

WOJCIECH GRODECKI

dr inż., Politechnika Warszawska,
Zakład Geotechniki i Budowli
Podziemnych, al. Armii Ludowej 16,
00-637 Warszawa,
e-mail: w.grodecki@il.pw.edu.pl

ANNA SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA

prof. dr hab. inż., Politechnika War-
szawska, Zakład Geotechniki i Budowli
Podziemnych, al. Armii Ludowej 16,
00-637 Warszawa,
e-mail: a.lewandowska@il.pw.edu.pl

Metody budowy tuneli metra w gruntach¹

Streszczenie. W artykule omówiono metody budowy tuneli metra – szlakowych i stacyjnych w gruntach. Wobec istniejących planów rozbudowy II linii metra w Warszawie, a także perspektywy podjęcia prac nad budową metra w innych miastach Polski, takich jak Wrocław czy Kraków, przedstawiono zalety rozwiązania podziemnego w stosunku do naziemnego transportu miejskiego. Opisano sposoby wykonania stacji i szlaku w zwartej zabudowie miejskiej z wykorzystaniem metod odkrywkowych, takich jak metoda mediolańska (inaczej nazywana stropową) oraz berlińska. Krótko przedstawiono metody opanowywania wody gruntowej. Jako alternatywę do budowy tuneli szlakowych metra metodami odkrywkowymi opisano metody zmechanizowane drażnienia tuneli tarczami. Krótko przedstawiono schematy pracy i działania tarczy zawieszinowej (*slurry shield*) i wyrównywanych ciśnień gruntowych (EPB). Podano również schematy i przykłady podziemnych stacji metra budowanych na obszarach silnie zurbanizowanych.

Słowa kluczowe: metro, tunel, budowa metra, budowa tuneli

Dlaczego budować metro

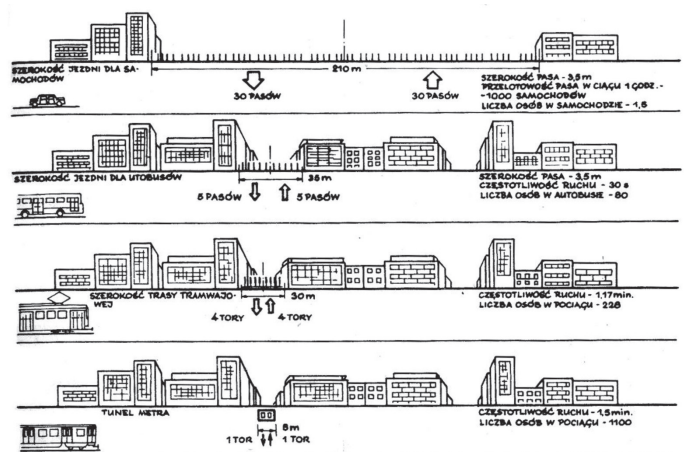
Metro jest powszechnie uważane za najlepszy, masowy środek komunikacji na terenie dużych miast. Jest to środek bardzo pojemny, charakteryzujący się bardzo wysoką zdolnością przewozową. W przypadku tzw. metra ciężkiego może ona osiągać nawet 50 tysięcy pasażerów na godzinę w jednym kierunku. Metro jest szybkie – średnia prędkość handlowa waha się w granicach 35–40 km/godz., jest bezkolizyjne i w większości przypadków – komfortowe. Usytuowane w tunelach, najczęściej pod ulicami, z powodzeniem zastępuje komunikację tramwajową lub autobusową na tym samym kierunku.

Ciekawym studium przeprowadzonym przez M. Rataja [1] jest przedstawiona na schemacie (rys.1) oszczędność terenu przy założeniu przewozu podobnej liczby pasażerów samochodami osobowymi, autobusami, tramwajami i metrem. Powierzchnia kosztownego, miejskiego terenu, zaoszczędzona dzięki funkcjonowaniu metra w tunelach w miejsce innych środków komunikacji, może być przeznaczona na inne cele np. na rekreację, zielen, sport itp.

Na przykładzie Warszawy daje się dostrzec dalsze korzyści z budowy metra. Tereny budowlane w obszarachciągających do linii metra stają się coraz droższe, a mieszkania w domach już istniejących również znacznie podniosły swoją wartość.

W rozważaniach na temat: budować czy nie budować metro, najważniejsze jest uzasadnienie przyjętej decyzji. Jednym z argumentów za budową jest ocena niemożliwości realizacji przewozów pasażerskich na danym kierunku naziemnymi środkami komunikacji zbiorowej w perspektywie kilkunastu, a niekiedy kilkudziesięciu lat. Nie należy też zapominać o miastotwórczej roli metra. Z drugiej strony równie decydującym czynnikiem jest zapewnienie ciągłego finansowania takiej inwestycji.

W ramach prac przedprojektowych konieczna jest też analiza takich rozwiązań, jak na przykład wybór sposobu zasilania taboru – z sieci górnej czy z tzw. trzeciej szyny. Ma to wpływ, między innymi, na wymiary wewnętrzne tuneli międzystacyjnych-szlakowych. Z kolei wybór tuneli jedno- lub dwutorowych w dużym stopniu wpływa na rozwiązanie konstrukcji stacji. W przypadku tuneli jednotorowych racjonalne są stacje z peronem wyspowym, a w przypadku tuneli dwutorowych lepsze są stacje z peronami bocznymi. Na wybór tuneli szlakowych jedno- czy dwutorowych ma wpływ, między innymi, ich zagłębienie i w konsekwencji wybór metody ich budowy. Tunele płytko położone pod ulicami są najczęściej wykonywane metodami odkrywkowymi, w jednym wykopie, stąd bardziej uzasadnione jest, by były to tunele dwutorowe. Jeżeli natomiast tunele szlakowe usytuowane są na większej głębokości, zazwyczaj większej od ich średnicy, to oba rozwiązania tj. tunele jedno- i dwutorowe mogą być racjonalne. Oba mają wady i zalety, chociaż dwa tunele jednotorowe wymagają mniejszej objętości wyrobiska niż jeden tunel dwutorowy. To rozumowanie odnosi się przede wszystkim do tuneli wykonywanych



Rys. 1. Oszczędność terenu w mieście
Źródło: [1]

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2015. Wkład autorów w publikację: W. Grodecki 50%, A. Siemińska-Lewandowska 50%.

zmechanizowaną metodą tarczową, a taką obecnie najczęściej buduje się tunele metra na świecie.

Wspólną troską budowniczych obiektów podziemnych jest zapewnienie bezpieczeństwa w trakcie budowy i w okresie ich eksploatacji – bezpieczeństwa osób pracujących pod ziemią, bezpieczeństwa realizowanej budowl i tzn. zapewnienia jej stateczności oraz bezpieczeństwa budowli naziemnych i podziemnych, sąsiadujących z wykonywanym obiektem. Taki stan można osiągnąć, jeżeli projekt zostanie opracowany na podstawie odpowiedniego rozpoznania warunków gruntowych i wodnych, w jakich powstawać będzie tunel oraz dobranie właściwej dla tych warunków metody budowy.

Na wybór metody budowy tuneli w dużym stopniu mają wpływ warunki geologiczne, geotechniczne i hydrogeologiczne oraz sytuacja na powierzchni terenu, głównie jego zabudowa. Najogólniej te metody można podzielić na: odkrywkowe, gdy obudowa tunelu powstaje w wykopie i podziemne, gdy tunel budowany jest bez naruszania powierzchni terenu. Inny podział metod budowy tuneli można przeprowadzić z punktu widzenia środowiska, w którym będą one budowane, a więc w gruntach lub w skałach.

Budowa tuneli w gruntach

Do najbardziej rozpowszechnionych i najczęściej stosowanych metod budowy tuneli w gruntach należą:

- metody odkrywkowe, których przedstawicielami są:
 - metoda metra mediolańskiego z jej odmianą (w Polsce przyjęły się odpowiednio nazwy – „metoda stropowa” i „metoda ścian szczelinowych”),
 - metoda berlińska;
- metody tarczowe
 - tarcza tradycyjna (z niezmechanizowanym urabianiem gruntu),
 - tarcze zmechanizowane tzw. TBM (Tunnel Boring Machines).

Metoda metra mediolańskiego

Stosowane są dwie jej odmiany, różniące się sekwencją faz budowy. Klasyczna metoda metra mediolańskiego (stropowa) polega na:

- wykonaniu konstrukcji ścian szczelinowych z powierzchni terenu lub z dna wstępnego wykopu, stanowiących najczęściej ściany przyszłego tunelu;
- wybraniu gruntu spomiędzy tych ścian do poziomu nieco poniżej przyszłego stropu tunelu;
- wykonaniu na odpowiednio wykonanym podłożu, na gruncie, konstrukcji stropu tunelu;
- zasypanie stropu tunelu z dobrym zagęszczeniem zasypki i zagospodarowanie powierzchni terenu zgodnie z projektem;
- wybranie gruntu spod stropu tunelu do poziomu nieco poniżej przyszłej płyty dennej. W przypadku stacji metra o wielu kondygnacjach podziemnych wybieraniu tego gruntu może towarzyszyć albo wykonywanie kolejnych stropów niższych kondygnacji, albo kotwienie lub rozpieranie ścian szczelinowych;
- wykonanie płyty dennej (fot. 1).

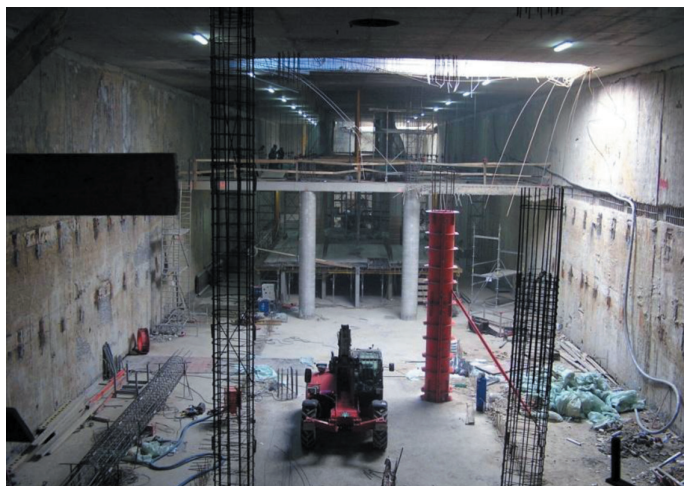
Odmiana tej metody polega na tym, że:

- po wykonaniu ścian szczelinowych przystępuje się do urabiania gruntu do poziomu nieco poniżej przyszłej płyty dennej. Ściany szczelinowe w tej fazie pełnią rolę ścian oporowych, przenoszących parcie gruntu.

Z uwagi na konieczność zachowania ich stateczności i wytrzymałości są one albo rozpierane najczęściej rozporami stalowymi, albo kotwione sprężonymi kotwami iniekcyjnymi:

- w kolejnej fazie betonuje się płytę denną, jak w metodzie stropowej, a następnie betonuje się strop tunelu, opierając go na ścianach szczelinowych,
- ostatnią fazą jest wykonanie zasypki tunelu i zagospodarowanie powierzchni terenu.

Klasyczna metoda mediolańska (stropowa) znalazła zastosowanie np. w budowie stacji Metra Warszawskiego. Ma ona tę zaletę w stosunku do swej odmiany, że pozwala na skrócenie czasu zajęcia terenu nad budowanym tunelem i, co szczególnie jest ważne w miastach, pozwala na szybkie odtworzenie np. nawierzchni ulic i przywrócenie



Fot. 1. Wnętrze stacji A19 „Marymont” na I linii metra w Warszawie (w budowie)
Źródło: [2]



Fot. 2. Ściany szczelinowe kotwione wykopu stacji „Świętokrzyska” na I linii metra w Warszawie
Źródło: [3]

na nich ruchu pomimo dalej prowadzonych prac przy budowie stacji.

Zastosowanie odmiany metody mediolańskiej jest uzasadnione zwłaszcza wówczas, gdy technologia budowy ścian szczelinowych budzi obawy, co do ich szczelności lub szczelności styków segmentów ścian i projektant z góry zakłada, że będą one pełnić tylko rolę ścian oporowych, zapewniających stateczność pionowych skarp wykopu, a zasadnicza konstrukcja tunelu powstanie pomiędzy tymi ścianami.

Dość często zamiast ścian szczelinowych stosuje się ściankę z naprzemiennie wykonanych pali betonowych i żelbetowych, zachodzących na siebie w planie albo z zachowaniem niewielkiego odstępu pomiędzy nimi. Innym sposobem zapewnienia stateczności pionowych ścian wykopu jest wprowadzenie do gruntu stalowych grodzic. W obu przypadkach konieczne jest ich rozpieranie lub kotwienie.

Metoda berlińska

Zastosowana w latach 30. ubiegłego wieku przy budowie metra w Berlinie. Zachodzi znaczne podobieństwo następstw faz budowy tunelu tą metodą i metodą ścian szczelinowych, jej odmianą. Rolę ścian szczelinowych jako ścian oporowych, podtrzymujących pionowe skarpy wykopu, pełni tzw. ścianka berlińska. Składa się ona z wprowadzonych do gruntu (niezależnie od sposobu) dwuteowych pali stalowych w rozstawie na ogół nie przekraczającym 2,5 metra, licząc wzdłuż osi przyszłego tunelu. W kolejnej fazie pogłębia się wykop pomiędzy palami i sukcesywnie zakłada tzw. opinkę (poszycie) – drewnianą, niekiedy żelbetową lub stalową. Aby pod wpływem poziomego parcia gruntu nie dochodziło do nadmiernych deformacji ścianek (pali) – rozpiera się je lub kotwi. Dopiero po osiągnięciu planowego poziomu dna wykopu następuje wykonanie konstrukcji tunelu, a następnie jego zasypanie (fot. 3.).

Z przedstawionego opisu odkrywkowych metod budowy tuneli wynika, że z wielu względów – statycznych, wytrzymałościowych, usytuowania pod ruchliwymi arteriami,



Fot. 3. Berlińska obudowa wykopu stacji „Stodowiec” na I linii metra w Warszawie
Źródło: [3]

większego zagłębienia i kiedy czas zajęcia powierzchni terenu powinien być minimalizowany – najwłaściwsza jest metoda mediolańska. Metoda berlińska może natomiast znaleźć zastosowanie do budowy podziemnych przejść łączących powierzchnie terenu z górną kondygnacją stacji, do budowy wentylatorni i innych, płytko położonych obiektów towarzyszących.

Metody opanowywania wód gruntowych na budowie stacji metra

W metodach odkrywkowych najczęściej problemów stwarza wysoki poziom wód gruntowych, stabilizujących się powyżej dna wykopu w gruntach przepuszczalnych – pozbawionych spójności. Zakładając metodę metra mediolańskiego lub jej odmianę, dopływ wody do wykopu następuje od strony jego dna. W takiej sytuacji opanowanie wody grunтовой jest możliwe przez następujące działania:

- obniżenie poziomu wód gruntowych przez ich pompowanie ze studni depresyjnych. Przy większych zagłębieniach budowli wymagana depresja może być bardzo znaczna, co wydłuży czas kosztownego pompowania oraz, co jest równie ważne, może powodować osiadanie sąsiadujących z budową obiektów, znajdujących się w zasięgu leja depresyjnego;
- wydłużenie ścian szczelinowych tak, by zostały zakotwione w gruntach nieprzepuszczalnych. W Warszawie na jednej ze stacji II linii metra ściany szczelinowe osiągnęły głębokość ponad 50 metrów;
- wykonanie szczelnego „korka” pomiędzy ścianami szczelinowymi, który zapobiegnie wpływaniu tych wód do wykopu. Można to zrealizować np.:
 - za pomocą technologii iniekcji wysokociśnieniowej tzw. *jet grouting* w gruntach o mniejszej przepuszczalności lub
 - za pomocą iniekcji niskociśnieniowej w gruntach bardziej przepuszczalnych.

Stosując te dwie technologie, uzyskuje się takie zmniejszenie współczynnika filtracji gruntu w dnie wykopu, że staje się on dla celu procesu budowy praktycznie nieprzepuszczalny. Z uwagi na dużą wartość siły wyporu wierzch wspomnianego korka zazwyczaj znajduje się o kilka metrów poniżej dna przyszłego wykopu, a pozostawiona nad nim warstwa gruntu rodzimego stanowi dodatkowy balast, przeciwstawiający się wraz z warstwą zainiektowaną wyporowi wody. Niekiedy stosuje się też dwie takie warstwy, przy czym górna usytuowana tuż poniżej dna wykopu pełni rolę dodatkowej rozpory ścian szczelinowych (rys. 2).

Metody tarczowe budowy tuneli

Trudno sobie wyobrazić, by w obecnym stanie zagęszczonego ruchu samochodowego w dużych miastach możliwe było wyłączenie z niego głównych arterii, czy choćby znaczne ograniczenie ich przepustowości. Między innymi i z tego powodu tunele międzystacyjne nie powinny być budowane metodami odkrywkowymi. Nie jest też możliwe

zastosowanie do budowy tych tuneli klasycznych metod górniczych z uwagi na ich powolność i wysokie koszty, a także dotąd stosowanej tradycyjnej metody tarczowej. Używana w tej metodzie tarcza typu otwartego nie może pracować w gruntach nawodnionych. Konieczne więc byłoby albo obniżenie zwierciadła wody gruntowej poniżej spągu tunelu, co przy dużo większym zagłębieniu tuneli metra wydaje się mało racjonalne, albo zastosowanie też bardzo kosztownej technologii pracy pod sprężonym powietrzem. Uzyskiwane postępy robót przy zastosowaniu tarczy tradycyjnej są ponadto niezadowalające, bowiem na ogół nie przekraczają 50 metrów wybudowanego tunelu na miesiąc.

W tej sytuacji racjonalnym sposobem budowy tuneli szlakowych metra jest zastosowanie tarcz zmechanizowanych – TBM. Można założyć, że za ich pomocą można będzie budować, ostrożnie licząc, od 250 do co najmniej 300 metrów tunelu miesięcznie. Pomijając szczegółową klasyfikację wszystkich rodzajów tarcz zmechanizowanych, ograniczono się do krótkiego scharakteryzowania dwóch rodzajów TBM. Są to:

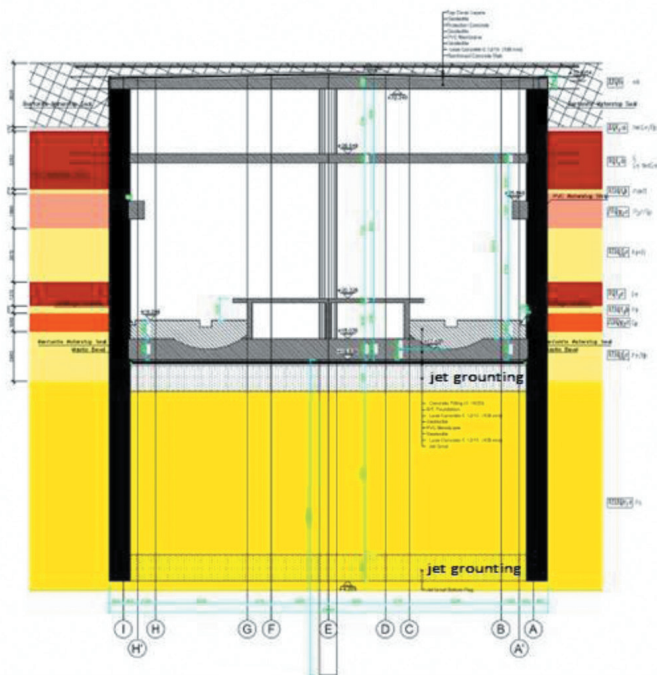
- tarcza zawieszinowa – Slurry Shield (SS),
- tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych – Earth Pressure Balance (EPB).

Obie te tarcze pozwalają na drażnienie tuneli poniżej poziomu wody gruntowej.

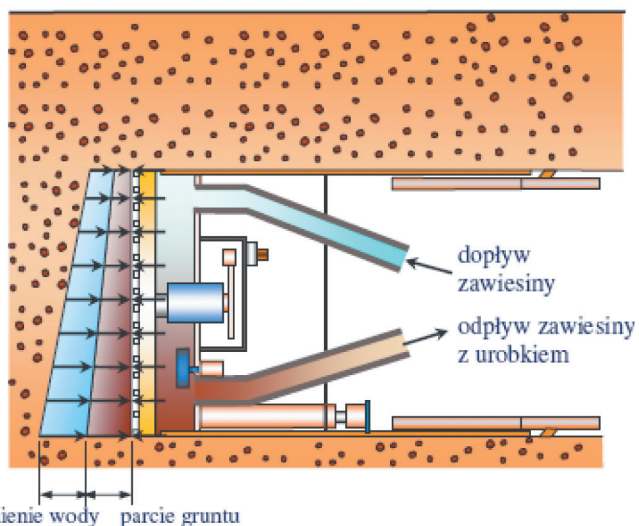
Tarcza zawieszinowa (SS)

Zasadą działania tego rodzaju tarcz jest zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej na przodku przeciwnie skierowanym ciśnieniem zawiesziny bentonitowej. Mechanizm tego równoważenia pokazano na rysunku 3. Polega on na tym, że zawieszina będąca pod ciśnieniem infiltruje w pory urabianego gruntu na pewną głębokość, wypełnia je blaszkami ilu-bentonitu, zmniejszając przepuszczalność gruntu, nadając mu spójność i poprawiając tym samym jego samostateczność. Jednocześnie osadzając cząstki ilu na powierzchni przodka, wytwarza na nim cienką błonkę, przez którą wywiera stabilizujące ciśnienie na przodek, równoważące wcześniej wspomniane zewnętrzne parcie gruntu i ciśnienie wody gruntowej.

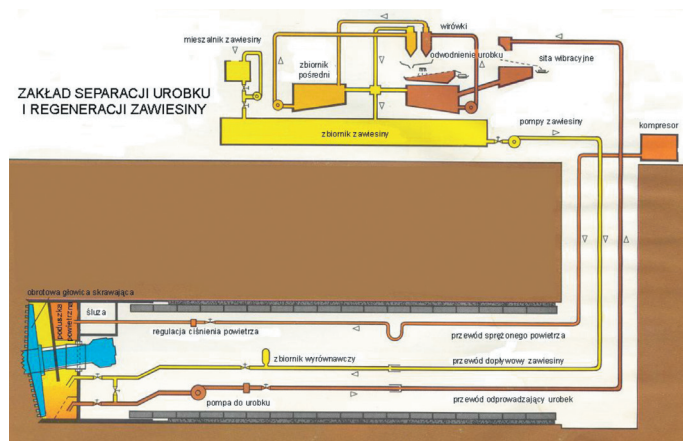
Omawiana tarcza podzielona jest szczelną przegrodą zwaną ścianką ciśnieniową na dwie części. Część przednia stanowi komorę roboczą. Tu odbywa się urabianie gruntu pełnym przekrojem za pomocą obrotowej głowicy skrawającej. Zazwyczaj głowica – w zależności od rodzaju urabianego gruntu, oporów jaki on stawia, średnicy wyrobiska itd. – wykonuje do trzech pełnych obrotów na minutę. Komora robocza wypełniona jest zawiesziną bentonitową o właściwościach tiksotropowych. Wymagane ciśnienie zawiesziny uzyskuje się za pośrednictwem poduszki sprężonego powietrza, którą wytwarza się w części komory roboczej, zawartej pomiędzy ścianką ciśnieniową i ścianką kontaktową, widoczną na rysunku 4. Rysunek 5 przedstawia ponadto schemat funkcjonowania tarczy zawieszinowej.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny stacji „Rondo Daszyńskiego” na II linii metra w Warszawie
Źródło:[4]



Rys. 3. Zasada zapewnienia stateczności przodka w tarczy zawieszinowej (SS)
Źródło: [5]



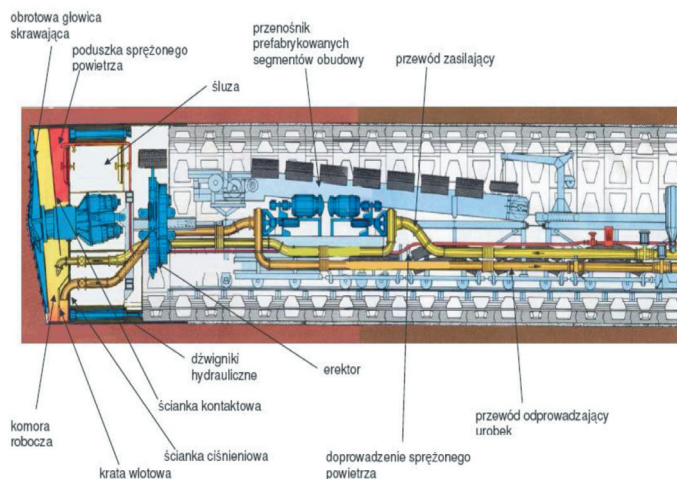
Rys. 4. Tarcza zawieszinowa – schemat funkcjonowania
Źródło: [5]

Zawiesina bentonitowa doprowadzona do komory roboczej i grunt urobiony przez głowicę skrawającą mieszają się i w postaci pulpy są pompowane i systemem rurociągów odprowadzane na powierzchnię terenu do zakładu separacji urobku i regeneracji zawiesiny. Tu wspomniana pulpa dostaje się na sita wibracyjne, a następnie jej część do wirówek, gdzie następuje oddzielenie kosztownej zawiesiny bentonitowej od urobionego gruntu. Tu też dokonuje się badania właściwości odzyskanej zawiesiny i, w zależności od potrzeb, regeneruje się ją przez dodanie odpowiedniej ilości nowej zawiesiny i ponownie systemem przewodów doprowadza do komory roboczej w tarczy.

Jeżeli w gruncie występują głaziki o wymiarach większych niż możliwość ich odpompowania na powierzchnię, to w komorze roboczej instaluje się kruszarkę, która odpowiednio je rozdrabnia. Jeżeli z badań geologicznych wynika, że na trasie tunelu mogą wystąpić duże głazy narzutowe, czego należy się spodziewać w niektórych gruntach morenowych, to należy uzbroić głowicę tarczy w odpowiednie noże frezy, zdolne urabiać skałę.

Śluza zainstalowana w ścianie ciśnieniowej pozwala na przedostawanie się do komory roboczej, np. gdy zachodzi konieczność wymiany zużytych noży lub usunięcie przeszkód, których nie może pokonać głowica urabiająca. Przechodzenie, przesłuzowywanie się, personelu do komory roboczej poprzedzone jest równoczesnym odpompowywaniem z niej zawiesiny i sukcesywne jej zastępowanie sprężonym powietrzem.

Na rysunku 5 przedstawiono przekrój wzdłużny przez tarczę zawiesinową wraz z pokazaniem usytuowania wyżej wspomnianej śluzy, dźwigników hydraulicznych do przesuwania tarczy, erektora podajnika do montażu prefabrykowanych segmentów obudowy tunelu, a także fragmenty urządzeń pomocniczych, zainstalowanych na tzw. pociągu. Na specjalnych jego „wagonach” znajdują się rurociągi wraz z pompami i ich silnikami, przenośniki do transportu segmentów, instalacje (mieszalniki, pompy) do wykonywania iniekcji wypełniających puste przestrzenie za obudową tunelu itp. Długość takiego pociągu często przekracza 100 metrów.



Rys. 5. Tarcza zawiesinowa – przekrój wzdłużny

Źródło: [5]

Tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych (EPB)

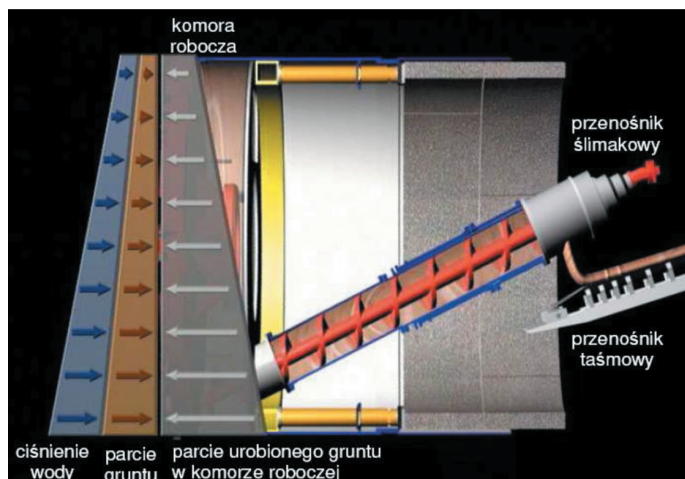
W tym rodzaju tarcz stateczność przodka zapewnia grunt urobiony przez głowicę skrawającą, wypełniający komorę roboczą. Jest ona oddzielona od reszty tarczy i tunelu masywną ścianą. W niej osadzony jest przenośnik ślimakowy z cylindryczną, szczelną obudową. Za pomocą tego przenośnika urobiony grunt usuwany jest z komory roboczej i zrzucany na kołowe lub szynowe środki transportowe albo też na przenośnik taśmowy i w ten sposób jest ewakuowany z tunelu.

Podczas pracy tarczy EPB parcie gruntu w komorze roboczej jest utrzymywane na wymaganym poziomie przez automatyczne kontrolowanie warunków drażenia, tj.:

- szybkości posuwania się tarczy oraz sił nacisku dźwigników hydraulicznych,
- prędkości obrotowej i momentu obrotowego głowicy urabiającej,
- prędkości obrotowej i momentu obrotowego przenośnika ślimakowego.

W celu zapewnienia stateczności przodka najważniejsze jest zachowanie równowagi pomiędzy ilością gruntu urobionego i usuniętego z komory roboczej. Zasadę zapewnienia stateczności przodka w tarczy EPB ilustruje rysunek 6. By móc dobrać wartość parcia urobionego gruntu w komorze roboczej w stosunku do założonego w projekcie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej, w komorze roboczej instaluje się czujnik do pomiaru parcia urobku. Jeżeli wskazuje on, że jest ono większe niż wspomniane oddziaływania zewnętrzne, to należy albo zwiększyć wydobycie urobku z komory roboczej przez zwiększenie prędkości obrotowej przenośnika ślimakowego, albo zmniejszyć prędkość przesuwu tarczy, sterując odpowiednio naciskami popychających ją dźwigników hydraulicznych. W przypadku odwrotnym – należy zmniejszyć prędkość obrotową przenośnika ślimakowego lub zwiększyć prędkość przesuwu tarczy.

Drażąc tunel za pomocą tarczy wyrównanych ciśnień gruntowych, konieczne jest stosowanie tzw. dodatków. Są one wstrzykiwane przez specjalne dysze umieszczone w głowicy skrawającej, w ścianie ciśnieniowej od strony komory roboczej, w przenośniku ślimakowym, a niekiedy też dookoła przedniej części powłoki tarczy. Dodatki te noszą nazwę plastyfikatorów, bowiem uplastyczniają urobiony grunt, zmniejszając jego tarcie wewnętrzne. Ponadto, na skutek mieszania gruntu z plastyfikatorem przez głowicę urabiającą i ewentualnie dodatkowo zamontowane mieszadła, dochodzi do homogenizacji urobku i jego uszczelnienia. W konsekwencji uzyskuje się zmniejszenie potrzebnego momentu obrotowego głowicy urabiającej. Dobrze zmieszany grunt z plastyfikatorem powoduje równomierne przedostawanie się go do przenośnika ślimakowego. Uszczelniony i uplastyczniony urobek ułatwia pracę tego przenośnika dzięki zmniejszeniu tarcia w jego wąskiej, cylindrycznej obudowie, co z kolei znacząco wpływa na zmniejszenie momentu obrotowego przenośnika. Dodatkowym efektem jest wytworzenie się w nim szczelnego korka gruntowego, przez który nie przedostanie się woda gruntowa, jaka może jeszcze przesączać się



Rys. 6. Zasada zapewnienia stateczności przodka w tarczy wyrównanych ciśnień gruntowych (EPB)
Źródło: [5]

do komory roboczej. Wstrzykiwanie plastyfikatora wokół powłoki tarczy zmniejsza tarcie pomiędzy nią a gruntem, co pozwala na zmniejszenie siły nacisku w dźwignikach hydraulicznych przesuwających tarczę.

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowo przekrój wzdłużny tarczy EPB z pokazaniem rozmieszczenia dodatkowych wiertnic, za pomocą których możliwe jest zarówno dokonywanie uzupełniającego rozpoznania warunków gruntowych przed czołem tarczy, jak i, w razie konieczności, wykonanie wyprzedzającej iniekcji wzmacniającej lub uszczelniającej grunt przed i wokół przyszłego wyrobiska tunelowego.

Kryteria wyboru tarcz

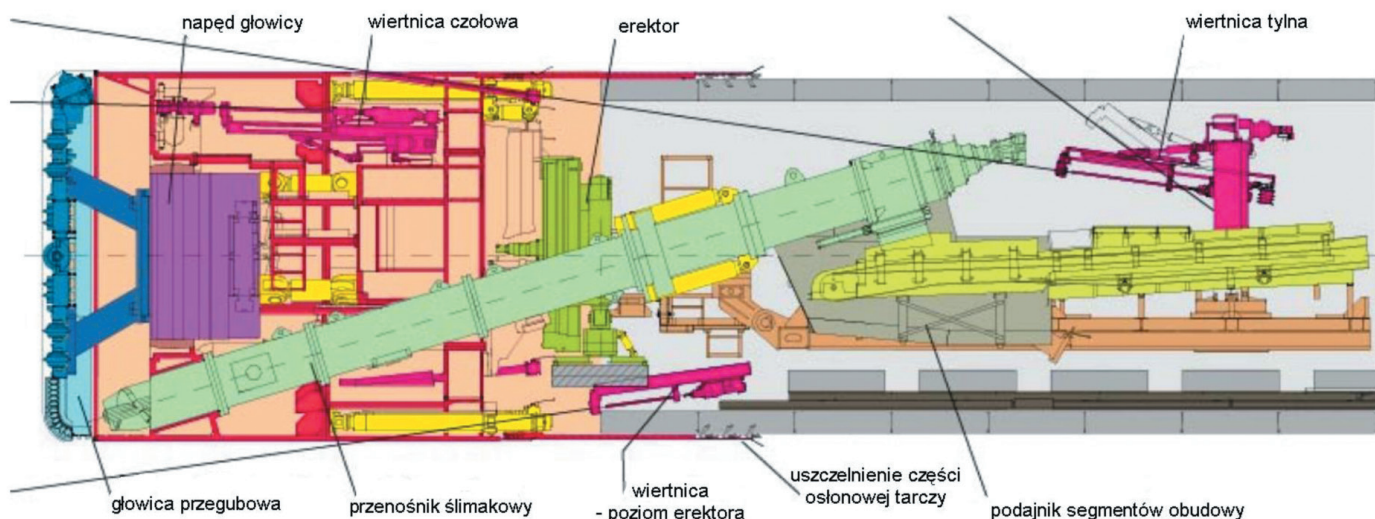
Zastosowanie tarcz zmechanizowanych wymaga bardzo dobrego rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych, a także właściwości geotechnicznych gruntów na trasie budowanego tunelu. Wybór właściwego rodzaju tarczy jest zadaniem skomplikowanym, przy którym należy się kierować kryteriami technicznymi i ekonomicznymi.

Do tych pierwszych należą:

- warunki gruntowe, a w tym:
 - rodzaje gruntów i ich granulometria,
 - parametry geotechniczne,
 - poziomy i ciśnienia wód gruntowych oraz współczynniki filtracji,
 - ewentualna obecność głazów narzutowych i innych przeszkód w gruncie np. starych fundamentów, pali, kłód drzew itp.;
- obecność, położenie i stan techniczny urządzeń podziemnych na trasie przyszłego tunelu;
- warunki powierzchniowe:
 - zabudowa nad i obok tunelu, rodzaj jej fundamentowania, wrażliwość na osiadania,
 - dostępność odpowiedniej powierzchni placu budowy; w przypadku tarcz zawieszonych – większej w stosunku do wymagań tarcz EPB ze względu na konieczność instalacji zakładu separacji urobku i regeneracji zawiesiny;
- dostępność środków chemicznych stosowanych jako dodatki uplastyczniające w przypadku tarcz EPB i bentonitu, a także niektórych dodatków aktywujących – w przypadku tarcz zawieszonych;
- dostępność miejsca do składowania urobku i jego ewentualnej utylizacji, w przypadku stosowania dodatków uznanych za szkodliwe dla środowiska.

Ponadto przy wyborze tarcz zmechanizowanych należy mieć na uwadze takie szczegółowe kryteria jak:

- podatność tarczy na zaciskanie przez otaczający grunt, zwłaszcza jeżeli ma on zdolność do pęcznienia;
- wpływ przekroju poprzecznego i długości drążonego tunelu. Przy dużych średnicach – potrzebny jest bardzo duży moment obrotowy głowicy skrawającej, szczególnie w tarczach EPB, w przypadku zaś tarcz zawieszonych – konieczna jest duża moc silników pomp do tłoczenia zawiesiny i urobku, z uwagi na odległość od przodka do zakładu segregacji urobku i regeneracji zawiesiny;



Rys. 7. Tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych – przekrój wzdłużny
Źródło: [5]

- wpływ danego rodzaju tarczy na wartość osiadań powierzchni terenu – w zasadzie przy wyborze tarczy zawieszinowej osiadania mogą być mniejsze niż przy tarczy EPB;
- wpływ na czas unieruchomienia tarczy w sytuacji konieczności wymiany noży lub natrafienia na przeszkody do usunięcia przed czołem tarczy. Ten czas jest krótszy w przypadku tarcz zawieszinowych w stosunku do tarcz EPB;
- szybkość urabiania, czyli postęp drążenia. Powszechnie uważa się, że jest on większy dla tarcz EPB niż dla tarcz zawieszinowych;
- czystość w budowanym tunelu – znacznie łatwiejsza do utrzymania w tunelach drążonych tarczą zawieszinową niż EPB itd.

Przykłady stacji metra wykonanych metodą podziemną

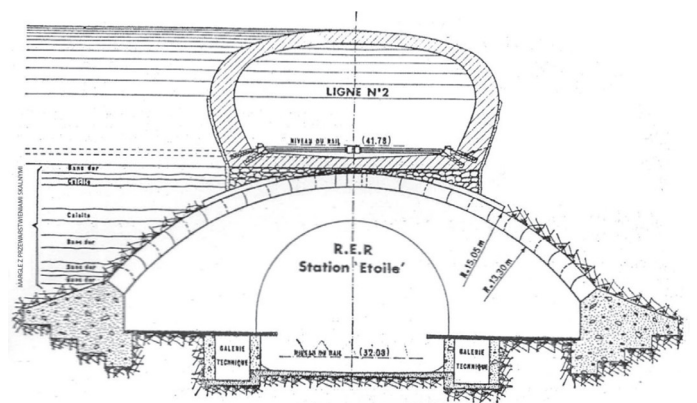
W dużych miastach budowa stacji metra metodami odkrywkowymi często nie jest możliwa. Główną przyczyną, nie do zaakceptowania, jest związane z budową poważne utrudnienie w komunikacji naziemnej, niekiedy na znacznym obszarze miasta. Zdarza się też, z racji dużej szerokości stacji, że jej część lub całość musi być usytuowana w planie pod budynkami. W przypadku większego zagłębienia linii metra budowa stacji metodą odkrywkową może okazać się nieuzasadniona.

Jednonawowa stacja metra Sol w Madrycie ma długość 207 metrów, a w przekroju poprzecznym – szerokość 27 metrów i wysokość 18 metrów. Nadkład gruntu nad stropem stacji wynosi od 12 do 14 metrów. Stacja budowana była w kompleksie gruntów spoistych, lecz na pewnej jej długości część stropowa znalazła się w piaskach. Z uwagi na zmienność warunków gruntowych na długości stacji podzielono ją na odcinki robocze i na niektórych z nich zastosowano klasyczną metodę niemiecką. Kolejne fazy budowy to: drążenie dwóch sztolni przyściennych, ich pogłębienie i zabetonowanie, stanowiące część ścian stacji. Następnie wykonano sztolnię kalotową, piaskowe partie gruntu wzmocniono za pomocą iniekcji. Nad sztolniami przyściennymi wydrążono sztolnie wezłowiowe. Ze sztolni kalotowej wykonano rozbudowę kaloty na wysokość umożliwiającą zabetonowanie stropu stacji i jego wezłowi. Pod ochroną stałej obudowy stropu wybrano grunt ze sztroty i spągu, a następnie zabetonowano sklepienie spągowe. Znaczną część prac w stropie wykonano w tymczasowej obudowie drewnianej z drewnianymi klinami i klepkami opartymi na stalowych łukach. Na fotografii 4 pokazano niektóre fragmenty wspomnianych robót.

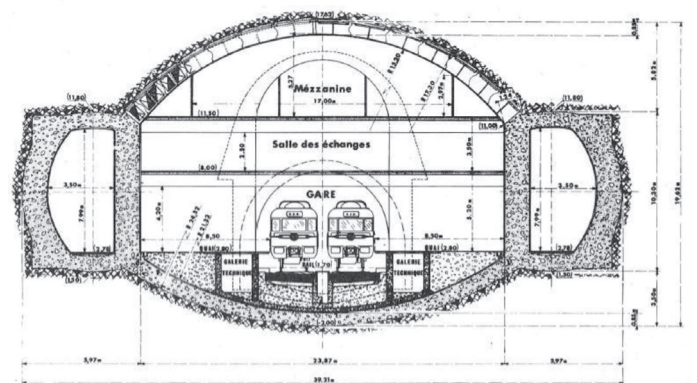
Stacje metra pośpiesznego RER w Paryżu – „Etoile” (rys. 8) i „Auber” (rys. 9) są również przykładem stacji jednonawowych. Ich długość wynosi 225 metrów przy rozpiętości około 25 metrów. Budowane były w zróżnicowanych warunkach gruntowych i wodnych. Pierwsza z nich – w naprzemianległych, cienkich warstwach margli i mocniejszych skał. Druga, w części spągowej – w wapieniach. Pozostała część w marglach z kamieniami. Zwierciadło



Fot. 4. Obudowa tymczasowa w kalocie
Źródło: [3]



Rys. 8. Stacja metra „Etoile” na linii RER w Paryżu
Źródło: [6]



Rys. 9. Przekrój poprzeczny stacji metra „Auber”
Źródło: [7]

wody gruntowej znajdowało się na poziomie stropu stacji. Zastosowano iniekcyjne wzmocnienie lub uszczelnienie gruntu, wykonywane z trzech sztolni (rys. 10). Skałę urabiano za pomocą wrębiarek i częściowo za pomocą materiałów wybuchowych. Strop obu stacji wykonano z żelbetowych bloków, sprzężonych w zworniku.



Fot. 5. Dwunawowa stacja metra „Clinicas” w São Paulo
Źródło: [8]

Stacja metra Clinicas w São Paulo jest przykładem stacji dwunawowej, ze słupami na międzytorzu i z peronami bocznymi (fot. 5). Wybór typu stacji podyktowany był przyjęciem dwutorowych tuneli szlakowych. Stację budowano w zwartych ilach. Stacje dwunawowe mogą też być budowane w założeniu dwóch tuneli szlakowych, jednotorowych. W tym przypadku peron jest wyspowy, ale rozpiętość stropu jest znacznie większa niż w przypadku stacji z peronami bocznymi.

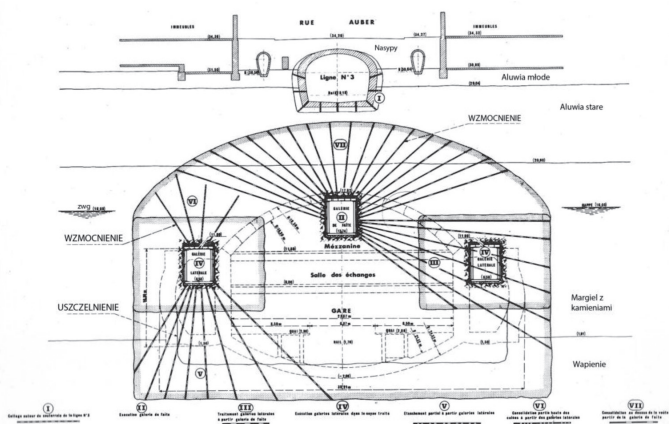
Na rysunku 11 pokazano schemat trójnawowej, pylonowej stacji metra, natomiast inną odmianą jest stacja trójnawowa, kolumnowa, której schemat pokazano na rysunku 12. Przykładem takiej stacji może być stacja metra „Rakoczy Ter” w Budapeszcie (fot. 6).

Literatura

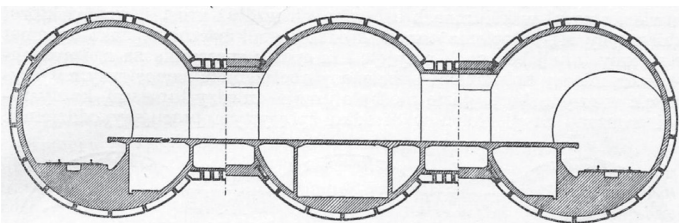
1. Rataj M., *Spoleczno-ekonomiczna efektywność szybkiej kolei miejskiej*, Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa 1982.
2. Ze zbiorów Metra Warszawskiego Sp. z o.o.
3. Siemińska-Lewandowska A., Fotografie ze zbiorów własnych.
4. Projekt i budowa II linii metra w Warszawie od stacji „Rondo Daszyńskiego” do stacji „Dworzec Wileński” – projekt wykonawczy autorstwa ILF Consulting Engineers Polska Sp. z o.o. Warszawa, wrzesień 2008.
5. Prospekty firmy Herrenknecht
6. Express Régional, RATP, Paris 1969.
7. Déchamps J., *Les travaux de Génie Civil de la Ligne Transversale Est-Ouest du Réseau*
8. *Comite Brasileiro de Tunels do Brasil (Tunnelling in Brasil)*, DBA Dorea Books and Art. Brasilia 2006.
9. *Studia i projekty metra w Warszawie 1928–1958*, red. J. Rossman, Arkady, Warszawa 1962.
10. Horvath F., Kovacs A., *Metro line 4, Rakoczy Ter Station*, Proceedings ITA-AITES World Tunnel Congress 2009, Budapest, Hungary, May 23–28, 2009.
11. Kocsonya P., Soos G., *Preparatory works for the line 4 on the Budapest Metro network*, Proceedings World Tunnel Congress '97/Vienna/Austria 12–17 April 1997. A.A. Balkema. Vienna, 1997.



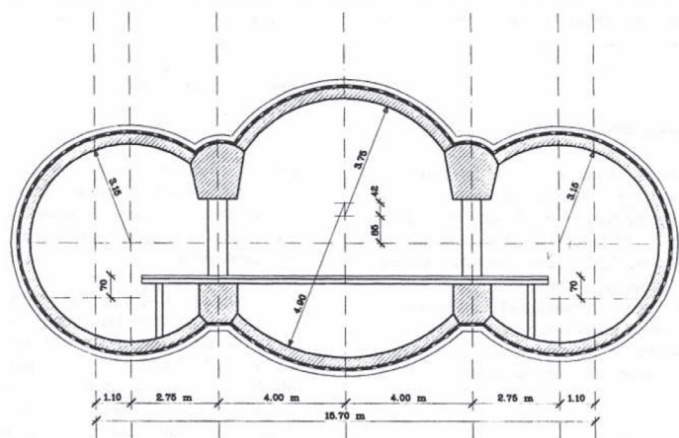
Fot. 6. Widok od strony szybu kolumnowej, trójnawowej stacji „Rakoczy Ter” w Budapeszcie
Źródło: [3]



Rys. 10. Wzmacnianie i uszczelnianie gruntów na budowie stacji „Auber” na linii RER w Paryżu
Źródło: [7]



Rys. 11. Schemat trójnawowej pylonowej stacji metra
Źródło: [9]



Rys. 12. Schemat trójnawowej kolumnowej stacji metra w Budapeszcie
Źródło: [10],[11].