

MIECZYŚLAW SZCZEPAŃSKI

mgr inż., Biuro Projektów „Metro-projekt” Sp. z o.o., ul. Solińska 19B, 02-142 Warszawa, tel. 602 260 338, e-mail: metroprojekt@metroprojekt.pl

STANISŁAW PEŚKI

mgr inż., Biuro Projektów „Metro-projekt” Sp. z o.o., ul. Solińska 19B, 02-142 Warszawa, tel. 602 260 335, e-mail: metroprojekt@metroprojekt.pl

GRZEGORZ MIROS

mgr inż., Biuro Projektów „Metro-projekt” Sp. z o.o., ul. Solińska 19B, 02-142 Warszawa, tel. 502 593 651, e-mail: miros@metroprojekt.pl

Problematyka projektowania metra na przykładzie Warszawy¹

Streszczenie. Problematyka projektowania metra w Warszawie sięga lat 20. ubiegłego wieku, a dyskusja nad nią była wynikiem – z jednej strony szybkiego rozwoju miasta, z drugiej zaś rosnących trudności w dziedzinie transportu publicznego. W związku z tym Zarząd Tramwajów powziął 22 września 1925 roku uchwałę o opracowaniu projektu kolei podziemnej, która, jak to wskazywały doświadczenia innych państw, powinna być rozwiązaniem trudności komunikacyjne stolicy. W artykule, na tle kalendarium powstawania projektu metra w Warszawie, przedstawiono wymogi dla przygotowania jego projektu trasy i etapowania budowy I i II linii metra oraz konstrukcję i metody budowy obiektów na obydwu liniach. Wśród omówionych obiektów są stacje, tunele szlakowe wykonane metodą odkrywkową i metodą tarczową oraz nawierzchnia torowa.

Słowa kluczowe: metro, budowa metra, tunele, projektowanie metra

Wprowadzenie

Kalendarium projektu metra w Warszawie:

- 1927–1930 Rozpoczęto studia nad ukształtowaniem sieci metra i rozpoczęto badania geologiczne dla dwóch zasadniczych linii:
A – południe–północ (Mokotów–Muranów),
B – wschód–zachód (Wola–Praga).
Całością prac kierował inżynier Józef Lenartowicz, profesor Politechniki Warszawskiej.
- 1930–1938 Kontynuowano prace studialne nad docelowym układem sieci metra, współpracując z Katedrą Kolei Miejskich Politechniki Warszawskiej kierowaną przez profesora Józefa Lenartowicza. Rozpoznano stosowane technologie metra w Paryżu, Berlinie, Londynie i Atenach. Prezydent miasta Stefan Starzyński decyzją z 14 listopada 1938 roku utworzył przy Dyrekcji Tramwajów autonomiczną jednostkę – Biuro Studiów Kolei Podziemnej, pod kierownictwem inżyniera Jana Kubalskiego.
- 1938 Biuro Studiów Kolei Podziemnej prowadziło przygotowania do rozpoczęcia budowy. Wrzesień 1939 przerwał wszystkie prace.

- 1939–1945 W czasie okupacji nie przerwano prac studialnych. Większość opracowań zaginęła w zniszczonym podczas Powstania Warszawskiego biurze na Woli.
- 1945–1947 Prace BOS (Biura Odbudowy Stolicy) nad koncepcją transportu miejskiego w ramach projektu WZM (Warszawskiego Zespołu Miejskiego) prowadzą do zdefiniowania tras SKM (Szybkiej Kolei Miejskiej).
- 1948–1950 Powstaje projekt sieci SKM oraz projekt I linii metra w relacji północ–południe. Linia prowadzona jest na powierzchni terenu, w wykopach oraz w centralnej części miasta pod ziemią.
- 1951–1953 W grudniu 1950 roku uchwałą rządu zdecydowano o budowie w Warszawie metra głębokiego.
1 stycznia 1951 roku dotychczasowe biuro projektów SKM przekształcono w Państwowe Przedsiębiorstwo „Metroprojekt”, wcielone z końcem roku jako jednostka samodzielna w strukturę Zjednoczenia Budownictwa Przemysłowego „Metrobudowa”.
Rozpoczęto projekt i realizację pierwszych fragmentów metra w Warszawie. Działania trwały krótko. 29 października 1953 roku uchwałą rządu przerwano czasowo budowę metra (jak się okazało na prawie 30 lat), pozostawiając jednak B.P. „Metroprojekt” dla zachowania doświadczeń i kadry specjalistów.
- 1954–1982 B.P. „Metroprojekt” realizuje różnorodne projekty, niezwiązane z metrem. Przez cały ten czas nie gaśnie nadzieja na metro w Warszawie.
W latach tych opracowano:
- skrócony projekt wstępny na trasie północ–południe,
 - wiele opracowań uzupełniających z dziedziny technologii metra,
 - założenia generalne I linii metra płytkego (Młociny–Służewiec) zatwierdzone przez władze Warszawy w 1964 roku,
 - aktualizację Założeń Techniczno-Ekonomicznych (1969–1971),

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2015. Wkład autorów w publikację: M. Szczepański 30%, S. Peński 40%, G. Miros 30%.

- 1982–2008 Projektowanie i budowa I linii metra w Warszawie (Kabaty–Młociny).
- 2008–2015 Projektowanie i budowa odcinka centralnego II linii metra w Warszawie (Rondo Daszyńskiego–Dworzec Wileński).

Współczesne wymogi dla przygotowania projektu metra

Z bieżących doświadczeń B.P. „Metroprojekt” wynika następujący harmonogram przygotowań projektu metra w danej aglomeracji:

- Opracowanie docelowego przebiegu tras metra. W ramach tego opracowania należy:
 - wykonać studium istniejącego układu komunikacyjnego (z uwzględnieniem perspektywy),
 - wyznaczyć trasy o największym obciążeniu komunikacyjnym uzasadniających budowę metra,
 - wyznaczyć docelowe trasy linii metra oraz dokonać wyboru trasy metra do realizacji w pierwszym etapie,
 - ustalić właścicieli terenu, pod którymi przebiega trasa metra, oraz rozpoznać możliwość pozyskania ich dla realizacji projektu budowy metra,
 - wyznaczyć i uzyskać teren dla Stacji Techniczno-Postojowej.
- Opracowanie wariantowe „Studium wykonalności dla pierwszego etapu budowy”. W ramach tego opracowania należy:
 - dokonać wyboru taboru metra,
 - opracować skrajnię dla tego taboru,
 - określić warunki gruntowo-wodne wzdłuż projektowanej trasy i dla STP,
 - opracować przebieg metra w planie z lokalizacją stacji i wentylatorni (węzły komunikacyjne, połączenia z centrami handlowymi, budynkami, uczelniami, dworcami PKP, PKS itp.),
 - opracować wariantowe profile metra w zależności od:
 - położenia infrastruktury podziemnej (konieczna inwentaryzacja),
 - położenia budynków i budowli w stosunku do trasy metra (obok trasy, nad trasą),
 - warunków gruntowo-wodnych,
 - opracować wariantowe rozwiązania stacji i tuneli szlakowych,
 - długość peronu,
 - stacje z peronami wyspowymi,
 - stacje z peronami bocznymi,
 - przekroje tuneli szlakowych,
 - opracować metody budowy stacji i tuneli szlakowych,
 - ustalić źródła zasilania metra w media (woda, energia elektryczna, ciepło),
 - podać instalacyjne wyposażenie metra,
 - podać wstępną ochronę przeciwpożarową metra,
 - wyznaczyć granice wpływu budowy metra na otoczenie,
 - wstępnie określić stan techniczny budynków i budowli w granicach wpływu budowy metra,
 - podać rozwiązania nawierzchni torowej,

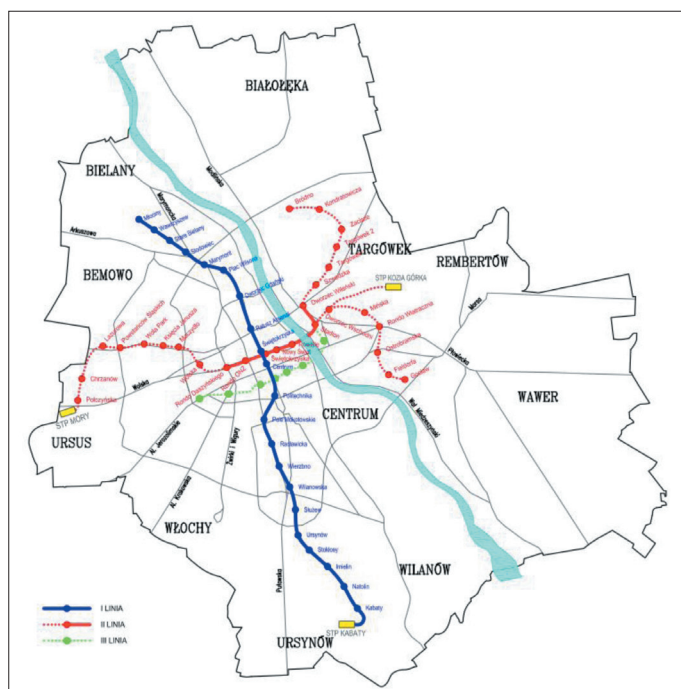
- podać zabezpieczenie budynków i ludzi w nich przebywających przed wpływami dynamicznymi od eksploatacji metra,
- rozwiązać kolizje z uzbrojeniem podziemnym,
- opracować organizację ruchu miejskiego na czas budowy metra,
- oszacować koszty budowy dla opracowanych wariantów.
- Opracowanie raportu ochrony środowiska dla przedstawionych wariantów w studium wykonalności dla uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach inwestycji.
- Dokonanie wyboru wariantu budowy metra dla dalszych opracowań.
- Ogłoszenie konkursu na opracowanie wielobranżowej koncepcji budowy metra. Zwycięzca konkursu uzyskuje zlecenie na opracowanie projektu budowlanego z uzyskaniem pozwolenia na budowę.
- Opracowanie koncepcji wielobranżowej dla Stacji Techniczno-Postojowej.
- Opracowanie projektu budowlanego dla Stacji Techniczno-Postojowej z uzyskaniem pozwolenia na budowę.

Trasy i etapowanie budowy I i II linii metra w Warszawie

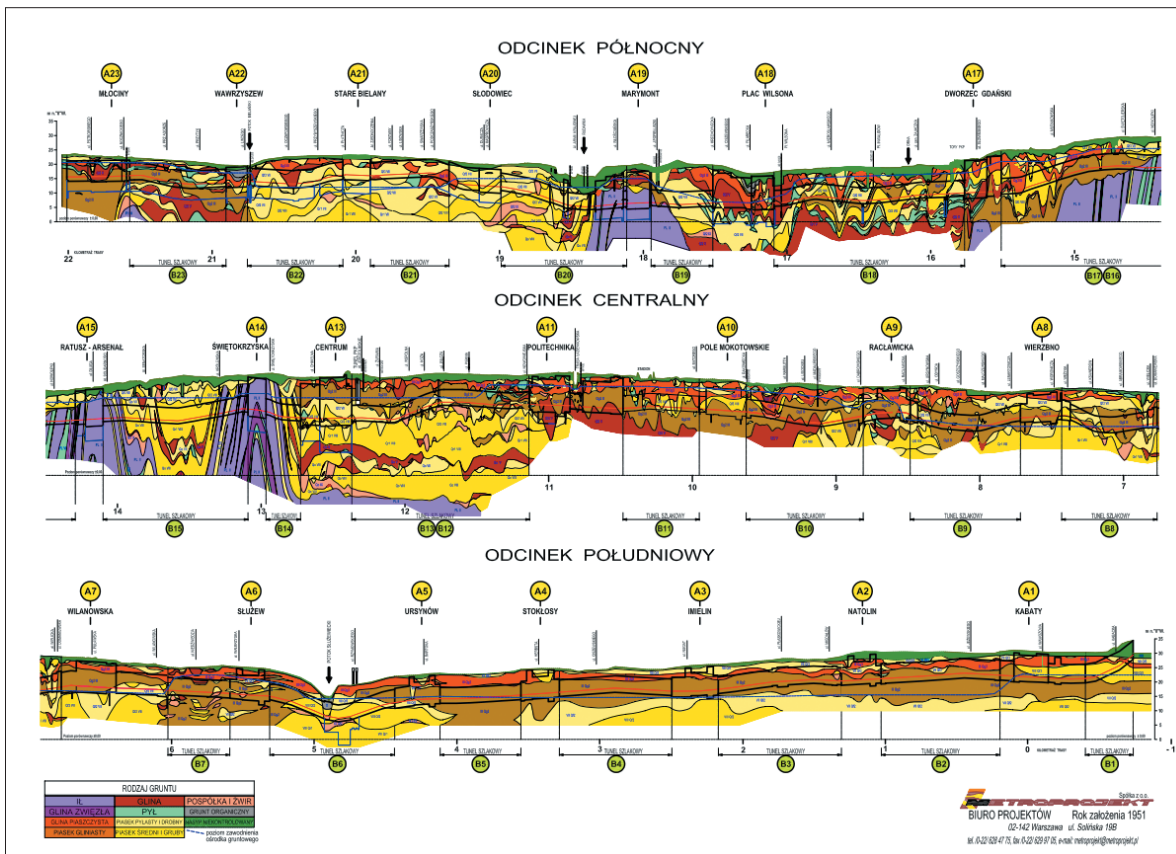
Etapowanie budowy linii metra

Obecnie zdefiniowany jest przebieg tuneli I i II linii metra w Warszawie (rysunek 1). Wybudowana I linia metra przebiega na kierunku południe–północ i ma długość 23 kilometry. Profil wykonanej linii przedstawiono na rysunku 2.

II linia metra (o długości około 28 kilometrów) – w budowie – łączy dzielnice miasta położone w części północno – wschodniej z dzielnicami położonymi w części zachodniej. Profil wykonanej linii na odcinku centralnym przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 1. Trasy metra w Warszawie



Rys. 2. Profil I linii metra w Warszawie

Projektowana III linia metra łączy dzielnicę południo-wschodnią (Gołław) z częścią zachodnią miasta (rejon Dworca Zachodniego), lecz nie jest do końca zdefiniowana.

I i II linia metra przecinają się na stacji Świętokrzyska, gdzie możliwa jest między nimi przesiadka. II i III linia metra łączą się na stacji Stadion. Konstrukcję stacji Stadion wykonano tak, by docelowo umożliwić bezpośrednią przesiadkę między II i III linią metra.

O przyjętym obecnie etapowaniu budowy metra można mówić dla I i II linii metra, ponieważ realizacja III linii jest w odległej perspektywie.

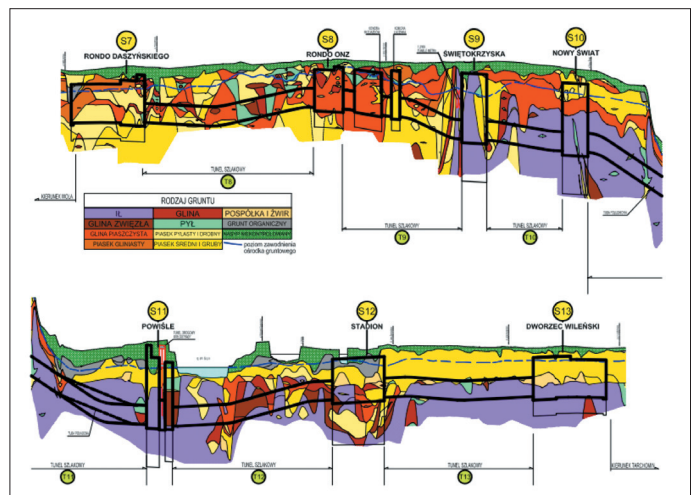
O etapowaniu budowy I linii metra zdecydował wybór lokalizacji Stacji Techniczno-Postojowej w Kabatach. Wybór lokalizacji STP Kabaty był wynikiem analizy wielu propozycji. STP Kabaty położona jest na końcu I linii metra w części południowej. Realizacja STP Kabaty i realizacja linii rozpoczęła się równolegle od południa.

Pierwszy etap realizacji obejmował odcinek metra od STP Kabaty do stacji Politechnika (o długości 11,0 kilometrów) i uruchomiony został w 1995 roku. Na tym odcinku zostały wybudowane tory odstawcze przed stacją Wilanowska i przed stacją Politechnika.

Następne etapy budowy i przekazywania do etapowania obejmowały krótkie odcinki (jedna lub dwie stacje z torami odstawczymi). Taki sposób budowy był podyktowany możliwościami finansowania realizacji z jednoczesnym wydłużeniem odcinka eksploatowanego.

Drugi etap obejmował odcinek od stacji Politechnika do stacji Centrum z torami odstawczymi (1998 rok).

Trzeci etap obejmował odcinek od stacji Centrum do stacji Ratusz z torami odstawczymi do zawracania (2001 rok).



Rys. 3. Profil II linii metra w Warszawie – odcinek centralny

Czwarty etap obejmował odcinek od stacji Ratusz do stacji Dworzec Gdański z torami odstawczymi (2003 rok).

Piąty etap obejmował odcinek Dworzec Gdański do stacji Plac Wilsona z torami odstawczymi (2005 rok).

Szósty etap obejmował odcinek od stacji Plac Wilsona do końcowej stacji Młociny z torami odstawczymi (2008 rok).

Od przekazania placu budowy wykonawcy do zakończenia realizacji I linii metra upłynęło nieco ponad 25 lat, a więc budowano przeciętnie, niespełna 1 kilometr rocznie. Tak długi czas budowy nie był uwarunkowany potencjałem projektowym i wykonawczym, ale możliwościami finansowymi.

Pomiędzy I i II linią metra zaprojektowano połączenie techniczne umożliwiające przejazd taboru metra między tymi liniami, a więc istnieje możliwość obsługi technicznej taboru metra II linii na Stacji Techniczno–Postojowej Kabaty. Z tego powodu budowę II linii metra rozpoczęto od odcinka centralnego o długości około 6,3 kilometra. Odcinek ten rozpoczyna się na stacji C9 Rondo Daszyńskiego z torami odstawczymi, a kończy się na stacji C15 Dworzec Wileński z torami odstawczymi. Następny etap obejmuje równoległą realizację metra na odcinkach zachodnim i wschodnim.

Drugi etap budowy od stacji C9 Rondo Daszyńskiego do stacji C6 Księcia Janusza z torami odstawczymi na zachód i od stacji C15 Dworzec Wileński do stacji C18 Targówek, z torami odstawczymi na wschód.

Trzeci etap budowy obejmuje odcinek od stacji C6 Księcia Janusza do stacji C4 Powstańców Śląskich, z torami odstawczymi na zachód i od stacji C18 Targówek do stacji C21 Brudno, z torami odstawczymi na wschód.

Czwarty etap budowy obejmuje odcinek od stacji C4 Powstańców Śląskich do stacji Techniczno–Postojowej Mory, łącznie z budową tej stacji.

Konstrukcja i metody budowy obiektów na I i II linii metra w Warszawie

Podstawowymi obiektami na I i II linii metra są stacje i tunele między nimi (tunele szlakowe). Konstrukcja tych obiektów, w wyniku zdobywania coraz lepszych doświadczeń własnych i poznawania obcych oraz możliwości zastosowania nowych materiałów i technologii budowy ulegała przez lata zmianom. Poniżej omówiono w sposób ogólny rozwiązania konstrukcji i technologii budowy stacji i tuneli szlakowych.

Stacje

Ze względu na przyjęcie podstawowego założenia dla I i II linii metra, że są typu płytkiego, na I linii metra pgs znajduje się poniżej terenu od 10–14,0 metrów, a tylko na stacji Centrum zagłębienie jest większe z powodu skrzyżowania z linią średnicową PKP.

Na II linii metra pgs znajduje się poniżej poziomu terenu w 12,0–13,0 metrów – a tylko w części centralnej, ze względu na skrzyżowanie z I linią metra, przejście pod budynkami na skarpie wiślanej oraz przejście pod Wisłą, pgs stacji Świętokrzyska, Nowy Świat i Powiśle – są zagłębione poniżej terenu, od 21,0 do 27,0 metrów.

Wszystkie stacje realizowane są metodą odkrywkową. Konstrukcja stacji żelbetowa monolityczna z zastosowaniem ścian szczelinowych lub żelbetowa ze ścianami i płytą denną monolityczną i stropami prefabrykowanymi (na odcinku południowym I linii metra).

Typy stacji

Na I linii metra od stacji Kabaty do stacji Słodowiec zastosowano stacje z peronami wyspowymi o szerokości od 10,0–12,0 metrów z wyjątkiem stacji Centrum, gdzie zastosowano perony boczne z powodu wcześniej-

szego wykonania konstrukcji zabezpieczającej pod torami PKP.

Perony boczne wykonano również na trzech końcowych stacjach (Bielany, Wawrzyszew, Młociny).

Metro na tym odcinku przebiega w pasie między jezdniami. Na podstawie przeprowadzonych analiz zdecydowano, że stacje i tunele szlakowe będą wykonane metodą odkrywkową.

Przyjęcie stacji z peronami bocznymi pozwoliło na wykonanie tuneli o jednakowych wymiarach w przekroju poprzecznym na całej ich długości i wypłylenie zagłębienia.

Na tym odcinku pgs jest położony około 6,0 metrów od powierzchni terenu.

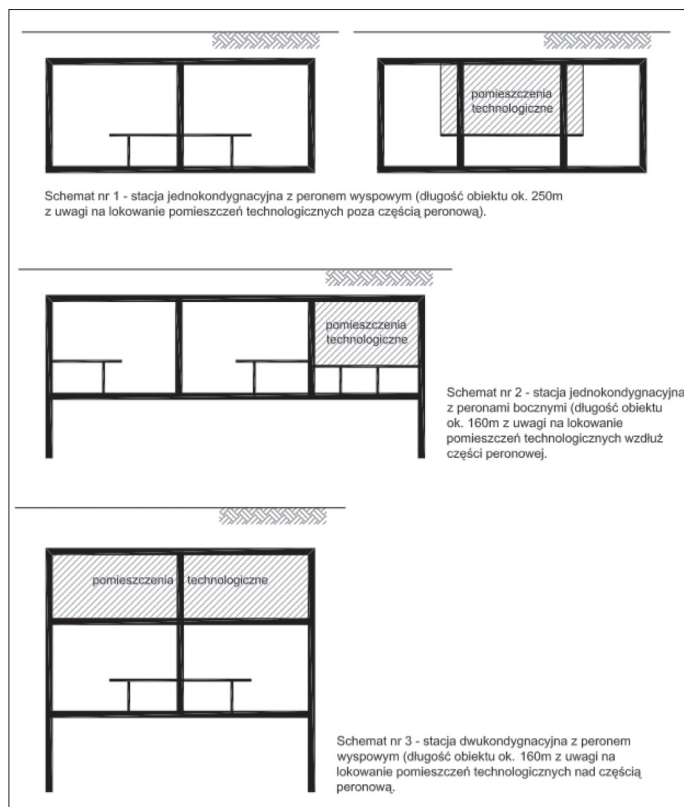
Uzyskano na tym odcinku wypłylenie metra o 5,0 metrów w stosunku do pozostałego odcinka i obniżenie kosztów budowy.

Na II linii metra, ze względu na zagłębienie niwelety toru, a także budowę tuneli szlakowych metodą tarczową, przyjęto stacje z peronami wyspowymi.

Na odcinku południowym I linii metra od stacji Kabaty do stacji Centrum długość stacji wynosi około 250 metrów. Długość została przyjęta przez analogię do rozwiązań w Pradze, Budapeszcie oraz dawnym Związku Radzieckim. Wynikała ona z przyjęcia, że obiekt był jednokondygnacyjny na długości hali peronowej i pomieszczeń technologicznych, a na tzw. antresolach (strefa wyjść na powierzchnie terenu) stacje miały dwa poziomy.

Szerokość stacji od 18,70 do 20,50 metra w zależności od szerokości peronu.

Schemat stacji przedstawiono na rysunku 4.



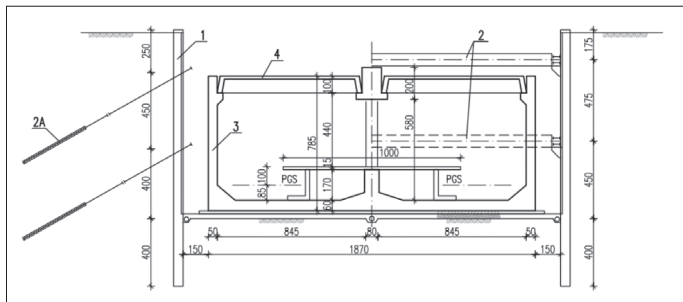
Rys. 4. Schematy konstrukcyjne stacji

Na pozostałym odcinku I linii metra od stacji Świętokrzyska do odcinka bielańskiego i na II linii metra przyjęto długość stacji około 160,0 metrów. Takie duże skrócenie uzyskano, wykorzystując przestrzeń nad halą peronową na dodatkową kondygnację dla pomieszczeń technologicznych. Powstało w ten sposób ekonomiczniejsze rozwiązanie (rys. 4).

Metody budowy stacji

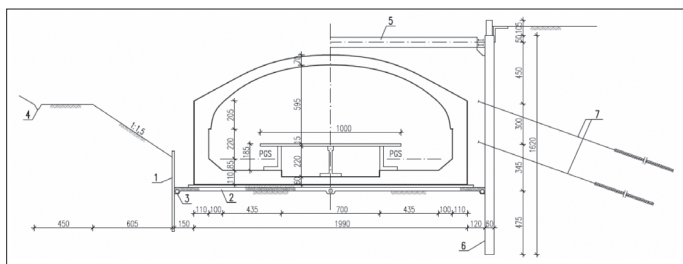
Przystępując do budowy metra, przedsiębiorstwa wykonawcze miały niewielkie doświadczenie w budowie obiektów podziemnych o zagłębieniu kilkunastu metrów. Najbardziej dostępna wówczas była obudowa ścian wykopu ze ścianki berlińskiej z rozporami. Taką metodą stosowano na odcinku od stacji Kabaty do stacji Pole Mokotowskie. Z biegiem czasu zamiast rozpór zastosowano dla przytrzymania ścianki berlińskiej kotwy gruntowe, które udostępniły całą przestrzeń wykopu do wykonania konstrukcji obiektu.

Po pomyślnych doświadczeniach ściany szczelinowe zostały zastosowane na pozostałych stacjach I linii metra oraz na stacjach centralnego odcinka II linii metra.



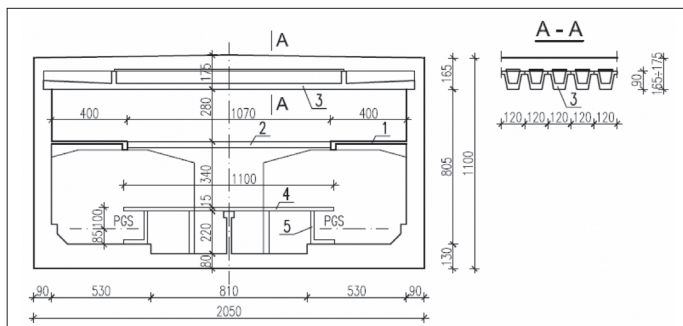
Rys. 5. Przekrój poprzeczny stacji z obudową wykopu na odcinku południowym I linii metra w Warszawie

1 – „ścianka berlińska”, 2 – rozpory rurowe, 2A – kotwie gruntowe, 3 – monolityczna konstrukcja stacji, 4 – prefabrykowane płyty stropowe



Rys. 6. Przekrój poprzeczny stacji łukowej z obudową wykopu

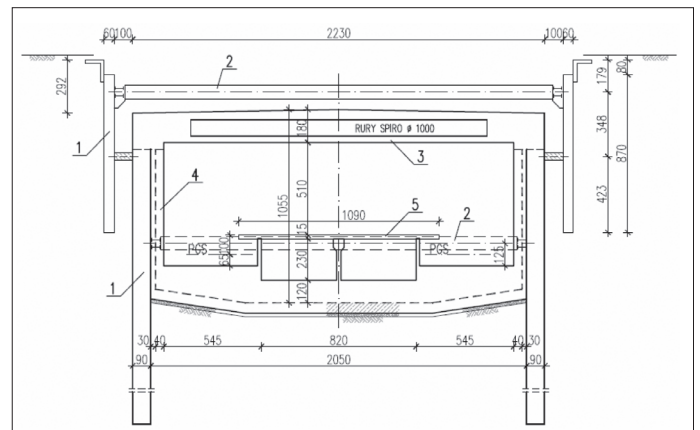
1 – ścianka szczelna, 2 – warstwa filtracyjna, 3 – drenaż, 4 – odwodnienie, 5 – rozpory rurowe, 6 – „ścianka berlińska”, 7 – kotwie gruntowe



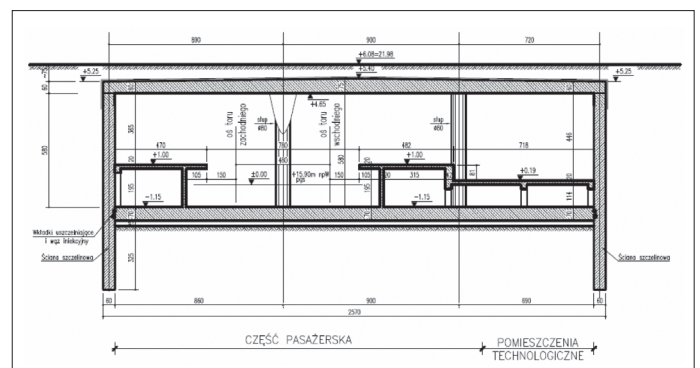
Rys. 7. Przekrój poprzeczny stacji Wilanowska na I linii metra w Warszawie

1 – galeria dla pieszych nad torowiskiem, 2 – kładka łącząca galerie, 3 – prefabrykowane płyty stropowe, 4 i 5 – prefabrykowane płyty peronowe

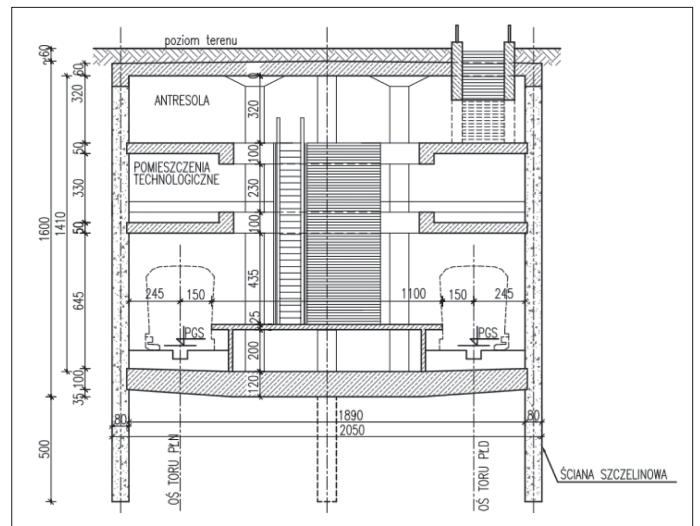
Z reguły stosuje się stropową metodę budowy. Oznacza to, że po wykonaniu ścian szczelinowych robi się stropy stacji, poczynając od stropu górnego oraz po wybraniu gruntu – stropy następne aż do płyty dennej. Stropy podporane są na podporach tymczasowych, które są usuwane w miarę wykonywania od dołu podpór stałych. Stropy stacji stanowią rozparcie ścian szczelinowych. Poniżej przedstawiono przekroje pionowe konstrukcji i obudowy wykopu dla stacji na I i II linii metra (rysunki: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13).



Rys. 8. Przekrój poprzeczny stacji Politechnika na I linii metra w Warszawie
1 – ściany szczelinowe, 2 – rozpory rurowe, 3 – żelbetowa płyta monolityczna, 4 – konstrukcja wewnętrzna, 5 – prefabrykowane płyty peronowe



Rys. 9. Przekrój poprzeczny stacji Młociny na I linii metra w Warszawie



Rys. 10. Przekrój poprzeczny stacji Rondo Daszyńskiego na II linii metra w Warszawie

Tunele szlakowe na I linii metra

Tunele szlakowe były wykonywane dwiema metodami:

- odkrywkową od Stacji Techniczno-Postojowej Kabaty do stacji Wilanowska i od stacji Marymont do stacji Młociny,
- tarczową od stacji Wilanowska do stacji Marymont.

Metoda odkrywkowa została zastosowana na odcinkach pozaśródmiejskim, a metoda tarczowa na odcinku w centrum miasta. Konstrukcja tuneli była żelbetowa monolityczna dla płyty dennej i ścian oraz stropy prefabrykowane żelbetowe. Przekroje poprzeczne tuneli przedstawiono na rysunkach: 11, 12 i 13.

Do budowy tuneli wykonywanych metodą tarczową zastosowano obudowę żeliwną, skręcaną śrubami i uszczelnianą między tubingami ołowiem. W czasie rozpoczęcia budowy dysponowano tylko tarczą ręczną o małym postępie drążenia.

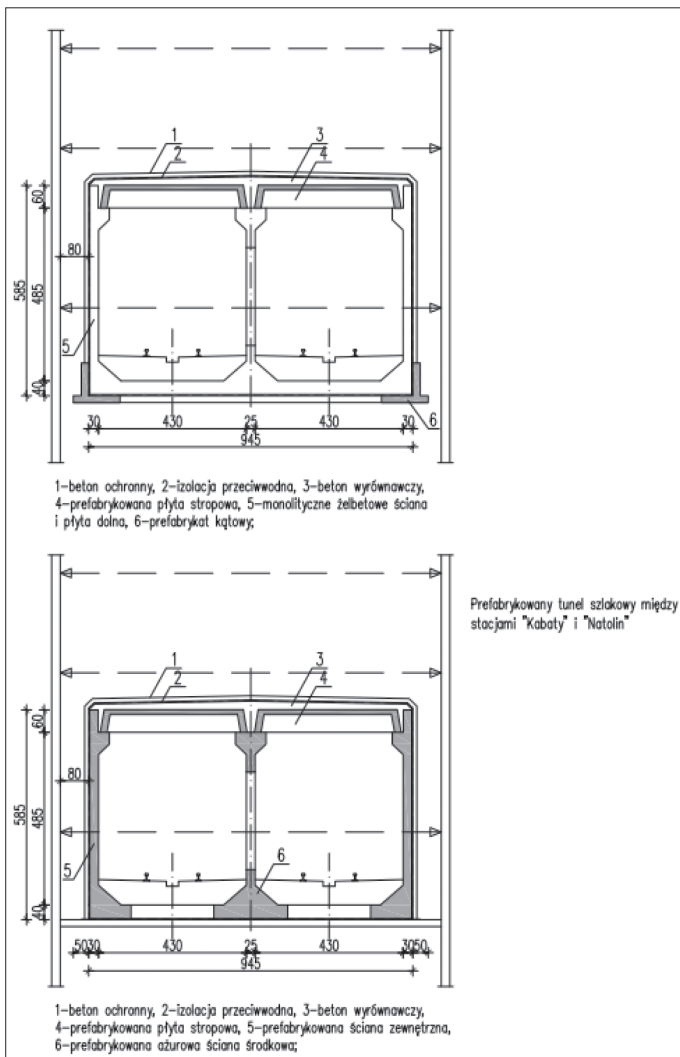
Tunele szlakowe na II linii metra

Na podstawie analizy warunków gruntowo – wodnych, wzdłuż projektowanego odcinka metra, autorzy koncepcji przyjęli, że najbardziej przydatnym urządzeniem do tunelowania będzie zmodyfikowana tarcza typu EPBS (Earth

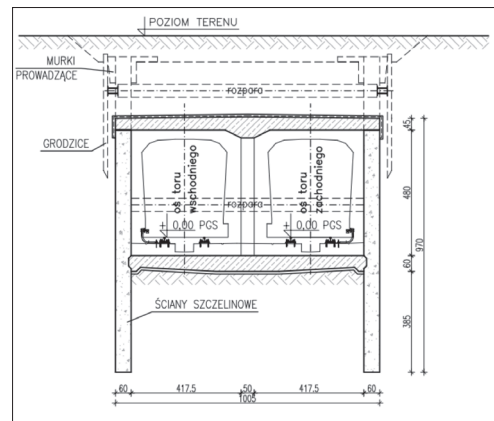
Pressure Balance Shield), zwana plastyfikatorową, gdyż umożliwiła rozszerzenie zakresu stosowania techniki wyrównanych ciśnień do wyparcia przodka w gruntach niespoistych. Modyfikacja ta polega na wprowadzeniu do komory roboczej plastyfikatora w postaci gęstej zawiesiny ilowej lub piany polimerowej. Urobek gruntu sypkiego w tych warunkach nabiera cech plastycznego gruntu spoistego, staje się nieprzepuszczalny, a ściśnięty w komorze roboczej stanowi dobre wyparcie przodka, równoważąc ciśnienie wody gruntowej. Tego rodzaju tarcza w prosty i szybki sposób reaguje na zmianę warunków gruntowych na przodku. Dodatkową zaletą jest fakt tańszego przygotowania placu budowy, gdyż nie jest wymagana, jak w przypadku tarcz zawieszinowych, budowa zakładu separacji i regeneracji płuczki.

W koncepcji rozwiązania tuneli szlakowych przyjęto obudowę żelbetową, prefabrykowaną, w postaci zbieżnych pierścieni o wymiarach:

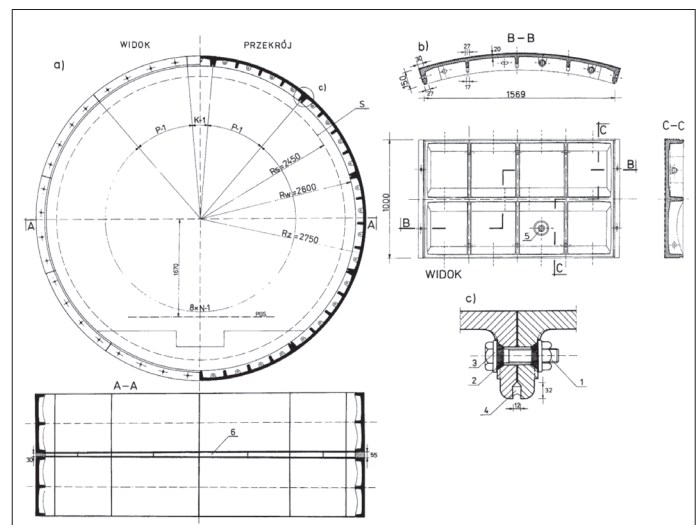
- średnica wewnętrzna pierścienia 5,40 metra,
- średnica zewnętrzna pierścienia 6,00 metrów,
- grubość ścianki pierścienia 0,30 metra,
- szerokość modułarna pierścienia, w zależności od nośności układarki i podajnika bloków w tarczy, od 1,00 do 2,00 metrów.



Rys. 11. Przekrój poprzeczny tunelu szlakowego na odcinku południowym I linii metra w Warszawie



Rys. 12. Przekrój poprzeczny tunelu szlakowego na odcinku północnym I linii metra w Warszawie



Rys. 13. Przekrój poprzeczny tunelu tarczowego na odcinku centralnym I linii metra w Warszawie

a) widok i przekrój, b) tubing normalny N-1, c) szczegół złącza śrubowego, 1 – śruba M27, 2 – uszczelka bitumiczna, 3 – podkładka sferyczna, 4 – uszczelnienie ołowiem, 5 – otwór do iniekcji, 6 – wkładka klinowa

Pierścienie składają się z czterech bloków normalnych (N1 ÷ N4), dwóch bloków przykluczowych (P1, P2) i jednego bloku kluczowego (K). Każdy z bloków, z uwagi na zbieżność pierścienia, ma nieco inne wymiary i zajmuje w pierścieniu określone położenie. Zbieżność pierścienia oraz różne sekwencje ich wzajemnego układania muszą być tak dobrane, aby zapewnić uzyskanie krzywizny tunelu na łukach poziomych i pionowych zaprojektowanej trasy.

W odniesieniu do projektowanej żelbetowej obudowy segmentowej przewidziano uszczelnienie styków obudowy przez zastosowanie systemowych rozwiązań ściśliwych uszczelnień neoprenowych lub etylopropylowych – są one wklejane w postaci zwulkanizowanych ramek do rowków na obrzeżach segmentów (najczęściej na placu budowy).

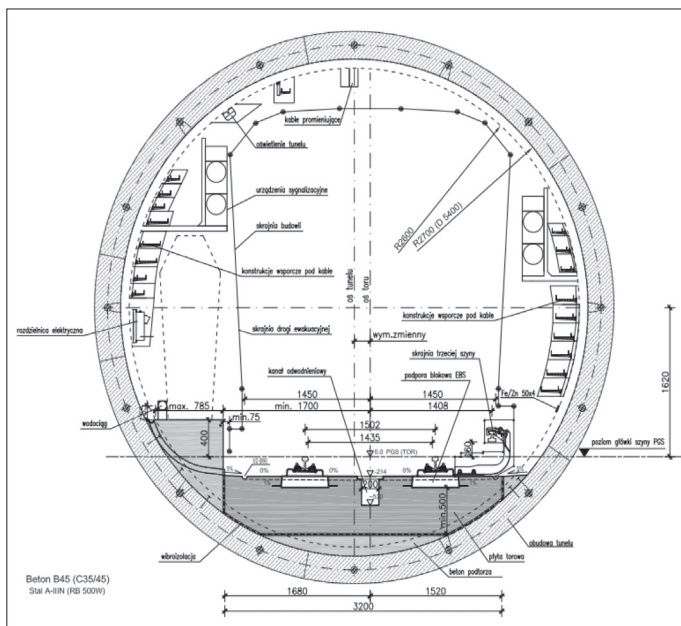
Oceniono, że w przypadku drażenia tarczą zmodyfikowaną typu EPBS, przy nakładzie minimalnym około 6,00 metrów (równym średnicy tarczy), średnie spodziewane osiadanie terenu w osi terenu nie powinno przekroczyć 10 milimetrów, a przy nakładzie większym – zmniejszy się proporcjonalnie do zagłębienia.

Przekrój poprzeczny tunelu szlakowego przedstawiono na rysunku 14.

Nawierzchnia torowa

Nawierzchnię torową metra, pracującą w bardzo trudnych warunkach, tak ze względu na dużą intensywność ruchu pociągów (do 650 przejazdów na dobę), jak i na krótki czas na konserwację (około 2 h w przerwie nocnej), musi cechować:

- trwałość i niezawodność,
- niezmienność jej parametrów jako całości i stosowanych w niej elementów w miarę upływu czasu,
- prosta technologia wykonania i utrzymania,
- właściwości tłumiące drgania i hałas,
- skuteczna izolacyjność w celu zmniejszenia prądów błądzących,



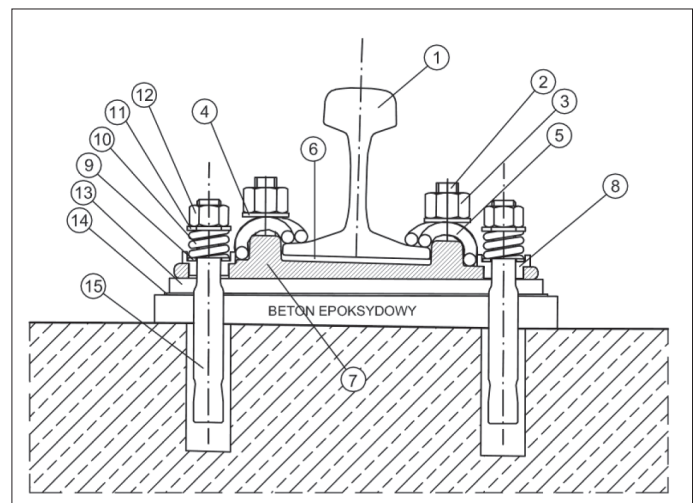
Rys. 14. Przekrój poprzeczny tunelu tarczowego na II linii metra w Warszawie

- odpowiednia oporność w celu zapewnienia pracy obwodów sterowania ruchem pociągów,
- łatwość odwodnienia.

Zakres i wielostronność wymagań stawianych konstrukcji nawierzchni powodują, że zazwyczaj już podczas eksploatacji są prowadzone ciągłe prace nad jej ulepszeniem i nowymi rozwiązaniami. Nowoczesne materiały i technologie oraz współpraca z instytucjami naukowo-badawczymi dały wiele nowych, interesujących konstrukcji nawierzchni. Ich przydatność może być jednak oceniona dopiero po wieloletniej eksploatacji.

Specjaliści Metroprojektu założyli, że na I linii metra należy zastosować jedną z już sprawdzonych nawierzchni, dostosowując ją, bez ustępstw co do jakości, do krajowych materiałów i możliwości producentów. Ze względu na ujawnione w czasie eksploatacji wady, wyeliminowano nawierzchnię tłuczniową oraz najpowszechniej stosowaną w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych nawierzchnię betonową z wtopionymi podkładkami. Mała wysokość konstrukcyjna nawierzchni w tunelu wykonanym metodą tarczową przesądziła o odrzuceniu skomplikowanych rozwiązań z zastosowaniem przekładek wibroizolacyjnych między podbudową a obudową tunelu. Zdecydowano zastosować bezpodkładową, beztłuczniową nawierzchnię typu klejonego, która w Pradze i Budapeszcie zdała egzamin praktyczny. Potwierdziły to dodatkowe badania przeprowadzone, dzięki uprzejmości Dyrekcji Metra w Pradze, przez polskich naukowców. Jej konstrukcja, po wprowadzeniu zmian mających na celu dostosowania do krajowych elementów nawierzchni kolejowych oraz usunięcie zauważalnych usterek, została przedstawiona na rysunku 15.

W podbudowie betonowej jest osadzony węzeł mocowania szyny. Podstawowym elementem przytwierdzającym szynę S60 są śruby kotwiące, wklejone w otwory wywierczone w podbudowie. Nierówności podbudowy eliminuje zastosowanie poduszek – podpór z plastobetonu. Klej i plastobeton są kompozycjami z żywicy epoksydowych.



Rys. 15. Węzeł mocowania szyn z I linii metra w Warszawie – odcinek południowy i centralny 1 – szyna UIC60, 2 – śruba stopowa M22, 3 – nakrętka M22, 4 – podkładka płaska, 5 – łożka sprężysta Skl 3, 6 – przekładka podszynowa typu FC 584 Tiflex, 7 – podkładka żebrowa Pm 60, 8 – tulejka regulacyjna mimośrodowa, 9 – podkładka dolna, 10 – sprężyna śrubowa, 11 – podkładka górna, 12 – nakrętka M24, 13 – podkładka wibroizolacyjna typu FC 104 Tiflex, 14 – przekładka ochronna, 15 – śruba kotwiąca, Ø24/30

W konstrukcji zastosowano dwa stopnie wibroizolacji: pierwszy to współpraca między łapkami sprężystymi przytwierdzającymi szynę pod podkładki żeberowej a podkładką gumową pod jej stopką, drugi to współpraca sprężyn, umieszczonych na śrubach kotwiących z gumową podkładką wibroizolacyjną, usytuowaną pod podkładką żeberową.

Badania przeprowadzone na fragmencie toru pierwszego odcinka wskazały, że nawierzchnia odpowiada stawianym jej wymaganiom.

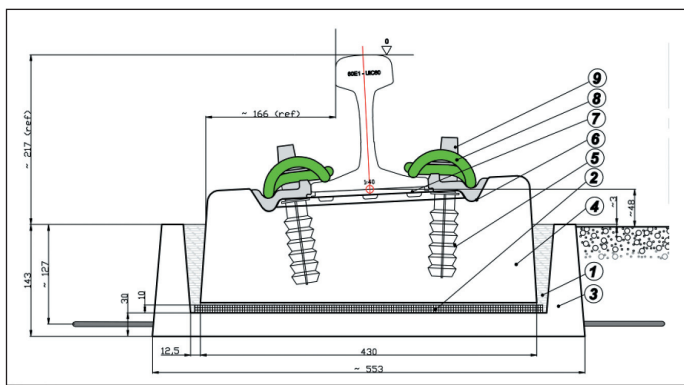
Nawierzchnia „klejona” jest eksploatowana od 1995 roku. Przez około 6 lat nie było także istotnych uciążliwości związanych z wpływem drgań na sąsiednią zabudowę. Wystąpiły one po wprowadzeniu do eksploatacji nowego typu wagonów Metropolis. Na odcinku od stacji Dworzec Gdański do stacji Marymont pojawiła się odczuwalna uciążliwość w postaci drgań, co było zgłaszane cyklicznie w skargach mieszkańców okolicznych budynków.

Skargi mieszkańców na drgania od eksploatacji metra oraz trudne warunki geotechniczne i charakter zabudowy na Bielanych wymagały innego podejścia do projektu nawierzchni na tym końcowym fragmencie I linii metra

Do analizy przyjęto nową nawierzchnię torową typu EBS, oferowaną przez firmę TINES, wyłącznego dystrybutora rozwiązań holenderskiej firmy Edilon BV. Rozwiązanie to, jako jedyne z rozwiązań niekonwencjonalnych systemów nawierzchni bezpodsynekowych, miało w owym czasie aprobatę techniczną CNTK oraz świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typu budowli przeznaczonych do prowadzenia ruchu kolejowego, wydane przez Urząd Transportu Kolejowego RP.

System EBS (Embedded Block System) jest systemem bloków wklejanych w koryta za pomocą masy zalewowej Edilon Corkelast, która zapewnia trwałe i sprężyste mocowanie obu elementów. Bloki są wyposażone w sprężyste węzły mocowania szyn W14 typu Vossloh, a koryta w stalowe kotwy do mocowania w monolitycznym betonie płyty podtorowej i jako kompletne zestawy są dostarczone na budowę.

Wybrano typ nawierzchni o symbolu EBS LR 60E1-MS, który jest systemem konstrukcji toru dla lekkich kolei i metra, to znaczy pojazdów o nacisku osiowym do 160 kN (rysunek 16).



Rys. 16. Podpora blokowa Edilon EBS LR 60E1 – MS

1 – masa zalewowa Edilon Corkelast, 2 – podkładka tłumiąca, 3 – korytko żelbetonowe, 4 – blok żelbetonowy, 5 – dybel mocujący, 6 – izolacja mocowania szyny, 7 – podkładka podszynowa, 8 – łapka sprężysta, 9 – śruba mocująca

Na podstawie przeprowadzonych przez zespół profesora Krzysztofa Stypułę z Politechniki Krakowskiej badań dynamicznych, w oparciu o wytyczne i zalecenia zespołu, wykonano projekt nawierzchni torowej z zastosowaniem podpór blokowych i mat wibroizolacyjnych pod płytą podtorową.

Po zakończeniu i przekazaniu do eksploatacji całego odcinka bielańskiego wykonano badania kontrolne w celu określenia rzeczywistego oddziaływania ruchu pociągów na zabudowę i ludzi. Pomiary drgań wykonano w tych samych budynkach, w których na tym odcinku przeprowadzono wcześniej badania tła dynamicznego i, które uwzględniono w analizie rozwiązań wibroizolacyjnych.

W odniesieniu do wszystkich badanych budynków stwierdzono, na podstawie przeprowadzonych pomiarów, że drgania wywołane przejazdami pociągów w tunelu metra nie są odczuwalne przez konstrukcję tych budynków. Analizy pomierzonych drgań nie wykazały również przekroczeń progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Biorąc pod uwagę to, że podczas wykonania pomiarów drgania były wywołane przejazdami pociągów o bardzo zróżnicowanym stanie kół, można stwierdzić, że wyniki pomiarów w pełni potwierdziły skuteczność zastosowanego rozwiązania wibroizolacji nawierzchni szynowej metra na analizowanym odcinku bielańskim I linii metra w Warszawie.

Biorąc pod uwagę pozytywne wyniki badań na odcinku bielańskim, ten typ nawierzchni torowej zastosowano również na II linii metra w Warszawie.

Podsumowanie

1. Metro zalicza się do skomplikowanych obiektów inżynierskich. Jego projektowanie i realizacja wymaga pracy wielobranżowych zespołów specjalistów z doświadczeniem projektowym i realizacyjnym w tej dziedzinie.
2. Na etapie wstępnych i końcowych prac projektowych należy analizować rozwiązania warunkowe po to, aby w fazie końcowej otrzymać dobre rozwiązania pod względem funkcjonalnym, użytkowym i ekonomicznym.

Literatura

1. *Studia i projekty metra w Warszawie 1928-1958* – praca zbiorowa pod redakcją J. Rossmana, Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa 1962.
2. Artykuły projektantów z Biura Projektów „Metroprojekt” Sp. z o.o., „Inżynieria i Budownictwo”, 1995, nr 1.
3. Szczepański M., Pęski St., *O budowie I linii metra w Warszawie*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2009, nr 8.
4. Domurad J., Miros G., *Rozwiązania konstrukcyjne i realizacja stacji Wawrzyszew i Młociny I linii metra w Warszawie*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2009, nr 8.
5. Gawlewicz U., *Tunel szlakowy B22 I linii metra w Warszawie*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2009, nr 8.
6. Stypuła K., Kozioł K., Miros G., *Rozwiązania nawierzchni torowych I linii metra w Warszawie*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2009, nr 8.
7. Pęski St., Dawidowski J. S., Miros G., Misiurek F., *Koncepcja centralnego odcinka II linii metra w Warszawie*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2009, nr 8.