

*Maciej Kosmalski\*, Robert Kozłowski\**

## NOWOCZESNE METODY ROZBUDOWY METRA WARSZAWSKIEGO W OPARCIU O ZMECHANIZOWANE TARCZE PEŁNOPRZEKROJOWE\*\*

---

### 1. Historia budowy I linii metra w Warszawie

W osiemdziesięcioletniej historii budowy metra w Warszawie można wydzielić trzy niezależne okresy [7].

Pierwszy okres zapoczątkowała podjęta przez Zarząd Tramwajów Miejskich w Warszawie uchwała z 22 września 1925 r. o opracowaniu projektu podziemnej kolei. Tę historyczną decyzję podjęto w czasie, gdy we wszystkich milionowych miastach Europy Zachodniej, z wyjątkiem Rzymu, istniała bardziej lub mniej rozbudowana sieć metra. Za pierwszoplanowy kierunek uznano budowę trasy z południa na północ. Przeprowadzono pierwsze dogłębne badania warunków geologicznych. Trasa o długości 7,5 km miała swój początek na placu Unii, a kończyła się na Muranowie. Światowy kryzys gospodarczy spowodował, że do 1938 prace zostały przerwane. Rozpoczęcie robót zaplanowano na jesień 1939 r. Należy przypuszczać, że gdyby nie wybuch II wojny światowej, Warszawa miałaby pierwszą linię metra w latach 40. XX wieku.

Po wojnie, w 1948 r. powstało Biuro Projektów Szybkiej Kolei Miejskiej, które za główny kierunek obrało ponownie budowę metra na linii z południa na północ, wydłużając ją w obu kierunkach, tak by zapewnić sprawną komunikację między planowanymi do budowy peryferyjnymi dzielnicami a Śródmieściem. Przewidywano budowę 25 stacji na trasie metra płytkiego od Młocin do Natolina. Projekt był gotowy z końcem 1948 r. Rozpoczęcie prac budowlanych zaplanowano na początek 1950 r. Plany te uległy radykalnej zmianie po interwencjach władz polityczno-gospodarczych, które uznały, że pilniejsza jest budowa głę-

---

\* Przedsiębiorstwo Budowy Kopalń PeBeKa SA, Lubin

\*\* W artykule wykorzystano materiały informacyjne i reklamowe firm: C.V. Buchan Ltd., Charcon Tunnels Ltd., Herrenknecht AG., LOVAT Inc. oraz Metra Warszawskiego

bokiego metra ze wschodu na zachód pod Wisłą. Tunele według tej koncepcji miały zaczynać się na praskim Targówku i kończyć w rejonie placu Teatralnego. Ich drażnienie zaplanowano na głębokości 40 m pod powierzchnią terenu. Tak zaprojektowane metro miało pełnić dodatkowo strategiczną funkcję schronu atomowego, a tunelowa przeprawa pod Wisłą miała być bezpiecznym od bombardowań traktem dla szynowych transportów wojskowych.

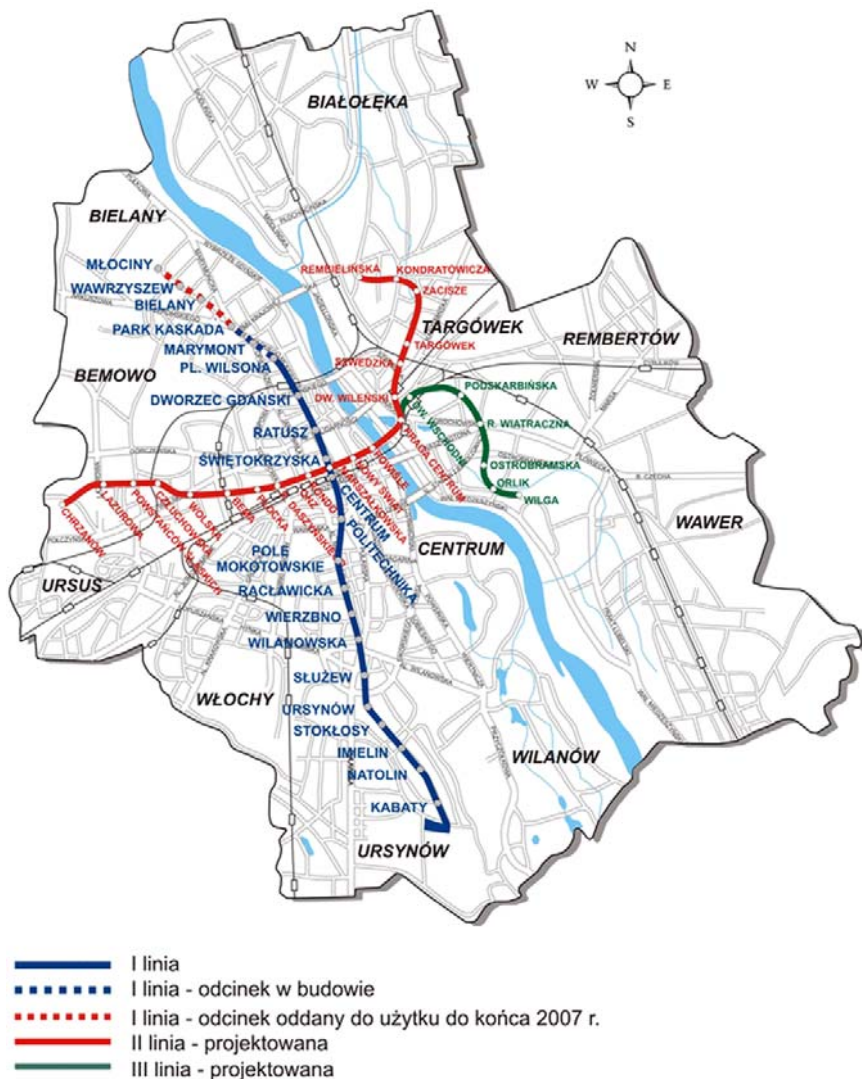
Budowa głębokiego metra w warszawskich warunkach geologicznych okazała się zadaniem technicznie bardzo trudnym i znacznie kosztowniejszym, niż to wcześniej planowano. Głębianie szybów i drażnienie tuneli realizowano w nadciśnieniu. Rozpoczęte w 1953 r. roboty zakończono definitywnie w roku 1957. Po raz wtóry trudności finansowe i sytuacja polityczna zaważyły na losach budowy metra.

Na przełomie lat 1982 i 1983 rozpoczął się trzeci, ostatni już etap budowy metra w Warszawie, który doprowadził do jego uruchomienia. W lutym 1983 r. powołano Generalną Dyрекcyję Budowy Metra, a 15 kwietnia oficjalnie rozpoczęto roboty palowe na budowie pierwszej linii. Mimo obowiązującej uchwały Rady Ministrów o finansowaniu budowy ze środków centralnych, następowało stopniowe ich ograniczanie wraz z pogarszającą się sytuacją gospodarczą kraju. Konsekwencją tego był spadek tempa robót. Planowane zakończenie całości prac na pierwszej linii już w 1990 r. zostało przesunięte początkowo na 1994 r., a następnie na 1996 r. Mamy już piąty rok nowego stulecia, a kolejne terminy zakończenia budowy tej linii zaplanowane na 2007 r. wydają się trudne do zrealizowania.

Na trasie o długości 23,1 km, od Kabat do Młocin, zaprojektowano budowę 23 stacji. Obecnie przystąpiono do budowy stacji „Marymont” zaplanowanej jako kolejna — 19. Faktycznie jest to 17 stacja na trasie, ponieważ w trakcie budowy zrezygnowano ze stacji A12 „Plac Konstytucji” oraz stacji A16 „Muranów”. Przebieg trasy z zaznaczonym czynnym odcinkiem przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku tym przedstawiono również tunele wykonane i planowane do wykonania, tak metodą odkrywkową, jak i tarczową.

W najslabiej zurbanizowanym odcinku południowym budowane były tunele dwutorowe metodą odkrywkową w wykopach zabezpieczonych ścianką berlińską. Metodą odkrywkową realizowane były również wszystkie dotychczas wybudowane stacje, z częściowym lub całkowitym zastosowaniem metody stropowej zwanej też mediolańską. Metodę tę po raz pierwszy zastosowano przy budowie hali peronowej na stacji „Politechnika” zrealizowanej przez Przedsiębiorstwo Budowy Kopalń PeBeKa SA. Poczynając od stacji „Wilanowska”, jednotorowe tunele szlakowe drażone są podziemną metodą górniczą z zastosowaniem otwartej tarczy tunelowej. Pod osłoną tarczy wykonywana jest ostateczna obudowa tubingowa z żeliwa o średnicy wewnętrznej 5,2 m. Obudowa uszczelniana jest ołowiem. Do dnia dzisiejszego zakończono drażnienie tuneli do stacji A19 „Marymont”. Oczekiwane jest ogłoszenie przetargu na budowę ostatniego odcinka tuneli do częściowego wykonania metodą tarczową między stacją „Marymont” a stacją „Park Kaskada”. Wypłycone tunele na północ od stacji „Park Kaskada” drażone będą metodą odkrywkową. Zastosowanie metody tarczowej na odcinku śródmiejskim pozwoliło na uniknięcie paraliżu komunikacyjnego stolicy. Przestrzeganie reżimów technologicznych zaowocowało ograniczeniem osiadań szkod-

liwych dla infrastruktury podziemnej miasta, jak również dla budowy naziemnych. Mieszkańcy miasta i użytkownicy komunikacji miejskiej i kolejowej nie zauważyli wykonania tuneli metra 80 cm pod dolnymi jezdniami Trasy Łazienkowskiej na Rondzie Jazdy Polskiej ani drażenia tuneli 1,5 m pod czynnymi torami linii średnicowej PKP na skrzyżowaniu Alei Jerozolimskich z ul. Marszałkowską [1]. Realizacje te są przykładem nieograniczonych możliwości tarczowego drażenia tuneli w pokonywaniu skomplikowanych przeszkód podziemnych.



Rys. 1. Przebieg I linii metra oraz planowanej trasy II i III linii [1]

Stosowana w Warszawie tarcza ma istotną zaletę polegającą na możliwości długotrwałych postojów, co miało już miejsce podczas pojawiających się kłopotów finansowych Inwestora. Jej otwarty charakter wymaga stosowania odwadniania górotworu. Powszechnie stosowane są studnie depresyjne zlokalizowane po obu stronach tuneli szlakowych w odległości 5,5 m od osi tunelu, w rozstawie co 10÷40 m wzdłuż osi podłużnej [1].

Przesuszone piaski i żwiry wymagają od budowniczych stosowania specjalnego deskowania w czole tarczy, by zabezpieczyć je przed obwałami, a tym samym zminimalizować deformację terenu. Otwartość czoła przodka pozwala w stosunkowo łatwy sposób usuwać pojawiające się na trasie tunelowania głązy narzutowe. Brak środków na płynne finansowanie jest główną przyczyną opóźnień w budowie metra. Jest to problem, który w zasadniczy sposób nie pozwala na przyspieszenie tempa prac tunelowych. Nadrobienie opóźnień powstałych z powodów finansowych nie jest możliwe z przyczyn technologicznych. Optymalne postępy możliwe do uzyskania stosowaną tarczą otwartą wynoszą 2 m tunelu na dobę.

## 2. Czy szybka budowa metra jest potrzebna?

Przyspieszenie rozbudowy metra w istotny sposób usprawniłoby komunikację w Warszawie, a tym samym przyciągnęłoby znaczących inwestorów. Niezwykle korzystne usytuowanie naszej stolicy w tej części Europy mogłoby zaowocować podniesieniem rangi miasta jako centrum polityczno-gospodarczego. Trudno jednak to sobie wyobrazić bez sprawnie działającej komunikacji będącej układem „nerwowym” takiego centrum. Wykorzystanie przestrzeni pod powierzchnią zurbanizowanych terenów jest jednym z podstawowych zadań międzynarodowego planu „zrównoważonego rozwoju”, zakładającego dążenie do takich rozwiązań urbanistycznych, by ich realizacja nie ograniczała przyszłym pokoleniom zdolności rozwoju i zaspakajania ich własnych potrzeb [2].

Podziemna budowa miejskich układów komunikacyjnych jest sprawdzonym działaniem realizacyjnym tego planu.

Najwyższy czas, by dla ciągle rozbudowującej się stolicy podjąć niezbędne działania pozwalające zagwarantować na wiele pokoleń ład komunikacyjny aglomeracji warszawskiej. Zakończenie budowy I linii z planowanym równoleżnikowym przebiegiem trasy II linii pod Wisłą, w powiązaniu ze sprawnie działającą komunikacją naziemną, może zapewnić logiczne i szybkie przemieszczanie się pasażerów.

Inwestor, projektanci i urbaniści muszą w bardzo krótkim czasie opracować zagadnienia natury techniczno-organizacyjnej oraz ekonomiczne, które uwzględnione będą w trakcie rozbudowy metra.

Oto tylko niektóre z nich według hierarchii ważności:

- sposoby finansowania budowy,
- budowa geologiczna trasy i parametry geotechniczne górotworu,
- właściwy wybór metody drążenia,
- wybór rodzaju trasy (tunele jednotorowe czy dwutorowe),

- analiza możliwości komunikacyjnych miasta pozwalających uprościć logistykę dostaw materiałów wsadowych i odstawy urobku,
- prefabrykacja obudowy żelbetowej.

### 3. Geologia I i II linii [1]

Na budowanej trasie I linii metra warunki gruntowo-wodne bezpośrednio pod powierzchnią terenu są zdecydowanie korzystniejsze niż warunki geologiczne i hydrogeologiczne, jakie napotkali budowniczowie metra głębokiego w latach 1951–57. Zdecydowanie lepsze parametry górotworu miały wpływ na decyzje budowy metra płytkiego.

Górotwór w rejonie I linii stanowią:

- utwory trzeciorzędowe okresu pliocenńskiego,
- utwory czwartorzędowe z plejstocenu i holocenu.

Utwory pliocenские w około 60% tworzą ility i ility pylaste, a w około 40% osady pylaste, pylasto-piaszczyste i piaski drobnoziarniste. Osady te są bardzo zdyslokowane. W stropie pliocenu występują rynny, zagłębienia i wypiętrzenia sięgające nawet do powierzchni terenu. Spagowe warstwy czwartorzędu reprezentowane są lokalnie przez osady przedlodowcowe, stanowią je drobno- i gruboziarniste piaski i żwiry, a w stropie — piaski pylaste, pyły i ility. Na utworach preglacjału i pliocenu zalegają osady zlodowacenia środkowopolskiego. Są to głównie gliny morenowe z pojedynczymi głazami narzutowymi, piaski, gliny i ility.

W osadach pliocenu woda gruntowa nie stanowi warstwy ciągłej, lecz występuje w przewarstwieniach piaszczystych, piaszczysto-pylastych oraz w spękaniach iłów. Grunty nawodnione cechuje niski współczynnik filtracji, co powoduje powstawanie zjawisk upłynniania i tworzenia się kurzawek utrudniających prowadzenie robót. W czwartorzędzie wydzielono dwa poziomy wód gruntowych: przypowierzchniowy i zasadniczy. Poziom przypowierzchniowy stanowią wody występujące w płytko zalegających przewarstwieniach i soczewkach piaszczystych i spękaniach glin. Wody te, o małym wydatku i słabym zasilaniu zależnym od opadów atmosferycznych, wykazują wahania zwierciadła 0,8÷2,0 m. Nie stanowią one ciągłej warstwy i charakteryzują się swobodnym lub słabo napiętym zwierciadłem, stabilizującym się na głębokości 1,0÷5,0 m. Wody poziomu zasadniczego występują w piaskach, tworząc duże zbiorniki wód podziemnych o miąższości 5,0÷30,0 m. Są to warstwy o dużym wydatku, dobrze zasilane wodą, o zwierciadle swobodnym lub napiętym, stabilizującym się na głębokości 8,0÷15,0 m.

W trakcie budowy II linii metra należy spodziewać się podobnych warunków geologicznych i hydrogeologicznych. W tabeli 1, przedstawiono warunki gruntowe na odcinku centralnym II linii według oceny własnej autorów artykułu na podstawie różnych materiałów źródłowych. Z prezentowanego zestawienia wynika jednoznaczna przewaga utworów osadowych o zwartym charakterze, co może mieć decydujący wpływ na właściwy dobór urządzeń do drążenia tuneli, ze wskazaniem na tarcze EPB.

TABELA 1

**Warunki gruntowe centralnej części II linii metra w przekroju tuneli**

Klasyfikacja gruntów	Grunty	Rondo Daszyńskiego Rondo ONZ 1007 m	Rondo ONZ Marszałkowska 770 m	Marszałkowska Nowy Świat 653 m	Nowy Świat Powiśle 825 m	Powiśle Praga Centrum 1327 m	Praga Centrum Dworzec Wileński 857 m
Grunty ilaste	iły, iły pylaste						
Zwarte grunty gliniaste	gliny, gliny pylaste, piaszczyste, warwowe		2%	78%	100%	61%	57%
Gliny piaszczyste	gliny piaszczyste, przewarstwione piaskami gliniastymi	25%	60%			17%	6%
Piaski gliniaste	piaski gliniaste						
Grunty gliniaste	gliny, gliny pylaste, przewarstwione iłami	70%	1%			4%	7%
Grunty pylaste	pyły, pyły piaszczyste,						
Piaski drobne i pylaste	drobne piaski, piaski pylaste	5%	5%	15%		18%	7%
Piaski średnie i grube	piaski średnie i grube		30%	7%			11%
Grunty gruboziarniste	żwiry, pospółki		2%				12%
Grunty organiczne	namuły piaszczyste i gliniaste						

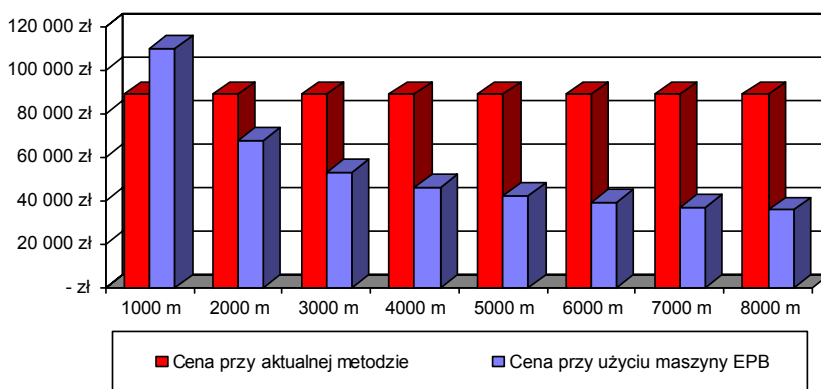
**4. Tarcze zmechanizowane TBM — szybko i tanio**

Biorąc pod uwagę spodziewane warunki gruntowe i wodne, konieczność pokonania przeszkody wodnej, a przede wszystkim wysoce zurbanizowany charakter stolicy, jedynym sensownym rozwiązaniem w budowie II linii jest zastosowanie zamkniętych zmechanizowanych tarcz pełnoprzekrojowych TBM.

Urządzenia te umożliwiają bezpieczne drażnienie tuneli w całym spektrum warunków hydrogeologicznych [5]. W zależności od planowanego zakresu zastosowania, ich konstrukcje i sposoby realizacji podstawowych czynności, tj. urabiania, podparcia przodka, odstawy urobku oraz wznoszenia obudowy, są różnie rozwiązywane i w indywidualny sposób dla planowanego przedsięwzięcia projektowane. TBM mają zastosowanie przy budowie podziemnych systemów komunikacyjnych w zawodzionych gruntach i słabych skałach, szczególnie tam, gdzie przy niewielkich nadkładach wymagane jest natychmiastowe podparcie

gruntu, minimalizacja osiadań terenu, ochrona zabudowy naziemnej i infrastruktury podziemnej, eliminacja zakłóceń komunikacyjnych. Tarcze tunelowe nie zastępują innych metod drążenia tuneli, są jednak technicznie i ekonomicznie uzasadnioną alternatywą możliwością wobec tych metod na długich dystansach, tam, gdzie oczekiwany jest wysoki postęp robót, oraz wszędzie tam, gdzie istnieją duże wymagania ochrony powierzchni [4].

Według autorów artykułu budowa tuneli metra w oparciu o nowe technologie i właściwą organizację techniczno-ekonomiczną może być o ponad 30% tańsza od obecnie realizowanej już przy drążeniu tuneli z postępowaniem 12 m/dobę. Aby to w pełni osiągnąć, należy dla zmechanizowanych tarcz zagwarantować racjonalne zakresy robót tunelowych wynoszące ok. 4000 m (rys. 2).



**Rys. 2.** Koszty drążenia 1 metra tunelu w zależności od zakresu robót dla warunków stołecznych

Traktując to jako aksjomat, można stwierdzić, że szybka, przemyślana urbanistycznie i technologicznie budowa jest zawsze tańsza i efektywniejsza od działań etapowych, uzależnionych od decyzji o przyznaniu odpowiednich funduszy, czy też skromnych rocznych budżetów.

Zastosowanie zmechanizowanych tarcz dla budowy metra zapewnia pełną mechanizację wszystkich operacji technologicznych, wysoki postęp robót, dokładny profil wyłomu, najmniejsze z możliwych oddziaływanie na powierzchnię, wysoki poziom bezpieczeństwa załóg tunelowych, ochronę środowiska zapewniającą nienaruszalność powierzchni i poziomów wód gruntowych oraz minimalną ingerencję w rodzimy górotwór [5]. Nowa technologia drążenia tarczami TBM gwarantuje zastosowanie wysokiej jakości i ekonomicznej betonowej obudowy tuneli [12].

Przed podjęciem decyzji o zastosowaniu tarcz TBM należy brać jednak pod uwagę długi czas prac projektowania, wytworzenia i kompletacji tarcz, czasochłonne wdrażanie metody, trudne i kosztowne przygotowanie placu budowy, szczególnie gdy wymagana jest

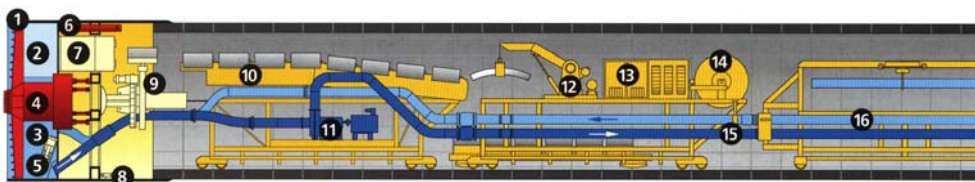
budowa zakładu separacji i regeneracji płuczki oraz konieczność indywidualnego zaprojektowania obudowy tunelu dla parametrów geometrycznych i mechanicznych tarczy oraz przebiegu trasy [5, 6].

W warunkach warszawskich rozważać należy użycie następujących tarcz zmechanizowanych:

- tarcze zamknięte z zawieszoną płuczką w komorze roboczej,
- tarcze zamknięte z równoważeniem parcia gruntu w przestrzeni roboczej.

#### 4.1. Tarcza zamknięta zawieszinowa [5]

Tarcze zawieszinowe, lub inaczej — płuczkowe (rys. 3), zostały skonstruowane do drążenia tuneli w zawodnionych gruntach o niskiej kohezji, głównie piaskach i żwirach z niewielką zawartością glin i ilów.



**Rys. 3.** Przekrój tarczy zawieszinowej: 1 — głowica urabiająca, 2 — komora z poduszką sprężonego powietrza, 3 — zawieszina płuczki, 4 — zespół napędowy z silownikami posuwu głowicy, 5 — kruszarka, 6 — silowniki główne, 7 — komora śluzowa, 8 — silownik skrętu tarczy, 9 — układarka obudowy, 10 — przenośnik segmentów obudowy, 11 — pompa płuczkowa, 12 — dźwig dla przeladunku segmentów obudowy, 13 — elektryczny zespół zasilający, 14 — bęben kablowy, 15 — rurociąg odstawy zawiesziny, 16 — rurociąg dostarczający płuczkę

W komorze roboczej tarczy wypełnionej płuczką pracująca głowica powoduje urabianie calizny i mieszanie jej z płuczką. Urobek wraz z płuczką w postaci zawiesziny pompowany jest na zewnątrz tunelu do separatorów, gdzie następuje oddzielenie go od płuczki, która po regeneracji pompowana jest z powrotem do przestrzeni roboczej tarczy. Płuczka ilowa spełnia w tym systemie dwa zadania. Poddana odpowiedniemu ciśnieniu w komorze roboczej utrzymuje stateczność czoła wyrobiska i przeciwdziała napływowi wody gruntovej oraz stanowi medium, w którym urobek jest hydraulicznie transportowany na powierzchnię. Właściwe dla stateczności przodka ciśnienie zawiesziny regulowane jest sprężonym powietrzem dostarczającym do specjalnej przegrody w konstrukcji komory roboczej. Dostawa sprężonego powietrza do komory roboczej wykorzystywana jest również do pracy w nadciśnieniu w przypadku przeglądów i napraw w komorze roboczej. Tarcze zawieszinowe są szczególnym rozwiązaniem ze względu na wprowadzenie dodatkowego medium do procesu tunelowania.



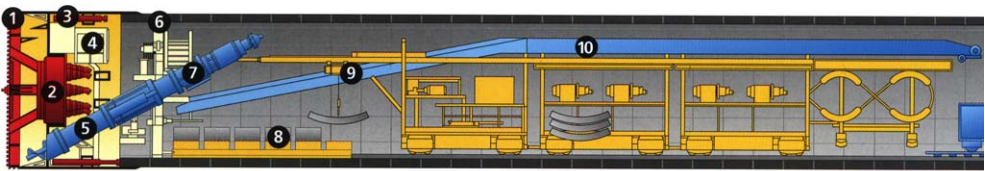
Oprócz wspólnych wszystkim rodzajom tarcz problemów, dotyczących parametrów mechanicznych i wytrzymałościowych, a także logistycznych, przy stosowaniu tarcz zawieszinowych pojawiają się nowe, takie jak:

- dobór właściwej do warunków geotechnicznych płuczki i kontrola jej składu;
- dobór i konstrukcja urządzeń do regulacji ciśnienia zawiesiny;
- zaprojektowanie i konserwacja pomp, rurociągów, separatorów i regeneratorów płuczki;
- konstrukcja kruszarki w komorze roboczej przed wlotem rurociągu odstawy zawiesiny.

Właściwy dobór płuczki, tak pod względem składu, jak i jej właściwości, jest niezwykle ważnym elementem. Z jednej strony istotne jest, by płuczka wymieszana z urobkiem była łatwopompowalna, stwarzając jak najmniejsze opory, a z drugiej strony aby posiadała odpowiednią do danych warunków geotechnicznych lepkość. Godząc te dwa przeciwstawne sobie wymogi, projektanci i konstruktorzy tarcz muszą znaleźć właściwy kompromis.

#### 4.2. Tarcze zamknięte równoważące parcie gruntu EPB [5]

Tarcze zamknięte równoważące parcie gruntu (rys. 4), w literaturze angielskojęzycznej nazywane *earth-pressure balance system* (EPB), w pierwotnych założeniach zostały skonstruowane dla gruntów spoistych, które wypełniając komorę roboczą, poddane naciskom od posuwu tarczy, potrafią skutecznie utrzymać stabilność czoła tunelu. Są one wyposażone w ślimakowy przenośnik urobku z zaworem pozwalającym skutecznie uszczelnić komorę roboczą w czasie pracy tarczy tak, by zapobiec wdarceniu się wody do wnętrza tunelu. Budowa tego typu tarczy różni się od tarczy zawieszinowej tym, że nie posiada w komorze roboczej ścianki kontaktowej, za którą tworzy się poduszka powietrzna doprężająca zawieszinę, brak w niej również hydraulicznego systemu transportu urobku, systemu separatorów i uzdatniania płuczki, a także kruszarki.



**Rys. 4.** Przekrój tarczy EPB: 1 — głowica urabiająca, 2 — zespół napędowy, 3 — silowniki główne, 4 — śluza powietrzna, 5 — przenośnik ślimakowy, 6 — układarka, 7 — wysyp przenośnika ślimakowego, 8 — podajnik segmentów, 9 — dźwig do przenoszenia segmentów, 10 — przenośnik taśmowy

Tarcze te w swej klasycznej konstrukcji mniej nadają się do pracy w gruntach niestacycznych, sypkich, z małą zawartością cząstek ilastych. W takich gruntach mogą wystąpić trudności z utrzymaniem szczelności przenośnika ślimakowego i utrzymaniem równowagi ciśnień. Zmodyfikowana tarcza wyrównanych ciśnień, nazywana plastyfikatorową, mułową

lub błotną, rozszerza zakres stosowania tych tarcz o grunty niespoiste. Innowacja polega na wprowadzeniu przed głowicę skrawającą, do komory roboczej i wnętrza przenośnika ślimakowego plastyfikatora w postaci gęstej zawiesiny lub piany polimerowej. Urobek poddany takiemu zabiegowi w komorze roboczej nabiera właściwości plastycznego gruntu spoistego, staje się nieprzepuszczalny dla wody, a ściśnięty w komorze roboczej stanowi doskonałe podparcie przodka i równowagę ciśnienia wody gruntowej. Dodatkową zaletą tej innowacji jest zmniejszenie oporów podczas rozruchu tarczy oraz uszczelnienie przenośnika ślimakowego. Rozwiązanie tego typu jest już standardem w tarczach EPB wykonywanych wspólnie. Ponieważ tarcze te w odróżnieniu od tarcz zawieszonych nie posiadają kruszarki, ich głowice zaopatrzone są w dyski skrawające dla kruszenia napotkanych głazów i otoczków do takich rozmiarów, by za pomocą przenośnika ślimakowego można je było przetransportować z komory roboczej na środek odstawy głównej w tunelu.

### 4.3. Rozwiązania wspólne dla omówionych typów tarcz

W nowoczesnych tarczach tunelowych bez względu na typ stosowane są takie same lub bardzo podobne rozwiązania następujących problemów:

- uszczelnienie ogona tarczy,
- rodzaj i montaż obudowy,
- wypełnienie pustki za obudową.

Do uszczelnienia powstałego luzu pomiędzy płaszczem tarczy a zmontowaną pod jego osłoną obudową tunelową służą uszczelki ślizgowe o różnej konstrukcji z metalu, tworzywa sztucznego lub gumy neoprenowej. Obecnie powszechnie stosowane są szczotki stalowe, pomiędzy które wtłaczany jest specjalny smar.

Równoległe do rozwoju technologii tarczowego drażenia tuneli zanikało zainteresowanie segmentową obudową żeliwną. Wyraźnie tańsze segmentowe obudowy żelbetowe wyparły wcześniej powszechnie stosowaną stal i żeliwo [3, 12]. Jedynie w nielicznych przypadkach stosownie do warunków geologicznych i specyficznych wymogów stosuje się jeszcze obudowę żeliwną.

Rzadkim już przykładem stosowania obudowy żeliwnej w tunelach szlakowych jest projekt warszawskiego metra, gdzie nadal dla uszczelnienia złączy pomiędzy segmentami używany jest drut ołowiany, a dla uzyskania zaprojektowanych przechyłów i skrętów tunelu stosowane są między równoległościennymi pierścieniami zbieżne wkładki żeliwne o różnej grubości i zbieżności. W nowoczesnych segmentowych obudowach betonowych kwestia skrętów realizowana jest przez zastosowanie pierścieni prostych, prawo- i lewozbieżnych albo wyłącznie prawo- i lewozbieżnych. Odpowiednie sekwencje ich układania wzdłuż osi tunelu pozwalają zarówno na uzyskanie zaprojektowanych łuków w poziomie, jak i uzyskanie wzniosłów lub spadków [3].

Połączenia segmentów obudowy betonowej uszczelniane są w dwojaki sposób. Najczęściej stosowane są ściśliwe uszczelki neoprenowe lub z EPDM. Innym rozwiązaniem są

uszczelki hydrofilne. Posiadają one właściwość pęcznienia w środowisku wodnym. Są one jednak nieprzydatne w warunkach zmian poziomu lustra wody ze względu na stopniową utratę tej właściwości [12]. Każdy rodzaj uszczelnienia jest indywidualnie projektowany dla warunków hydrogeologicznych i technicznych danego tunelu i maszyny, która ma go drażyć.

Przystępując do budowy tuneli metodą TBM, należy liczyć się z koniecznością opracowania indywidualnego projektu obudowy dostosowanego do danej tarczy i lokalnych warunków gruntowych i wodnych. Zwykle projektant takiej obudowy ściśle współpracuje z wykonawcą tarczy.

Jedną z przyczyn osiadania terenu w wyniku drażenia jest powstawanie pustki za obudową po przesuwie tarczy o większej średnicy niż zewnętrzna średnica obudowy [5]. W celu minimalizacji osiadania prowadzi się iniekcję pierwotną oraz wtórną, zwaną również uszczelniającą. Iniekcję pierwotną wykonuje się natychmiast po zmontowaniu obudowy na dwa sposoby. Pierwszy polega na podawaniu iniektu przez plecy obudowy, przy wykorzystaniu specjalnie do tego celu zaprojektowanych otworów w poszczególnych segmentach. Drugi, nowocześniejszy, polega na podawaniu zaczynu cementowego przez ogon tarczy. Po uruchomieniu posuwu tarczy, przez specjalną instalację, w jej tylnej części wykonywana jest iniekcja pierwotna. Iniekcja wtórna eliminująca powstający skurcz betonu oraz dodatkowo wypełniająca ewentualne pustki wykonywana jest od 40 do 100 m za postępem tarczy przez otwory w segmentach.

#### 4.4. Kryteria wyboru

Właściwy wybór systemu drażenia i dobór tarczy tunelowej TBM musi być poprzedzony dokładnym rozpoznaniem geologicznym i geotechnicznym trasy tuneli oraz decyzją o wyborze systemu budowy tuneli szlakowych: jednego tunelu dwutorowego bądź dwóch jednotorowych.

Warunki gruntowe i hydrogeologiczne są podstawowym czynnikiem determinującym dobór tarczy dla drażenia tuneli w miękkich skałach [8, 9]. Innymi ważnymi elementami są czynniki topograficzne i demograficzne. Zabudowa miejska znieść musi deformację terenu, która zależy od zastosowanego systemu drażenia. Znane kryteria wyboru systemu bazują w większości na charakterystykach gruntów uwzględniających jedynie parametry związane z rozkładem uziarnienia. Ważne jest, aby rozważać kompletne zasady klasyfikacji gruntów [8]. Istotne są dane dotyczące wilgotności naturalnej, wskaźnika płynności i stanów wód gruntowych i ich ciśnienia. Analiza opisanych w literaturze zastosowań tarczowych systemów drażenia tuneli nie pozwala na prosty wybór według pierwotnej zasady — „grunty spoiste = tarcza EPB (wyrównanych ciśnień), grunty sypkie = tarcza zawieszinowa” [11]. Dobrze dobrany system drażenia musi zapewnić minimalizację osiadania terenu i osiągnięcie założonych postępów, a także optymalizację kosztów.

W przypadku występowania drastycznych zmian warunków geologicznych i hydrogeologicznych idealnym rozwiązaniem jest możliwość zastosowanie tarcz wielosystemowych, mogących pracować w sposób optymalny dla danych warunków [5].

Dwa alternatywne systemy drażenia zapewniają porównywalne postępy, używają tej samej obudowy, różnią się zasadniczo sposobem podparcia przodka, a w konsekwencji trans-

portem urobku na powierzchnię. O ile w systemie EPB na powierzchnię wydobywany jest mechanicznie grunt rodzimy lub nieco zmodyfikowany zawartością plastyfikatora, to w systemie zawieszinowym transport urobku na powierzchnię odbywa się hydraulicznie. Niezbędny jest zespół separatorów dla rozdzielenia urobku i płuczki oraz urządzenia regenerujące płuczkę, co wymaga dodatkowej powierzchni na placu budowy, o którą nieraz trudno w warunkach miejskich. Urządzenia separacji podnoszą koszt zakupu tarczy oraz zwiększają koszt drażenia tunelu.

Osobnym zagadnieniem jest wybór systemu równoległych tuneli szlakowych lub alternatywnie budowy tunelu dwutorowego. Wybór nie jest łatwy z kilku powodów. Większość wybudowanych układów podziemnej komunikacji miejskiej składa się z równoległych tuneli szlakowych. Nawet w bardzo głębokim metrze londyńskim zasada ta jest praktykowana. Statystyki podają, że ok. 90% systemów komunikacyjnych zbudowanych jest w ten sposób. Przemawiają za tym głównie wymogi bezpieczeństwa.

Bardzo ciekawe jest porównanie ilości uzyskanego urobku z 1 mb postępu tuneli. Z dwóch tuneli o średnicy wyłomu 5,9 m uzyskuje się 54,65 m<sup>3</sup> urobku, podczas gdy z tunelu dwutorowego o średnicy 9,96 m wielkość ta wynosi 77,7 m<sup>3</sup>. To ponad 40% więcej. Na dodatek trzeba pamiętać, że ok. 20% tego urobku zostanie niepotrzebnie wybrane ze względu na niewykorzystaną przestrzeń w obszarze podtorza, która zostanie wypełniona betonem podtorza. Bardzo ciekawie wygląda również porównanie ilości obudowy dla obu wariantów. Dla tunelu o średnicy wyłomu 9,96 m, średnicy zewnętrznej obudowy 9,8 m i grubości 40 cm objętość obudowy na 1 m postępu wynosi 11,8 m<sup>3</sup>. Dla dwóch tuneli jednorodowych przy średnicy zewnętrznej obudowy 5,65 m i grubości 22,5 cm ilość ta wyniesie 7,66 m<sup>3</sup>. Powyższe porównania oprócz wymogów bezpieczeństwa przemawiają na korzyść budowy równoległych tuneli jednorodowych. Dodatkowo za wyborem budowy tuneli jednorodowych przemawia łatwiejsze urabianie calizny mniejszą średnicą w trudnych warunkach geologicznych. Tarcze dla tuneli dwutorowych, ze względu na swój rozmiar, wymagają większych momentów obrotowych dla pokonania oporów podczas rozruchu oraz w trudnych gruntach [6].

Tunele jednorodowe ze względu na mniejszą średnicę wymagają mniejszego nadkładu, co pozwala na płytszą lokalizację stacji. Tunel dwutorowy wymaga głębszego posadowienia stacji metra.

Ostateczny wybór rozwiązania nie jest prosty i decydują o nim tak względy techniczne, bezpieczeństwa, jak i czynniki ekonomiczne

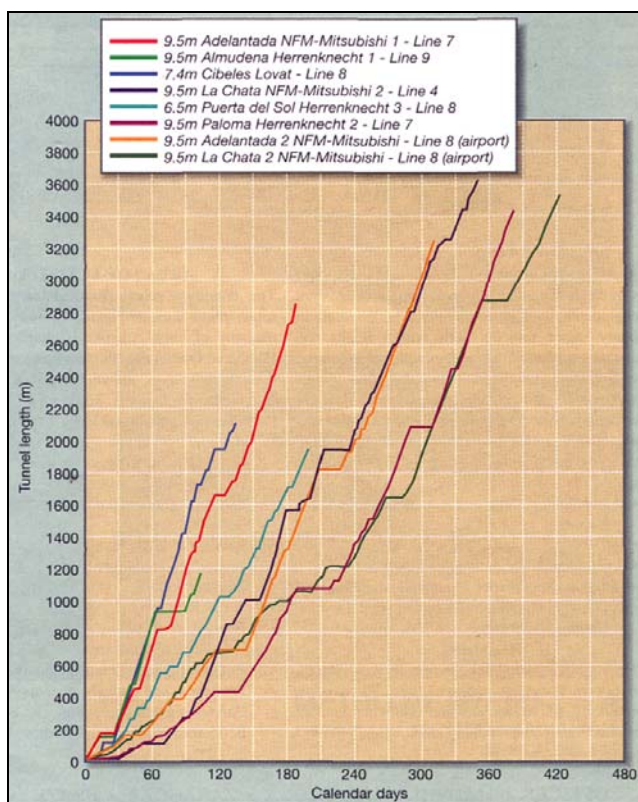
#### **4.5. Doświadczenia madryckie**

Do doskonałym przykładem realizacji szybkiej, taniej i nowoczesnej technologicznie budowy metra jest rozbudowa podziemnej kolei miejskiej w Madrycie (rys. 5) [10]. Zakres rozbudowy metra w Madrycie dotyczył wydrążenia 37,6 km trasy w większości dwutorowych tuneli, zbudowania 34 nowych stacji i zakupu 226 nowych wagonów. Zadanie zrealizowano w ciągu czterech lat z ceną jednostkową 42,8 mln USD/km. Nietrudno przeliczyć, że jeden metr trasy wraz z stacjami i taborem kosztował ok. 130 000 zł. Zadanie zrealizowano dziewięcioma tarczami TBM. W tym miejscu wypada przypomnieć, że metr postępu tunelu szlakowego bez torowiska i wyposażenia w Warszawie kosztuje około 90 000 zł, co

w przeliczeniu na trasę dwutorową daje sumę 180 000 zł. Do tego należy doliczyć jeszcze koszty budowy stacji, wyposażenia tuneli i zakupu niezbędnego taboru.

Warto krótko wyjaśnić przyczynę tak drastycznej różnicy między realizacją warszawską a madrycką. Warszawska budowa metra jest jednym z nielicznych przykładów stosowania żeliwnej obudowy tuneli z uszczelnieniem ołowianym. Jest ona kilkakrotnie droższa od obudowy betonowej powszechnie stosowanej na świecie. Drugim i ważnym powodem jest znikomy postęp robót przy niezwykle pracochłonnym ręcznym urabianiu calizny i mało zmechanizowanym procesie stawiania i uszczelniania obudowy [4].

Rozbudowa metra w Madrycie jest tylko jednym z wielu przykładów wzorcowego podejścia do problemu technicznego i ekonomicznego.



Rys. 5. Zaobserwowane postępy drążenia tarcz EPB w Madrycie [6]

Uzyskiwane przez tarcze TBM duże postępy dobowe wymagają odpowiedniej lokalizacji wytwórni segmentów obudowy i zapewnienia ich terminowych dostaw na plac budowy. Jest to niezwykle trudne w warunkach wielkomiejskich. Potrzebne są duże place składowe, by nie powstawały przestoje w pracy tarczy. Ponieważ charakter pracy tarczy pozwa-

ła na wykonywanie jednym przemarszem wielu kilometrów trasy tunelowej, istnieje możliwość lokalizacji szybu startowego z placem składowym dla obudowy poza najbardziej zurbanizowaną częścią miasta. W przeciwnym wypadku należy tak przeanalizować drogi odstawy urobku i dostawy obudowy, by zapewniona była ciągłość procesu technologicznego. Przykładem takiej analizy i nietypowych rozwiązań może być budowa stacji „Parlament” i rozbudowa Linii Jubilee w Londynie. Transport urobku i dostawa obudowy oraz innych materiałów wsadowych odbywała się barkami po Tamizie. Podobne rozwiązania miały miejsce w Paryżu. W aglomeracjach miejskich bez takich możliwości rozwiązaniem może być transport kolejowy w połączeniu z transportem samochodowym. Oczywiście tego typu rozwiązania wymagają właściwej analizy. Jest ona niezbędna i obok wyboru tarczy niezwykle ważna. Jeszcze jedna uwaga na temat transportu wydaje się wskazana. O ile dostawa obudowy może odbywać się w godzinach najmniejszego ruchu drogowego, w godzinach nocnych, z możliwością składowania dobowego zapasu obudowy na zminimalizowanym placu, to odstawa urobku wymaga rytmiczności przez całą dobę.

Decyzja wyboru tarczy, a tym bardziej systemu drażenia, jest niezwykle trudna i odpowiedzialna ze względu na koszty i konsekwencje techniczne. Brak odpowiedniej wiedzy i doświadczenia powoduje, że bardzo często słyszy się głosy niezadowolenia i rozczarowania z powodu uzyskiwania małych postępów i dużych osiadań, podczas gdy przyczyny nie należy szukać w metodzie drażenia, a w źle podjętych decyzjach wyboru tarczy i systemu.

Rozbudowa metra w Warszawie może być sukcesem technologicznym i finansowym nie mniejszym niż w Madrycie pod warunkiem wspólnego działania urbanistów, inżynierów górników i ekonomistów.

#### LITERATURA

- [1] *Gerber B., Paszcza H., Pękacki W., Pęski S., Sapijaszko A., Skawiński E.*: Doświadczenia z budowy tuneli i stacji metra w Warszawie i perspektywy rozbudowy. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, 1998
- [2] *Grodecki W.*: Budownictwo podziemne jednym z czynników zapewnienia zrównoważonego rozwoju. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, nr 4, 2004
- [3] *John A., Hart R.*: Porównanie, doświadczenia i rozwój zastosowań segmentowej obudowy betonowej w Europie, Ameryce Północnej i na Dalekim Wschodzie. *Charcon Tunnels Inc., RETC Proceeding* 1987
- [4] *Kosmalski M., Kozłowski R.*: Nowoczesne zmechanizowane tarcze do drażenia tuneli metra w zawodniowych gruntach i słabych skałach. *Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria*, 2004
- [5] *Maidl B., Herrenknecht M., Anheuser L.*: *Mechanised Shield Tunnelling*. Ernst & Sohn 1996
- [6] *Melis M.*: Wyniki działań maszyn EPB. *Tunnels & Tunnelling International*. XXI–XXII, marzec 1999
- [7] *Podolski J.*: Metro w Warszawie — 70 lat projektowania, zmiany koncepcji i przerwanej realizacji. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 12, 1995
- [8] *Steiner W.*: Criteria for selecting mechanised tunnelling system in soft ground. *Conference North American Tunneling*, Belkema 1996
- [9] *Steiner W.*: Geomechaniczne warunki drażenia tuneli z zastosowaniem maszyn TBM. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, nr 1, 2001
- [10] *T & T.* Tunelami w XXI wiek. *Tunnels & Tunnelling International*, IV–V, marzec 1999
- [11] *Wayss & Freytag AG.*: Kryteria wyboru maszyn TBM na praktycznych przykładach
- [12] *Winterton T.R.*: Postęp w dziedzinie prefabrykacji betonowej obudowy tunelowej w Wielkiej Brytanii. *Mat. C.V. Buchan Ltd.*