. Czas wykonania – 47 miesięcy. Początek robót – 5 czerwca 2001 roku.

Odcinek nr 3 zawiera 1 stację przesiadkową (Jean Jaures) i dwa tunele jednotorowe o długości 1054 m drążone tarczą ze sprężonym powietrzem oraz dwa szyby startowe tarczy. Czas realizacji kontraktu 45 miesięcy; budowa wystartowała 15 lipca 2001 roku.

Odcinek nr 4 (centralny) obejmuje dwa szyby startowe, trzy szyby wentylacyjne, 5 stacji (od stacji Francois Verdier do stacji Empalot) i tunel dwutorowy o długości 3700 m drążony TBM zawiesinową wykorzystywaną wcześniej na budowie metra w Lille. Prace rozpoczęto 3 lipca 2001 roku.

Odcinek nr 5 (południowy) zawiera dwa szyby startowe, 5 szybów wentylacyjnych 5 stacji (od stacji Niel do stacji Université) oraz tunel dwutorowy o długości 3200 m drążony używaną na budowie metra w Lille TBM EPB. Czas wykonania kontraktu wynosi 41 miesięcy. Początek prac to 22 maja 2001 roku.

Odcinek nr 6 to 1 stacja i tunel dwutorowy o długości 1416 m wykonywany metodą odkrywkową. Czas wykonania kontraktu wynosi 29 miesięcy; prace rozpoczęto 15 grudnia 2001 roku.

W sumie przy budowie linii B pracują jednocześnie 4 tarcze zmechanizowane. Przekładki i zabezpieczenie podziemnych urządzeń infrastruktury technicznej (gaz, wodociągi, kable energetyczne) miały miejsce od kwietnia do września 2001 roku. Budowa stacji metodami odkrywkowymi rozpoczęła się w 2001 roku. Pierwsza tarcza TBM wystartowała w sierpniu 2002 roku, prace inżynierskie zostały zakończone w 2005

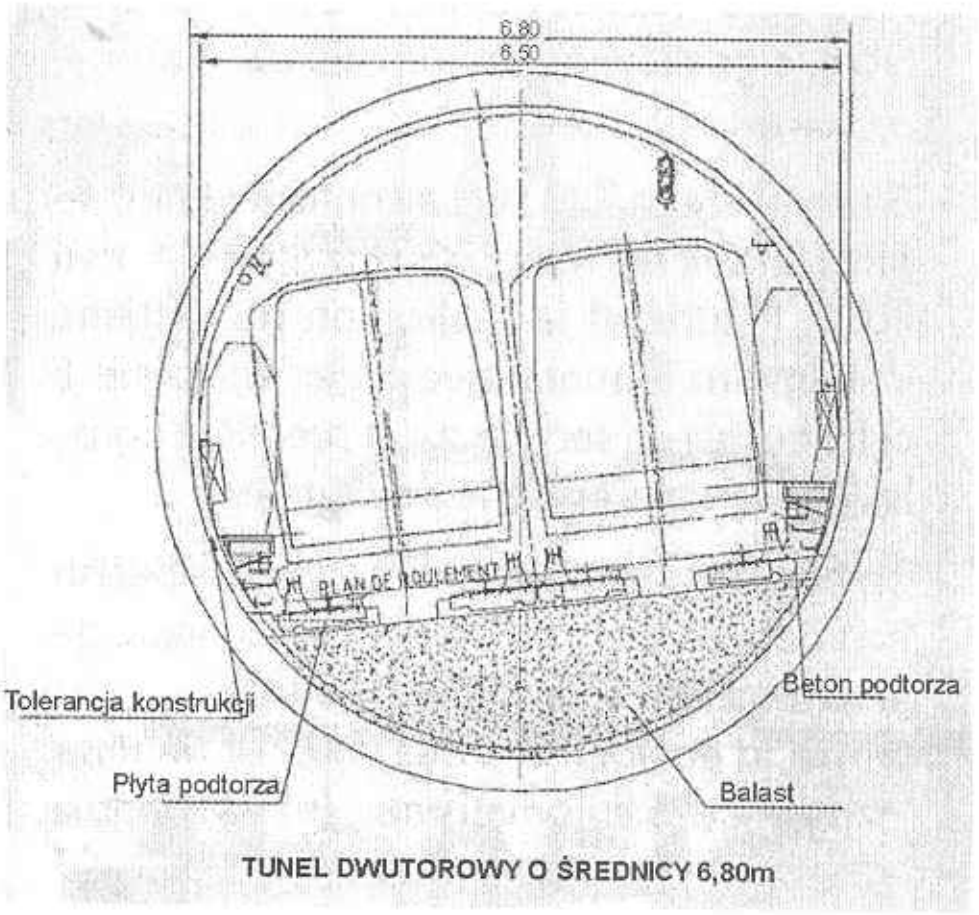
roku. Wyposażanie i prace wykończeniowe oraz instalacja systemów sterowania i opłat trwają od 2005 i przez cały 2006 rok, a otwarcie wraz z marketingiem powierzchni handlowych nastąpi w połowie 2007 roku.

2.2 Warunki geologiczne

Trasa linii B przebiega w kierunku północ – południe wzdłuż prawego brzegu rzeki Garonny. Brzeg ten stanowi płaska równina, z wyjątkiem południowego fragmentu linii. Podłoże stanowi trzeciorzędowa molasa o charakterze zwietrzeliny przykryta warstwą aluwiów, które tworzą grube żwiry, pospółka, zagęszczone piaski i piaski pylaste oraz pyły. W południowej części trasy stwierdzono występowanie glin oraz piasków gliniastych. W centralnej części miasta aluwia są przykryte warstwą nasypów antropogenicznych. Zwierciadło wody gruntowej kształtuje się na głębokości 3 – 5 m poniżej poziomu terenu. Z punktu widzenia warunków geologicznych na trasie II linii metra w Warszawie najbardziej interesujące jest drążenie odcinków nr 2 i 4. Tam w wielu miejscach metro przebiega pod zabudową, obiektami zabytkowymi lub budynkami posadowionymi na palach. W rejonie stacji Canal du Midi tunele wykonywane są pod istniejącym kanałem żeglownym.

2.3 Tunel dwutorowy drążony z zastosowaniem tarczy EPB

Na odcinku nr 2 dwutorowy tunel szlakowy o długości 4700 m drążono z zastosowaniem TBM EPB o średnicy 7,77 m. Wewnętrzna średnica tunelu wynosi 6,8 m, a obudowa wykonana jest z bloków betonowych o grubości 0,34 m i długości 1,4 m lub 1,0 m na łukach poziomych o promieniu minimalnym nie mniejszym niż 200 m. Na jeden pierścień obudowy składa się 5 bloków typowych i jeden kluczowy. Drążenie rozpoczęto z szybu startowego stacji Trois Cocus 5 sierpnia 2002 roku, a zakończono 30 sierpnia 2004 roku w szybie Victor Hugo. W listopadzie 2004 roku TBM zdemontowano i odesłano do naprawy przed ponownym jej wykorzystaniem. Średni nadkład gruntu nad tunelem wynosił 10 m z czego około 3 – 4 m stanowiła molasa gliniasto – piaszczysta, piasek pylasty i piasek drobny, miejscami gruboziarnisty. Średni postęp robót wyniósł 16,20 m dziennie przy pracy 15 zmian w tygodniu, a pod koniec robót 17 zmian (w tym dwie na utrzymanie tunelu). Profil geologiczny opracowany na podstawie rzeczywistych danych uzyskanych z przodka tarczy był identyczny z wykonanym na podstawie wierceń prowadzonych podczas rozpoznania geologiczno – inżynierskiego. Przekrój tunelu dwutorowego przedstawiono na rys. nr 2.



Rys. 2 Przekrój tunelu dwutorowego [1]

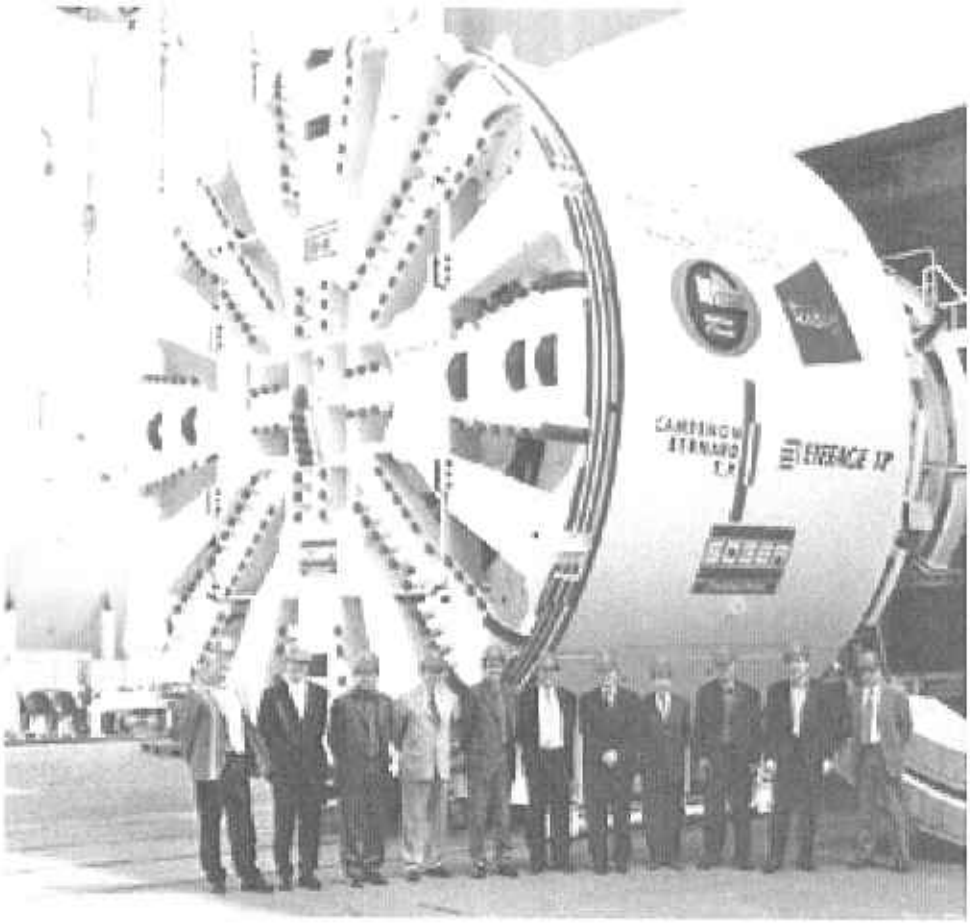
Dane techniczne TBM EPB drążącej tunel dwutorowy odcinka nr 2:

• długość	9,00 m
• ciężar wraz z „pociągiem"	1000 ton
• dźwigniki hydrauliczne	15 par dźwigników
• powłoka tarczy dwusegmentowa	przegubowa
• erektor	próżniowy
• długość „pociągu"	65 m

Głowica skrawająca

• średnica	7,785 m
• prędkość obrotu głowicy	0 – 3 obrotów/ min
• ciśnienie robocze	3 bary
• prędkość przesuwu	0 – 80 mm/ min
• maksymalny moment obrotowy	1500 tm
• liczba noży skrawających	około 200

Na fot. 1 przedstawiono widok tarczy EPB zmontowanej przed rozpoczęciem drążenia tuneli na odcinku nr 2.



Fot. 1 Widok TBM EPB zmontowanej w wytwórni. [4]

2.4 Tunel dwutorowy drążony z zastosowaniem tarczy zawiesinowej

Tarczę zawiesinową przywiezioną po renowacji z budowy metra w Lille zastosowano do drążenia tunelu dwutorowego o długości 3700 m na odcinku nr 4, tzn. w ścisłym centrum miasta. TBM wystartowała 18 października 2002 roku i zakończyła drążenie tunelu 18 maja 2004 roku tzn. po 19 miesiącach pracy. Średni postęp robót, bez wliczania przejść przez stacje, które budowano w ścianach szczelinowych metodą odkrywkową, wyniósł 12,1 m dziennie. Średni nadkład gruntu wynosił około 10 m. Prace prowadzono w molasie gliniastej z przewarstwieniami piaszczystymi i pylastymi. Podobnie jak na odcinku 4, profil geologiczny opracowany na podstawie rzeczywistych danych uzyskanych z przodka tarczy był identyczny z wykonanym na podstawie wierceń prowadzonych podczas rozpoznania geologiczno – inżynierskiego.

Dane techniczne tarczy zawiesinowej drążącej tunel odcinka nr 4:

- długość wraz z osłoną — 8,35 m
- dźwigniki hydrauliczne — 13 par dźwigników o nacisku 200 t

• obudowa części osłonowej	przegubowa
• erektor	próżniowy

Głowica skrawająca

• średnica	7,76 m
• prędkość obrotu głowicy	0 – 1,5 obrotów/ min
• ciśnienie robocze	2,5 bara
• prędkość przesuwu	12,75 m / dzień
• maksymalny moment obrotowy	600 tm
• liczba noży skrawających	około 277

Podsumowanie robót wykonanych na koniec 2004 roku świadczyło o tym, że prace zostaną zakończone w przewidywanym terminie.

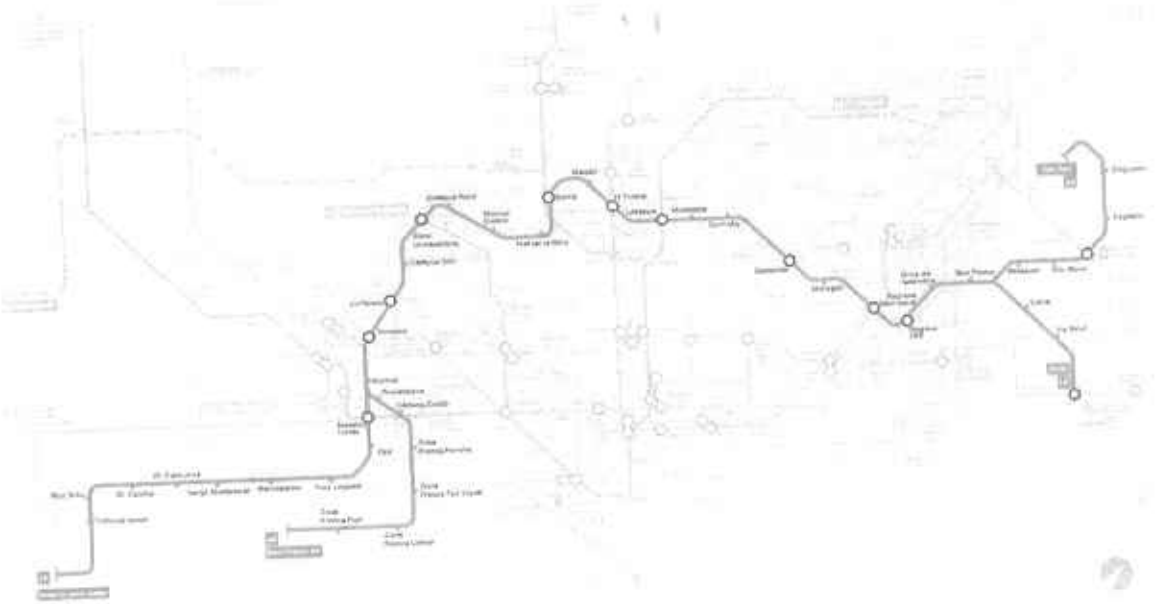
3. Metro w Barcelonie – budowa linii nr 9

3.1 Informacje ogólne

Pierwsza linia metra powstała a Barcelonie w 1924 roku. Obecnie 5 linii o długości 84 km i 115 stacji obsługuje 3 milionową metropolię. W 1999 roku opracowano nowy plan rozbudowy metra i kolei podmiejskich. Nowa linia nr 9 ma połączyć istniejącą sieć metra i kolei podmiejskich pomiędzy sobą. Dodatkowo ma zapewnić transport pomiędzy dzielnicami na linii północ – południe, a także wygodny dojazd na lotnisko, dworzec szybkiej kolei oraz do centrum targowego (aktualnie w budowie). Jej całkowita projektowana długość wynosi 42,5 km, z czego 34 km w tunelach. Odcinek środkowy obejmuje 24 stacje, w tym 12 to duże stacje przesiadkowe. Ocenia się, że tabor składający się z pięciu 20 metrowych wagonów umożliwi przewozy około 90 mln pasażerów rocznie. Planowany termin oddania do użytku całej linii przewidziano w 2007 roku. Na rys. 3 pokazano przebieg tej linii na planie miasta Barcelona.

Całą budowę podzielono na cztery sekcje o długościach od 9,4 do 12,3 km. W pierwszej sekcji zaprojektowano tunel dwutorowy o średnicy 8,4 (rys. 4). Tunel ten przebiega z lotniska do Centrum. W sekcjach II, III i IV wewnętrzna średnica tunelu wynosi 10,90m. Zawiera on trzy tory w dwóch poziomach (rys. 5). Tunele są drążone tarczą EPB oraz tarczą do skał, przy czym z uwagi na zmianę przekroju stosowane są jedna tarcza o średnicy 9,40 i dwie o średnicy 12 m. Nadkład gruntu nad tunelami jest zmienny i wynosi od 10 do kilkudziesięciu metrów. W sekcjach II i III metro biegnie pod strefą zwartej zabudowy miejskiej, obiektami zabytkowymi - wrażliwymi na osiadania.

Wykonawców wyłaniano w przetargach międzynarodowych, dzieląc linię na trzy kontrakty o podobnych warunkach geologicznych. Kontrakty na ich projekt i budowę zostały podpisane we wrześniu 2001 roku. Oddzielny przetarg ogłoszono na prowadzenie stałego monitorowania osiadań powierzchni terenu i obiektów nad metrem.



Rys. 3 Przebieg linii nr 9 na planie metra w Barcelonie [1].

3.2 Warunki geologiczne

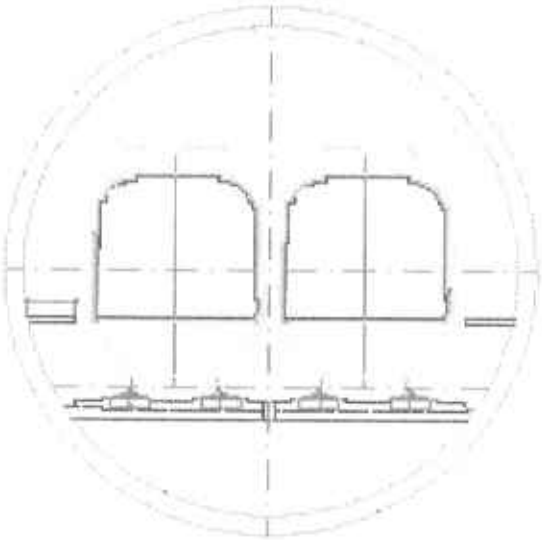
Z uwagi na znaczną długość linii, geologię i ukształtowanie terenu Barcelony, warunki jej budowy są bardzo zróżnicowane. Są to formacje trzecio i czwrtorzędowe. Formacje trzeciorzędowe tworzą twarde lub spękane skały, iły plioceńskie, brekcje - w części środkowej linii. Na krańcach tunele biegną w deltach dwóch rzek: pod deltą rzeki Llobregat na południu i Basos na północy, w gruntach czwartorzędowych tzn. piaskach, żwirach pyłach i glinach. Najtrudniejsze technologicznie są przejścia z jednej formacji do drugiej.

3.3 Dane techniczne TBM EPB o średnicy 12 m

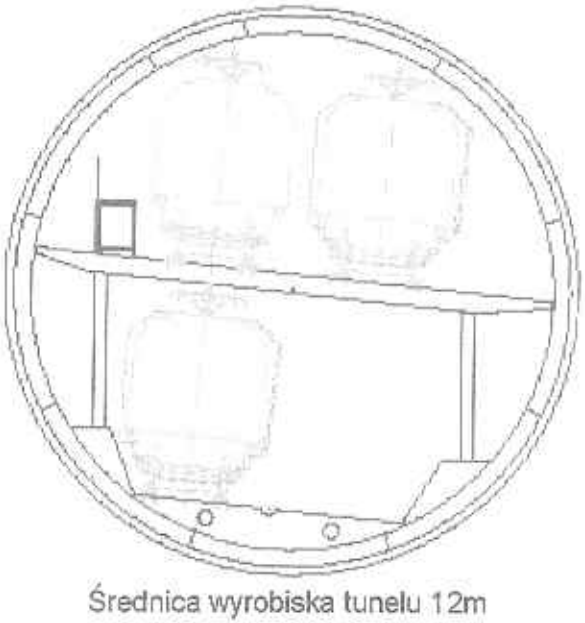
średnica nominalna	12,06 m
• wewnętrzna średnica obudowy tunelu	10,90 m
• zewnętrzna średnica obudowy tunelu	11,70 m
• grubość obudowy (bloki betonowe)	0,40 m
• długość 1 elementu obudowy	1,80 m
• długość wraz z obudową osłony	12,60 m
• dźwigniki hydrauliczne	38 sztuk
• prędkość obrotu głowicy	0 – 2,6 obrotów/ min
• moc całkowita zainstalowana	6 400 kW

- moc głowicy skrawającej — 4 000 kW
- nominalny i maksymalny nacisk — 0,45 - 0,60 MPa
- prędkość przesuwu — 12,75 m / dzień
- maksymalny moment obrotowy — 38 000 kNm
- liczba noży skrawających — 236 szt.
- erektor — próżniowy
- długość TBM wraz z „pociągiem" — 140 m
- ciężar całkowity — 2000 ton

Maszyna ta została zaprojektowana na maksymalne ciśnienie wody gruntowej nie przekraczające 4,5 bara. Osłonę tarczy wyposażono w 10 rurek iniekcyjnych do wykonywania iniekcji uszczelniającej za obudową tunelu. Segmenty obudowy o długości 1,80 m są układane za pomocą erektora próżniowego. Na jeden pierścień obudowy składa się 6 lub 7 bloków i segment kluczowy. Urobek jest odprowadzany przenośnikiem ślimakowym o wydajności 900 m^3/h. Na budowie tej został w 2005 roku ustanowiony światowy rekord w szybkości wykonania gotowego tunelu tarczą zmechanizowaną. Postęp prac w jeden dzień roboczy TBM typu EBP o nazwie „Bessi" wyniósł 39 metrów tunelu co oznacza 22 pierścienie obudowy. Przeciętny postęp robót był znacznie mniejszy i nie przekraczał 15 m tunelu na dobę.



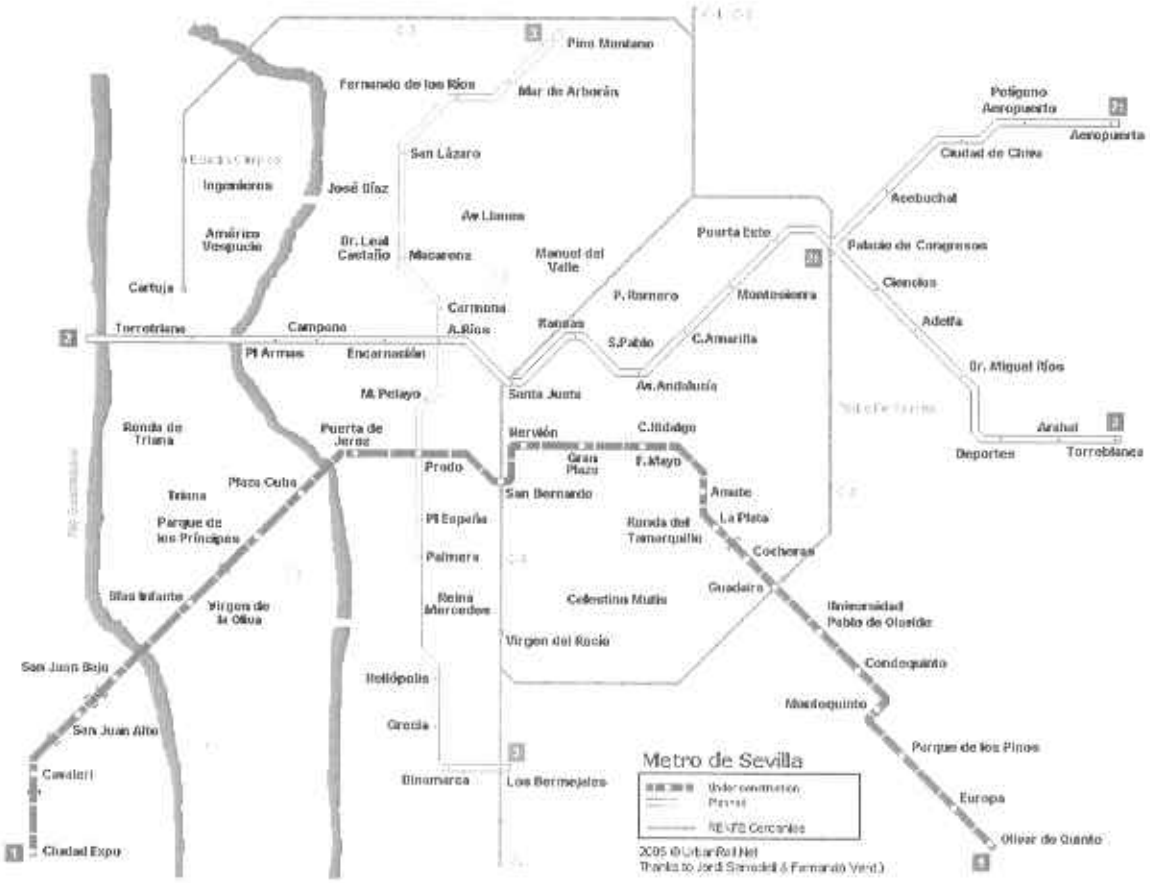
Rys. 4 Tunel dwutorowy [1]



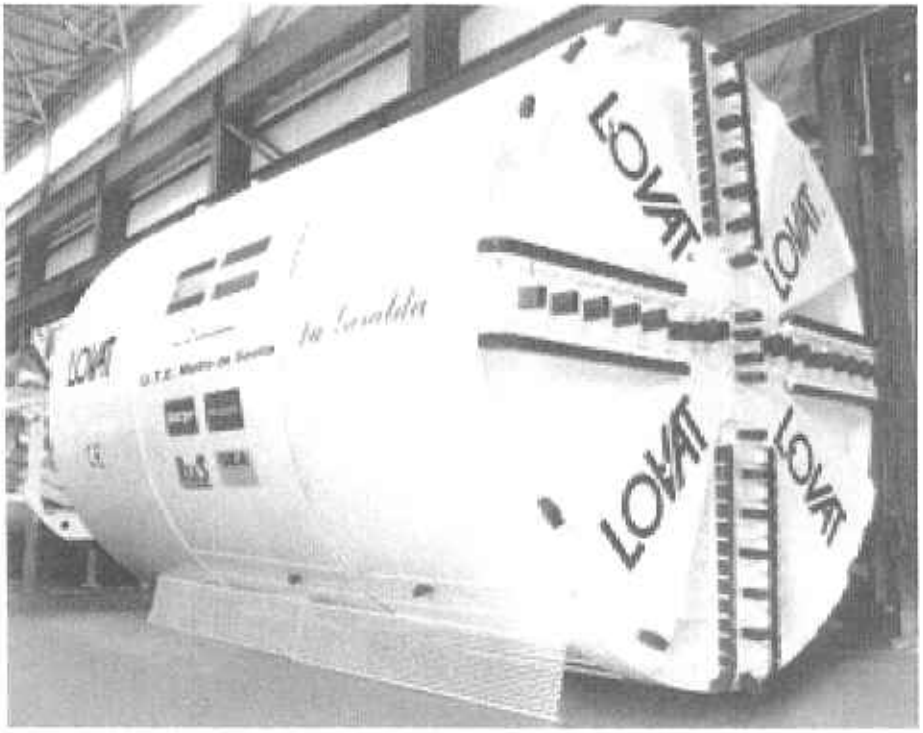
Rys. 5 Tunel o trzech torach [1]

4. Budowa I linii metra w Sewilli

Projekt przewiduje, że I linia metra w Sewilli będzie miała długość 19 km i 23 stacje (w tym 11 podziemnych). Linia ta przebiega ze wschodu na zachód i łączy centrum miasta z dzielnicami peryferyjnymi oraz terenami EXPO. Część tuneli szlakowych jest drążona tarczą EPB o średnicy 6,05 m. Podłoże stanowią grunty czwartorzędowe – piaski pylaste, żwiry i namuły. Prace są prowadzone całkowicie poniżej poziomu wód gruntowych. Aktualne trwają rozpoczęte 11 sierpnia 2005 roku roboty związane z drążeniem dwóch tuneli jednotorowych o długości 2334 m każdy. Tarcza wystartowała ze stacji wykonanej w ścianach szczelinowych o głębokości około 24 m. Na rys. 6 pokazano układ planowanych linii metra, a na rys. 7 widok tarczy EPB.



Rys. 6 Planowane linie metra w Sewilli [5]



Rys. 7 Widok tarczy EPB o średnicy 6,05 m [3]

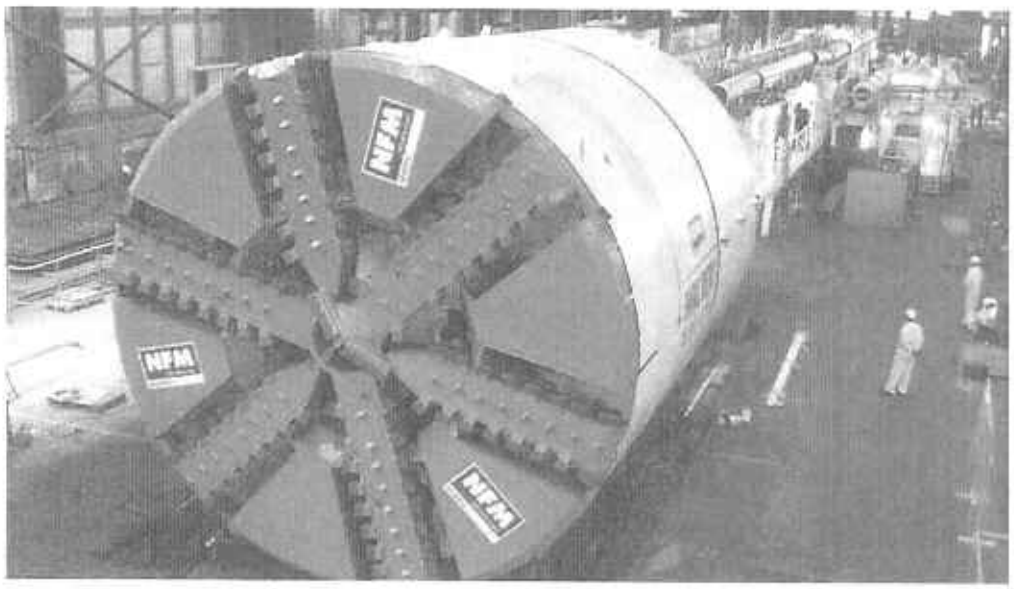
5. Budowa I linii metra w Chiraz w Iranie

Chiraz (1,2 mln mieszkańców) to miasto w południowo-zachodnim Iranie, stolica starożytnej Persji, a obecnie prowincji Fars. Władze miasta podjęły decyzję o budowie dwóch linii metra na kierunkach W-E i N-S. I linia ma długość 22,4 km i 21 stacji. Tunele szlakowe na długości 15 km zaprojektowano jako jednotorowe o średnicy 6 m i drążone tarczą, pozostałe 7,4 km to tunele dwutorowe wykonywane metodami odkrywkowymi W części centralnej tunele biegną pod zabytkowa częścią miasta. W podłożu całej I linii zalegają żwiry, gliny i grunty drobnoziarniste. Na długości pierwszych 10 km występuje wysoki poziom wody gruntowej. Z uwagi na warunki geologiczne zdecydowano się na wybór tarczy EPB o średnicy 6,88 m (rys. 8), która drąży tunele jednotorowe.

Dane techniczne tarczy EPB:

- średnica tarczy 6,88 m
- długość 10 m
- ciężar 400 ton
- całkowity ciężar TBM 630 ton
- całkowita długość TBM 100 m
- moc zainstalowana 1600 kW
- maksymalny nacisk dźwigników 46 000 kN

- moment obrotowy 7300 kNm
- szybkość przesuwu 8 cm/ min



Rys. 8 Widok tarczy EPB o średnicy 6,88 m [1]

Pierwsza tarcza EPB wystartowała we wrześniu a druga w listopadzie 2004 roku. Postęp robót wynosił około 10 m/zmianę, a prace prowadzono na dwie zmiany, dzięki czemu uzyskano 70 do 80 m tunelu tygodniowo. Obudowa tuneli jest wykonana z bloków betonowych o grubości 0,3 m i długości 1,4 m. Na jeden pierścień obudowy składa się 5 segmentów i jeden kluczowy. Drążenie 770 m zakończono 18 maja 2005 roku (pierwsza tarcza) i 20 czerwca 2005 roku druga tzn. po około 9 miesiącach. Aktualnie trwają prace na dalszych odcinkach.

6. Tunel pod Łabą w Hamburgu (Elbe 4 Rohre)

6.1 Informacje ogólne

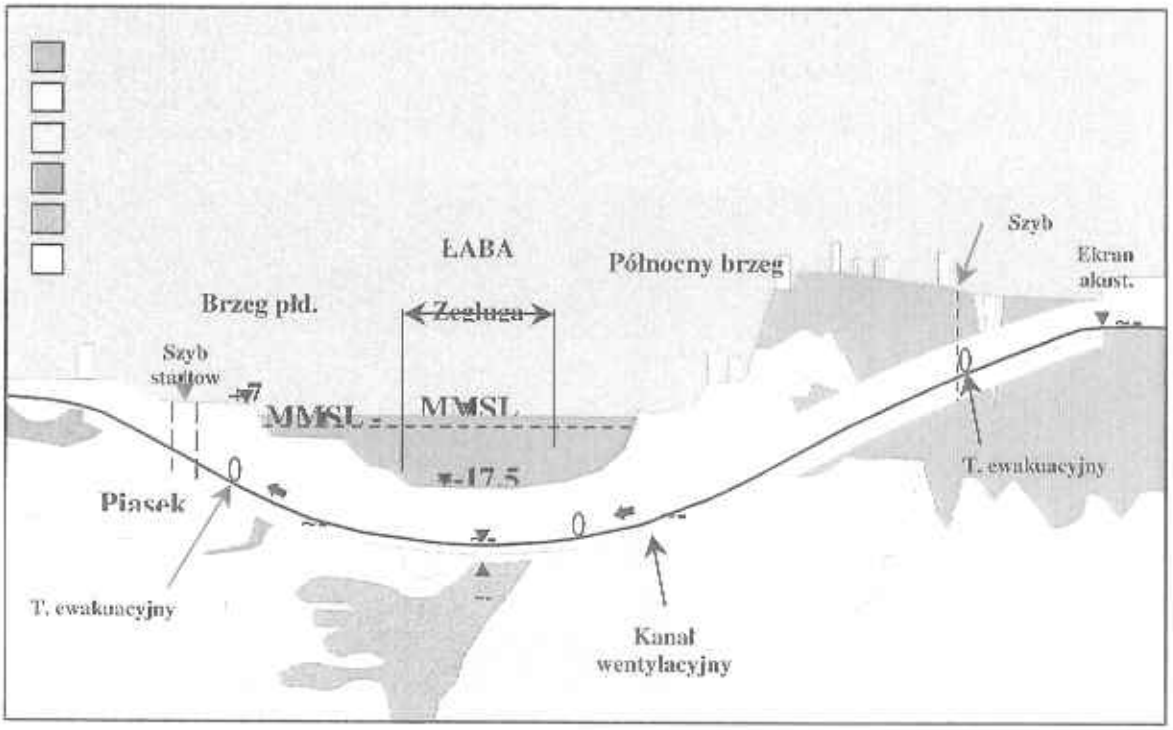
Łaba na odcinku estuarium od Morza Północnego do Hamburga jest jedną z najbardziej ruchliwych dróg wodnych. Dlatego już w 1911 roku powstał tam tunel dla pieszych, a następnie w 1975 roku autostradowy tunel drogowy wykonany metodą zatapiania gotowych elementów. Pod koniec lat 90. natężenie ruchu wyniosło 140 000 pojazdów dziennie, co znacznie przekraczało przepustowość istniejącego tunelu o sześciu pasach ruchu. Podjęto decyzje o budowie czwartej nitki, stąd nazwa tunelu: 4.Rura. W 1987 roku rozpisano konkurs na technologię wykonania tunelu o średnicy 14 m, który

ostatecznie rozstrzygnięto w 1990 roku. W 1993 roku ogłoszono przetarg, który zakończono w październiku 1994 roku podpisaniem kontraktu.

Zaprojektowano przeprawę o długości 4,4 km, w tym tunel drążony tarczą o długości 2,56 km. W przekroju tunelu znajdują się 2 pasy ruchu o szerokości 3,75 m, pas awaryjny o szerokości 2 m oraz dwa chodniki bezpieczeństwa o szerokości 0,50 m i 0,63 m. Całkowita wewnętrzna średnica tunelu wynosi 12,35 m, a średnica tarczy - 14,20 m. Tunel ten jest drążony w bezpośrednim sąsiedztwie już istniejącego.

6.2 Warunki geologiczne

Określona długość przeprawy, głębokość Łaby oraz maksymalny spadek wzdłużny równy 3,7 % sprawiły, że tunel biegnie 7 do 13 m pod dnem rzeki, a maksymalny nadkład na północnym brzegu wynosi 50 m. Najniższy punkt niwelety znajduje się na głębokości 42 m poniżej poziomu morza. Profil geologiczny określono na podstawie dotychczasowych danych z budowy poprzedniego tunelu oraz wyników wierceń w 36 otworach badawczych, w tym 8. wykonanych w dnie rzeki.



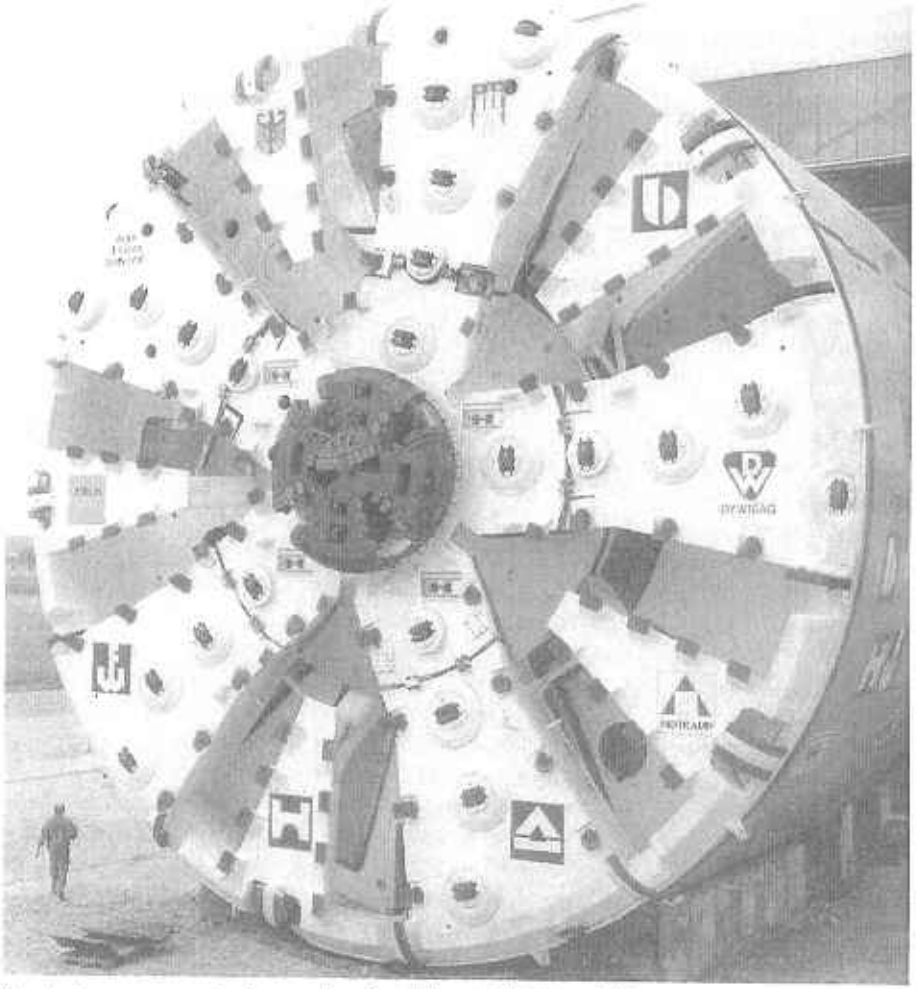
Rys. 9 Schematyczny przekrój geologiczny [4]

Bardzo zmienne i niejednorodne warunki geotechniczne obejmują w południowej części (na płaskim brzegu rzeki) tereny rekultywowane tzn. nasypy, piaski i żwiry na długości około 500 m. Następnie trasa tunelu na długości około 1 km pod rzeką przechodzi

przez osady lodowcowe: zagęszczone piaski, zwarte gliny i iły, pyły i soczewki melt z wodą pod ciśnieniem. W warstwach tych stwierdzono występowanie głazów narzutowych o średnicach dochodzących do 2 m . Dalej w kierunku północnym tunelu zalegają pyły i margle lodowcowe. Z uwagi na złożone warunki gruntowe, zagęszczone piaski i zwarte iły i gliny, a także głazy narzutowe spodziewano się dużych trudności podczas drążenia tunelu. Na rys. 9 przedstawiono schematyczny przekrój geologiczny oraz przekrój wzdłużny tunelu. Należy zauważyć, że warunki topograficzne i geotechniczne są zbliżone do sytuacji przejścia tunelem II linii metra pod Wisłą w Warszawie.

6.3 Drążenie tunelu

Tunel drążono tarczą zawiesinową, którą wybrano po rozpatrzeniu wielu kryteriów, ale głównie kryterium bezpieczeństwa prac. Skonstruowana specjalnie do tego projektu TBM była największą tarczą zawiesinową na świecie, wykorzystaną do drążenia w gruntach tunelu podwodnego. Jej widok pokazano na rys. 10. Produkcja (projekt, wykonanie i testowanie) tarczy trwała 18 miesięcy.



Rys. 10 Widok tarczy zawiesinowej o średnicy 14,20 m [4]

Dane techniczne tarczy zawiesinowej drążącej tunel Elbe 4. Rohre:

- średnica tarczy 14,2 m
- średnica głowicy 14,02 m
- ciężar głowicy 400 t
- długość TBM 60 m
- ciężar TBM 2600 t
- ciężar tarczy 2000 t
- nacisk głowicy 30 000 kN
- moment obrotowy 26 MNm
- prędkość obrotowa regulowana 0 do 2,5 obrotu/min
- ciśnienie robocze 5,5 bara
- dźwigniki hydrauliczne 32 pary
- moc całkowita 3200 kW
- średnica zewnętrzna obudowy 13,75 m
- średnica wewnętrzna obudowy 12,35 m
- długość 1. pierścienia 2 m

Obudowę wykonano z bloków żelbetowych o grubości 0,70 m, długości 5,30 m i szerokości 2,0 m. Na jeden pierścień obudowy tunelu składa się 6 segmentów typowych, 2 przykluczowe i 1 kluczowy. Ciężar 1 segmentu wynosił 18 ton. Łącznie wyprodukowano 11 520 szt. bloków tworzących 1280 pierścieni obudowy tunelu.

Planowano, że postęp robót będzie 6m dziennie(3 pierścienie obudowy), przy pracy na 3 zmiany, 24 godziny i 5 dni w tygodniu. W efekcie wyniósł on przeciętnie 2 pierścienie

(4m) dziennie, wliczając w to wszystkie okresy zatrzymania robót. Drążenie rozpoczęto z południowego szybu 15 października 1997 roku, a ukończono w szybie północnym 2 marca 2000 roku.

7. Tunel Lefortowo na obwodnicy Moskwy

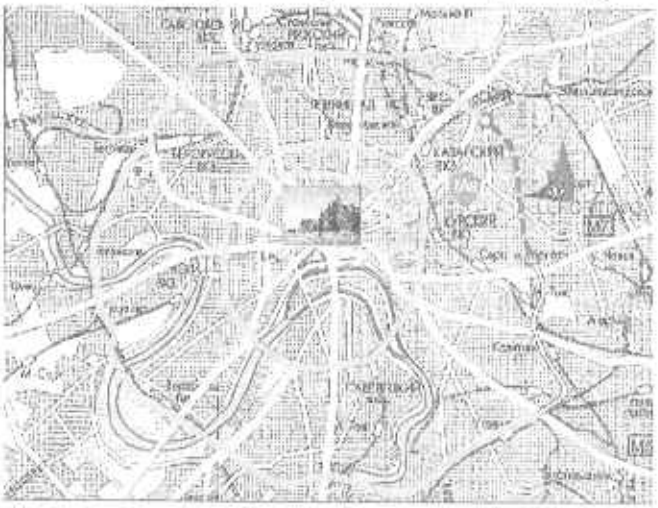
7.1 Informacje ogólne

Tunel Lefortowo znajduje się we wschodniej części trzeciej dużej obwodnicy Moskwy. Jego trasa biegnie pod terenami zabudowanymi, rzeką Jauza (dopływ Moskwy), podziemną infrastrukturą techniczną, w tym między innymi kablem energetycznym 110 kV. Dodatkowo, w odległości około 200m od tunelu znajdują się obiekty zabytkowe (budynek Szkoły Militarnej założonej przez Katarzynę Wielką ponad 200 lat temu). Ostatnie 100 m jest drążone pod ulicą o dużym natężeniu ruchu, ograniczoną obustronnie szeregiem budynków, a nadkład nad TBM wynosi tylko 7 m. Jest to tunel drogowy, jednokierunkowy, zawierający trzy pasy ruchu, kanał wentylacyjny oddymiający oraz

pomieszczenia techniczne i tunele ewakuacyjne dla pieszych. Całkowita jego długość wynosi 2 222 m, średnica wyrobiska - 14,22 m, wewnętrzna średnica tunelu - 12,35 m, objętość urobku - 352 706 m^3. Jeden pierścień obudowy zbudowany jest z 8 bloków betonowych o grubości 0,70 m i ciężarze 20 ton oraz jednego kluczowego. Usytuowanie tunelu pokazano na rys. 11, a przekrój poprzeczny na rys. 12.

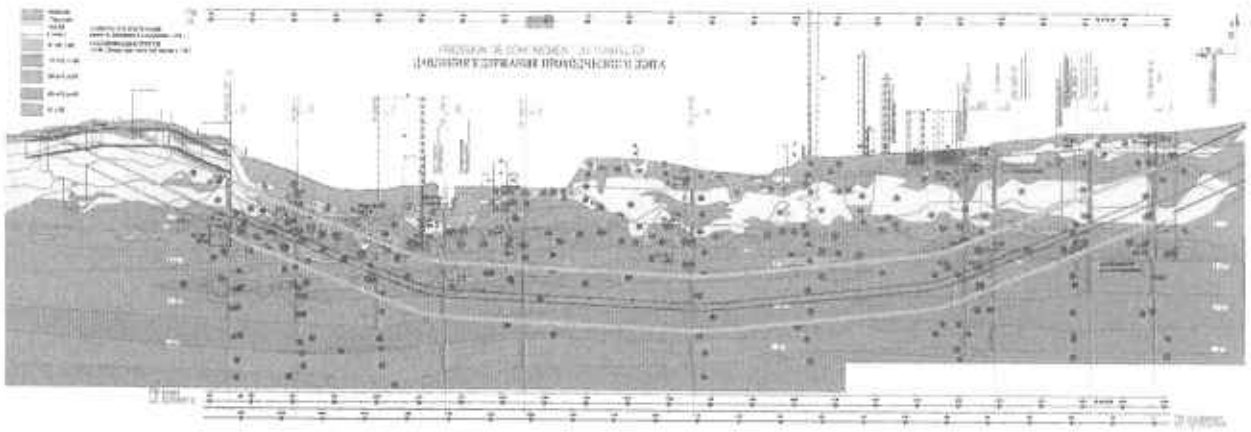
7.2 Warunki geologiczne

Trasa tunelu przebiega w bardzo zróżnicowanych warunkach geologicznych zarówno w profilu podłużnym jak i na wysokości 14,2 m przekroju poprzecznego. W części środkowej zalegają zwarte gliny, wapienie dolomitowe, a na krańcach nasypy oraz utwory aluwialne w postaci piasków i glin. Na terenie tym występują cztery poziomy wód gruntowych, z których jeden jest połączony z rzeką Jauza. Schematyczny przekrój geologiczny pokazano na rys. 13. Na odcinku obejmującym utwory czwartorzędowe warunki geologiczne są zbliżone do profilu geotechnicznego w dolinie Wisły.



Rys. 11 Usytuowanie tunelu Lefortowo [1]

Rys. 12 Przekrój poprzeczny tunelu Lefortowo [1]



Rys. 13 Profil geologiczny wzdłuż trasy tunelu Lefortowo.[1]

7.3 Drążenie tunelu

Z uwagi na warunki gruntowe i hydrogeologiczne tunel Lefortowo drążono tarczą TBM zawiesinową, ta samą, która wykonała 4 tunel pod Łabą w Hamburgu. Jej dane techniczne są następujące:

• średnica głowicy skrawającej	14,22 m
• średnica małej głowicy	3,00 m
• długość	12,00 m
• długość wraz z pociągiem	72 ,00 m
• liczba noży skrawających	154 szt.
• dźwigniki hydrauliczne głowicy	12 szt. o nacisku 2500 ton
• dźwigniki hydrauliczne TBM	48 szt. o nacisku 12 000 ton
• moment obrotowy głowicy 14,22 m	2600 tm
• prędkość obrotu głowicy 14,22 m	0 - 1,75 obrotu/min
• moc całkowita	5700 kW
• moc głowicy skrawającej	3200 kW
• ciężar TBM	1400 ton
• ciężar pociągu	600 ton

Drążenie rozpoczęto 10 listopada 2001 roku, a zakończono 18 lutego 2003 roku. Oznacza to, że 2222 m tunelu wykonano w 15 miesięcy (tzn. kilka miesięcy krócej niż przewidywano).Nadkład gruntu nad tarczą wynosił od 10, 15 do 25 m. Prace prowadzono 7 dni w tygodniu na dwie zmiany po 12 godzin i trzy ekipy wykonawcze. Średni postęp robót wyniósł około 120 m miesięcznie, a najlepszy wynik to 200 m w miesiąc. Z uwagi na zabudowę prowadzono stały nadzór geodezyjny i opracowano ponad 100 przekrojów pomiarowych do analizy osiadania lub unoszenia powierzchni terenu. Tunel oddano do eksploatacji pod koniec 2003 roku. Natomiast tarcza zawiesinowa została wyremontowana i wykorzystana do drążenia trzeciego już tunelu drogowego Srebrny Bór, również pod Moskwą.

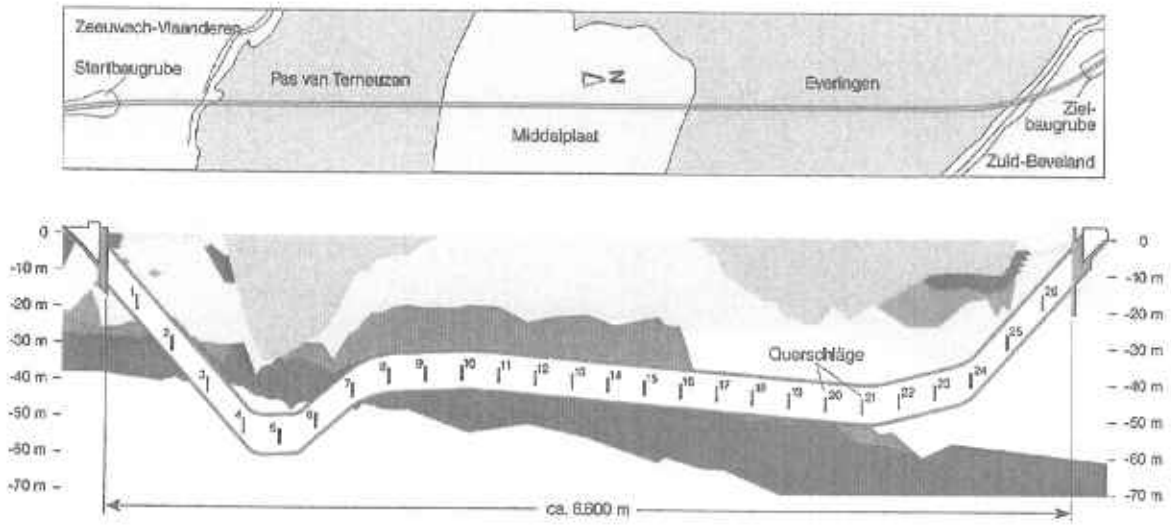
8. Tunel Westerschelede w Holandii

Tunel ten zapewnia połączenie drogowe między regionami Zuid - Beveland a Zeeuwusch-Vlaanderen położonymi na północnym i południowym brzegu Zachodniej Skałdy. Rzeka ta jest szlakiem żeglownym statków pełnomorskich cumujących w Antwerpii. Projekt stałej przeprawy w tym miejscu powstał już w latach 30. i 70. XX wieku, natomiast w 1986 roku podjęto definitywną decyzje o budowie tunelu.

W podłożu rzeki występuje warstwa nieprzepuszczalnych iłów w stanie zwartym o miąższości od 8 do 38 m. Piaski zalegające pod i nad tą warstwą są silnie zagęszczone.

Położenie iłów zdecydowało o przebiegu niwelety tunelu oraz o wyborze jako metody drążenia tarczy zawiesinowej. Tunel ma 6,6 km długości; w najgłębszym punkcie znajduje się 60 m poniżej lustra wody. Jest to najdłuższy i najgłębszy w zachodniej Europie tunel, wykonany w gruntach nawodnionych. Przekrój wzdłużny i schematyczne warunki geologiczne przedstawiono na rys. 14.

Przekrój poprzeczny (rys. 15) składa się z dwóch tuneli o średnicy zewnętrznej 11 m i wewnętrznej 10,10 m. Obudowę wykonano z bloków żelbetowych o długości 2,0 m i wadze 11 t każdy. Jeden pierścień obudowy tworzy 7 bloków typowych i 1 kluczowy. Na brzegu rzeki uruchomiono specjalne w tym celu wytwórnię i wykonano 52 000 segmentów. Tarcza ma średnicę 11,34 m i długość 11,55 m. Przystosowano ją do pracy pod ciśnieniem 8,5 bara Całość TBM waży 2000 t i ma 195 m długości. Na budowie tego tunelu pracowały jednocześnie dwie maszyny w odległości 12 m i wyprzedzeniem 100 m jedna w stosunku do drugiej. Prace rozpoczęto w listopadzie 1997 roku , a zakończono w marcu 2003 roku po 64 miesiącach.



Rys. 14 Przekrój wzdłużny tunelu pod Zachodnią Skaldą [2], [4]

9. Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono przykłady tuneli drążonych tarczami zmechanizowanymi:

- w warunkach geologicznych zbliżonych do warunków warszawskich
- o średnicach od 6,0 do 14,0 m
- tuneli metra i tuneli drogowych
- tuneli jedno i dwutorowych

- drążonych w terenach zurbanizowanych, pod rzekami lub kanałami, pod budynkami głęboko posadowionymi,
- w warunkach topograficznych podobnych do sytuacji w Warszawie
- wykonywanymi tarczami zawiesinowymi i EPB

Na tej podstawie można sformułować wnioski do dalszych analiz i ustaleń.

Bibliografia:

[1] Tunnels et Ouvrages Souterrains, No 144/ 1997, No 172/ 2002, No 177/2003, No 179/2003, No 187/2005, No 191/2005
[2] World of Tunneling, Vol.13, No. 3, Vol. 14, No 5, Vol. 15, No 3, Vol. 15, No 8,
[3] Materiały informacyjne firmy Lovat
[4] Materiały informacyjne firmy Herrenknecht
[5] strony www.lovat.com ; www.herrenknecht.com ;

Abiewska - Lewandowska