II linia metra w Warszawie – metody budowy, oddziaływanie na środowisko

tekst: **prof. dr hab. inż. ANNA SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA**, **dr RAFAŁ KUSZYK**,
Politechnika Warszawska, Zakład Geotechniki, Mostów i Budowli Podziemnych

Budowa metra w Warszawie ma długą historię, sięgającą początku XX w. Władze miasta w 1925 r. zdecydowały, aby wzorem innych stolic europejskich rozpocząć prace nad projektem miejskiej kolei podziemnej. Pierwsza koncepcja sieci metra powstała w 1927 r. Zaproponowany układ przewidywał budowę dwóch linii – pierwszej na kierunku północ – południe i drugiej, z Pragi na Wolę, na kierunku wschód – zachód. Jak widać po 100 latach, układ nie zmienił się, a tylko długości linii i lokalizacje stacji są inne.

1. Wstęp

W tym czasie zabezpieczono konstrukcję budowanego tunelu linii średnicowej w miejscu przejścia pod nim I linii metra, co miało miejsce dopiero w latach 90. Zaraz po wojnie, jeszcze w 1945 r., powrócono do prac projektowych, a w latach 1951–1958 budowano w Warszawie I linię metra na kierunku wschód – zachód. Oprócz znaczenia komunikacyjnego, tj. dla przewozów pasażerskich, tunele metra miały też spełniać funkcję strategiczną jako m.in. schrony i dlatego przyjęto założenie budowy metra głębokiego. Przeprowadzono w latach 40. i na początku lat 50. szeroko zakrojone rozpoznanie geologiczne, aby potwierdzić, że trzeciorzędowe utwory plioceńskie, podobnie jak iły eoceńskie (londyńskie), są korzystne dla drążenia głębokich tuneli. Niestety liczne awarie na budowie szybów, względy ekonomiczne i polityczne spowodowały, że realizację metra głębokiego porzucono. Na przełomie lat 70. i 80. rozpoczęto prace nad projektowaniem i budową I linii metra przebiegającej wzdłuż Wisły na kierunku północ – południe. Stacje budowano metodami odkrywkowymi, tunele szlakowe na odcinku śródmiejskim drążono tradycyjną tarczą niezmechanizowaną. W dzielnicach peryferyjnych, jakimi były wtedy Ursynów, Kabaty i Młociny, tunele szlakowe również budowano w głębokich wykopach. Jako obudowę wykopu stosowano ścianę berlińską kotwioną lub rozpieraną oraz ścianę szczelinową, która wtedy była jedynie obudową tymczasową wykopu, a nie – jak obecnie – elementem konstrukcyjnym tunelu. Konstrukcja tunelu była monolityczna, wylewana na mokro, z izolacją przeciwwodną na zewnątrz obudowy. Dopiero na odcinku północnym metra zaczęto projektować i wykonywać ściany szczelinowe jako konstrukcje docelowe (stacja Ratusz). Pierwszą linię budowano od 1983 r. etapami, co wynikało z przyczyn zarówno technicznych (drążenie w centrum miasta odcinków szlakowych tarczą tradycyjną), jak i ekonomicznych – braku finansowania z funduszy centralnych i miejskich. Jako pierwszy oddano w 1995 r. odcinek od Kabat do Politechniki, najbardziej pożądany z punktu widzenia skomunikowania największej sypialni Warszawy, jaką był Ursynów, z centrum miasta. Kolejno w 1998 r. uruchomiono stację Centrum, w 2001 r. – Ratusz, w 2003 r. – Dworzec Gdański, w latach 2005–2008 – trzy stacje na Bielanach. W 2008 r., po 25 latach, zakończono budowę I linii metra, co oznaczało eksploatację 23 km tuneli i 21 stacji.

Jednocześnie z uruchamianiem kolejnych stacji I linii metra pod koniec XX w. rozpoczęto prace nad projektowaniem II linii. W 1992 r. zatwierdzono Miejscowy Plan Ogólny Zagospodarowania Przestrzennego m.st. Warszawy i w latach 2000–2002 opracowano studium techniczne II i III linii metra, a w 2006 r. zatwierdzono ostateczny przebieg II linii.

2. II linia metra w Warszawie

Zgodnie z pierwotnymi założeniami z 1925 r. II linia metra biegnie ze wschodu na zachód i łączy Pragę, Targówek i Bródno z Wolą i Bemowem, a kończy się stacją postojową w Karolinie. Całkowita długość II linii to ok. 24 km. Przebieg II linii wraz z podziałem na etapy oraz I linię metra pokazano na rycinie 1.

Całość inwestycji podzielono na trzy odcinki, zgodnie z fazami i terminami realizacji:

- odcinek centralny o długości 6,5 km, w tym siedem stacji w ścisłym centrum lewo- i prawobrzeżnej Warszawy,
- odcinek zachodni o długości ok. 10 km i osiem stacji, podzielony na trzy etapy budowy – trzy stacje na Woli (etap I), dwie stacje na Bemowie (etap II) oraz dwie stacje i stacja postojowa Karolino (etap III),
- odcinek wschodni o długości 7,5 km i sześć stacji, podzielony na dwa etapy budowy – po trzy stacje na Pradze (etap I) i na Bródnie (etap II).

Obecnie ukończono etap II na Bemowie (otwarcie dwóch stacji Ulrychów i Bemowo w czerwcu 2022 r.), a 30 września 2022 r. oddano do eksploatacji trzy stacje etapu II na Bródnie. Trzy stacje na Pradze i na Woli (etap I) są w użytkowaniu od 2019 r. Nadal trwa wydawanie pozwoleń na budowę ostatniego, trzeciego etapu II linii na Bemowie i Chrzanowie oraz bardzo potrzebnej stacji postojowej Karolino. III linia metra na Pradze i Gocławiu ma być realizowana w niedalekiej przyszłości, obecnie trwają prace studialne i projektowe. Powodzenie

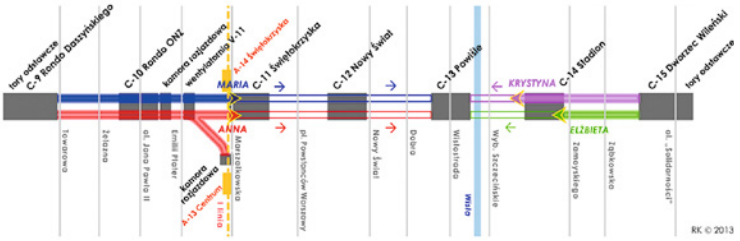
Ryc. 1. Przebieg I i II linii metra na planie Warszawy [1]

tego projektu zależy od finansowania ze środków europejskich i samorządowych.

Jako pierwszy wybudowano odcinek centralny od stacji Rondo Daszyńskiego do stacji Dworzec Wileński. Decyzja o budowie zapadła w 2009 r. i w tym samym roku podpisano kontrakt na wykonanie siedmiu stacji i dwóch tuneli jednotorowych o łącznej długości torów 15,9 km. Budowę rozpoczęto w 2011 r. i odcinek centralny oddano do eksploatacji 8 marca 2015 r.

2.1. Metody budowy II linii metra

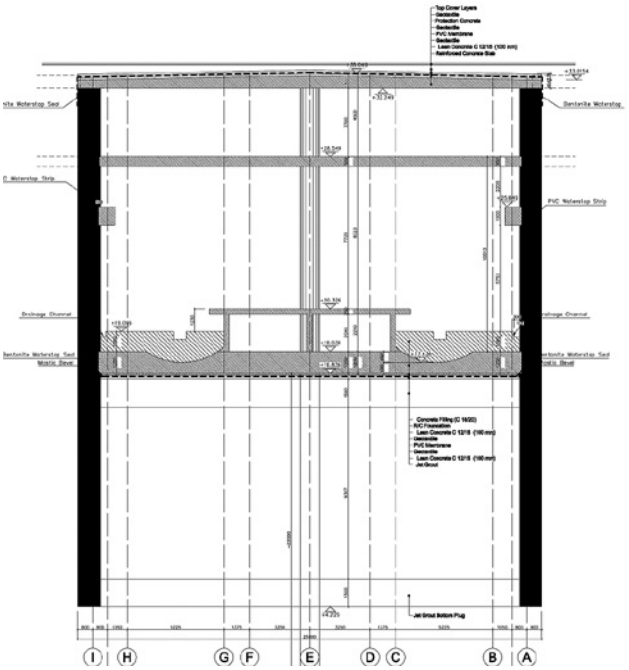
Podobnie jak na I linii, założenie o budowie wszystkich stacji metodą odkrywkową utrzymano także na odcinku centralnym II linii i na obecnie ukończonych przedłużeniach w kierunku wschodnim i zachodnim. Rozwiązanie to wymaga takiego harmonogramu robót, aby stacje były gotowe chociaż w stanie surowym. Należało również podjąć decyzję, która ze stacji będzie szybem startowym, a która odbiorczym tarcz zmechanizowanych drążących tunele szlakowe. Już na etapie dokumentacji przetargowej i uzyskiwania opinii środowiskowej zdecydowano, że tunele będą budowane z wykorzystaniem nowoczesnej technologii tarcz zmechanizowanych, tzw. TBM. Do decyzji głównego wykonawcy pozostawiono wybór rodzaju maszyny. Rozważano również dwa warianty szlaków – jeden tunel dwutorowy lub dwa tunele jednotorowe. Układ tuneli szlakowych wpływa na rodzaj peronów (wyspowe czy boczne) i kubaturę konstrukcji stacji oraz głębokiego wykopu. W przypadku szlaku dwutorowego zaletą jest drążenie tylko jednego tunelu, ale za to maszyną o stosunkowo dużej średnicy, co stwarza problemy z zachowaniem odpowiedniego nadkładu gruntu oraz głębszą niecką osiadania nad tarczą. Rozwiązanie z dwoma tunelami jest korzystne z punktu widzenia oddziaływania prac podziemnych na powierzchnię terenu, natomiast wymaga co najmniej dwóch lub więcej tarcz TBM. Ostatecznie podjęto decyzję o tunelach szlakowych jednotorowych drążonych tarczami zmechanizowanymi TBM typu EPB (*earth pressure balance*) o średnicy 6,5 m. Trzy maszyny sprowadzono w elementach do Warszawy drogą lądową, a następnie dwie z nich zmontowano i umieszczono w szybie startowym na stacji Rondo Daszyńskiego. Pierwotny harmonogram przewidywał drążenie odcinka centralnego dwoma maszynami w odstępie technologicznym ok. 100 m od stacji startowej do stacji Centrum Nauki Kopernik (CNK), której zachodni korpus był szybem odbiorczym dwóch maszyn. Trzecia maszyna miała rozpocząć drążenie jednego z tuneli szlakowych od stacji Dworzec Wileński i po przejściu pod Wisłą wejść do wschodniego korpusu stacji CNK. Tam po obróceniu miała, po wydrążeniu drugiego tunelu, wrócić do szybu startowego. Jednak opóźnienia spowodowały, że wykonawca kontraktu zdecydował o zakupie kolejnej, czwartej maszyny, tak aby dotrzymać ustalonych terminów. Ostatecznie dwie maszyny wystartowały ze stacji Dworzec Wileński i dotarły do stacji CNK. Na rycinie 2 pokazano harmonogram i kolejność drążenia tuneli szlakowych centralnego odcinka II linii metra czterema maszynami TBM. Podano również imiona maszyn, gdyż każda, nie tylko w Polsce, ale i na świecie, nosi imię nadawane na cześć postaci historycznej (np. Anna – księżna Anna Mazowiecka), legendarnej lub zasłużonej dla miasta (Krystyna – Krystyna Krahelska) albo regionu.



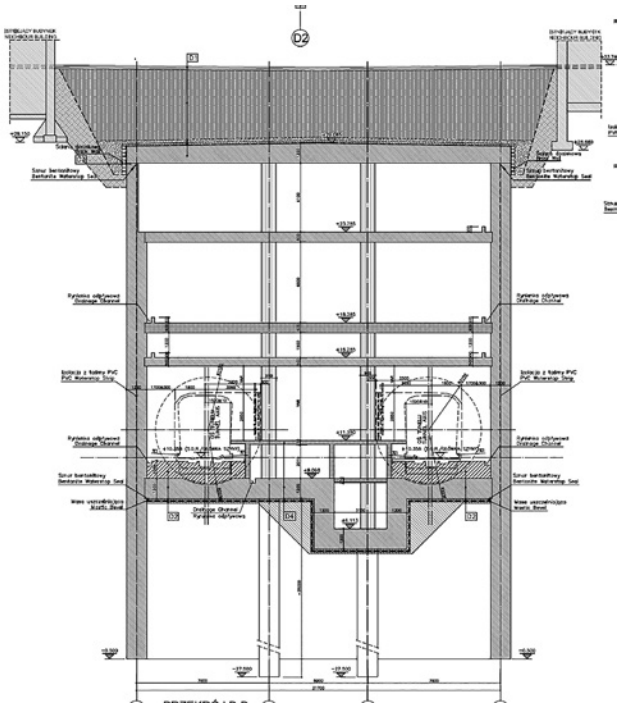
Ryc. 2. Harmonogram prac czterech tarcz zmechanizowanych TBM na budowie odcinka centralnego II linii metra [1]

2.2. Metody budowy stacji

Jak wspomniano powyżej, wszystkie stacje na odcinku centralnym II linii metra oraz na odcinkach w kierunku wschodnim (sześć stacji) i zachodnim (pięć stacji) są wykonywane metodą stropową, inaczej nazywanej w literaturze metodą mediolańską. W pierwszej fazie wykonuje się ściany szczelinowe o grubości od 0,80 m do 1,40 m i głębokości wynikającej z projektu i zagłębienia stacji. Następnie po wykonaniu pierwszego od poziomu terenu stropu głębi się wykop pod kolejne stropy podziemnych kondygnacji aż do osiągnięcia poziomu płyty dennej. Ostatni etap to wykonanie płyty dennej, często kotwionej dodatkowo palami. Rycina 3 przedstawia przekrój poprzeczny stacji Rondo Daszyńskiego, od której rozpoczęto budowę całej II linii i która była szybem startowym dwóch maszyn TBM. Na rycinie 4 pokazano przekrój najgłębszej stacji na II linii: Nowy Świat – Uniwersytet. Z racji przejścia II linii metra pod Wisłą w celu uzyskania odpowiedniego nadkładu gruntu nad tarczą głębokość stacji Nowy Świat – Uniwersytet wynosi 26 m, a ścian szczelinowych o grubości 1,2 m – 31 m. Druga najgłębsza stacja – Centrum Nauki Kopernik – ma głębokość 26,5 m i ściany szczelinowe o grubości 1,4 m sięgają 36 m p.p.t. W obydwu przypadkach ze względu na duże wartości momentów zginających w ścianach szczelinowych zaprojektowano trzy stropy pośrednie. Z uwagi na konieczność przejścia przez stacje maszyny TBM rozpiętość przęsła ściany szczelinowej wynosi 8,6 m. Jak już wspomniano,



Ryc. 3. Przekrój poprzeczny stacji Rondo Daszyńskiego budowanej metodą stropową [2]



Ryc. 4. Przekrój poprzeczny stacji Nowy Świat – Uniwersytet, jednej z dwóch najgłębszych na II linii [2]

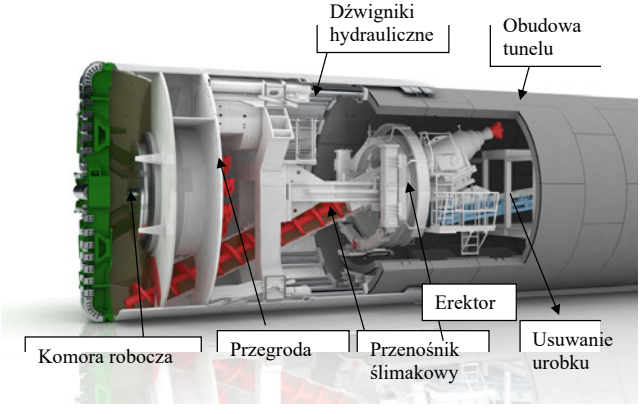
stacja CNK, nazywana wówczas roboczo Powiśle lub po prostu C13, była szybem odbiorczym w sumie czterech tarcz. Dlatego m.in. terminowe wykonanie tej stacji, której fragment znajduje się pod tunelem Wisłostrady, był kluczowym elementem harmonogramu prac. Awaria w sierpniu 2012 r. zatrzymała prace na rok. Po wielokrotnych próbach opanowania sytuacji za pomocą iniekcji nisko- i wysokociśnieniowej zastosowano mrożenie gruntu ciekłym azotem i solanką. Doświadczenia z tej budowy wykorzystali później wykonawcy tunelu pod Martwą Wisłą do przebicia w zamrożonym gruncie przejść awaryjnych między dwoma tunelami drogowymi. Następnie technologia mrożenia została zastosowana do budowy dwóch wyjść ewakuacyjnych w tunelu pod Świną w Świnoujściu.

Stacje na przedłużeniach wschodnim i zachodnim nie są już tak głębokie, natomiast gabaryty stacji są bardzo zróżnicowane. Np. stacja Bemowo, usytuowana w sąsiedztwie ratusza Bemowa, ma skomplikowany układ w planie wynikający z konieczności skomunikowania pod ziemią przystanków tramwajowych, autobusowych oraz urzędu dzielnicy. Stąd wynika znaczna jej długość – 459 m, i kubatura ponad 224 tys. m^3. Z kolei ostatnia stacja odcinka wschodniego – C21 Bródno – jest największa ze wszystkich na II linii z uwagi na rozbudowany układ 11 torów odstawczych służących do zawracania oraz postoju nawet 13 składów pociągów metra. Stacja ma długość prawie 700 m (697,5 m), a jej szerokość w niektórych miejscach wynosi 70 m. Tak duże gabaryty mają wpływ na metodę budowy, sposób odwodnienia podłoża oraz oddziaływanie głębokiego wykopu stacji na sąsiednie obiekty.

Podkreślić należy, że żadna z wybudowanych 18 stacji nie jest konstrukcją typową, powtarzalną. Zarówno na etapie projektów budowlanych, jak i wykonawczych należało przeanalizować zmienne warunki geologiczne i geotechniczne, przebieg niwelety, głębokość posadowienia i wynikające stąd działania związane z odwodnieniem, wzmacnianiem lub uszczelnianiem podłoża (najczęściej iniekcją strumieniową) oraz wzajemne oddziaływanie sąsiedniej zabudowy (często mieszkalnej) i wpływ na warunki hydrologiczne. Wiele z elementów wymienionych powyżej należało uwzględnić już na etapie opracowywania opinii środowiskowej, będącej integralną częścią projektu budowlanego, bez której nie można uzyskać pozwolenia na budowę. W projekcie konstrukcji wykorzystywane są zaawansowane narzędzia obliczeniowe – MES 2D, 3D i różne modele konstytutywne podłoża oraz programy do projektowania konstrukcji żelbetowych. Oprócz stacji zostało wybudowanych metodą stropową kilkanaście mniejszych obiektów, takich jak np. wentylatornie szlakowe.

2.3. Metody budowy tuneli szlakowych

Tunele szlakowe na odcinku centralnym i na obydwu przedłużeniach były drążone tarczami zmechanizowanymi TBM typu EPB – wyrównywanych ciśnień gruntowych. Schemat konstrukcyjny tarczy przedstawiono na rycinie 5. W tym rodzaju tarcz stateczność przodka, tj. zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej, zapewnia urobiony przez głowicę skrawającą grunt wypełniający komorę roboczą. Szczegółowy opis konstrukcji tej maszyny oraz zasada działania zostały szczegółowo omówione w m.in. w pozycjach [3, 4, 5]. Poniżej opisano jej główne elementy konstrukcyjne.



Ryc. 5. Schemat tarczy wyrównywanych ciśnień gruntowych EPB [6]

Powłoka tarczy – jest to stalowy walec o grubości od kilkunastu do kilkudziesięciu milimetrów i długości równej ok. 0,8 D (gdzie D to średnica tarczy), pod osłoną którego odbywa się cały proces urabiania gruntu, przesuwu maszyny i układania obudowy tunelu. Średnica powłoki tarczy jest zmienna – od większej przy głowicy do mniejszej o kilka centymetrów w ogonie – dzięki kształtowi stożka mniejsze są opory ruchu przy przesuwie maszyny i mniejsze tarcie na pobocznicy powłoki, co ma wpływ na moc silników poruszających tarczę.

Głowica skrawająca – element obrotowy zaopatrzony w narzędzia skrawające – dyski (pojedyncze i podwójne), noże, frezy oraz otwory, przez które grunt dostaje się do komory z urobkiem znajdującej się bezpośrednio za głowicą. Obrót głowicy jest możliwy dzięki kilku lub kilkunastu silnikom elektrycznym o łącznej mocy dochodzącej przy głowicach o średnicy powyżej 15 m do 4000 kW, a nawet 5500 kW. Głowica wykonuje (w zależności od średnicy) od jednego do trzech obrotów na minutę. Moment obrotowy głowicy przeciętnie jest zawarty w przedziale od 23 000 kNm do 37 000 kNm. Średnice głowic skrawających wahają się od kilku do kilkunastu metrów. Największa obecnie tarcza EPB ma średnicę 17,5 m. Układ narzędzi skrawających, powierzchnia otworów oraz inne elementy głowicy są projektowane dokładnie do spodziewanych warunków geotechnicznych urabianych gruntów lub skały [5]. Na rycinie 6 widać głowicę skrawającą tarczy EPB warszawskiego metra w momencie opuszczania do szybu startowego, a na rycinie 7 tę samą głowicę po wydrążeniu jednego z tuneli szlakowych.

Przegrody ciśnieniowe, ściany kontaktowe – jedna lub więcej, oddzielające komorę z urobkiem i komorę roboczą od pozostałej przestrzeni maszyny, w której panuje ciśnienie atmosferyczne. Zamknięcie obszaru, gdzie urabiany jest grunt i występuje bezpośredni kontakt z wodą gruntową na przodku, jest jednym z elementów gwarantujących bezpieczeństwo prac w tarczach zmechanizowanych.

Ryc. 6. Widok głowicy skrawającej tarczy Maria w momencie opuszczania do szybu startowego [7]

Ryc. 7. Widok głowicy skrawającej tarczy Maria po wydrążenia tunelu szlakowego i przejściu przez ścianę szczelinową stacji zbrojoną prętami z włókna szklanego [7]

Dźwigniki / lewary hydrauliczne spełniają podwójną funkcję – służą do przesuwu maszyny oraz utrzymują nacisk na głowicę skrawającą. Tłoki lewarów mają długość odpowiadającą szerokości pojedynczego segmentu obudowy tunelu. Dźwigniki hydrauliczne ułożone są na obwodzie maszyny, najczęściej po dwa na jedną stopę, opierając się o już wykonaną obudowę tunelu.

Erektor – dźwig próżniowy do montażu żelbetowych segmentów tworzących kolejne pierścienie obudowy tunelu.

Przenośnik ślimakowy – w tarczach typu EPB urządzenie służące do odprowadzenia urobku z komory roboczej oraz, co ważniejsze, do redukcji ciśnienia panującego w komorze roboczej maszyny do wartości ciśnienia atmosferycznego we wnętrzu tarczy. Długość przenośnika (jego ślimacznicy) zależy od różnicy ciśnień między komorą roboczą a wnętrzem tarczy i wynosi czasami kilkanaście metrów. Prawidłowa praca i stała kontrola tego elementu konstrukcyjnego maszyny EPB gwarantuje utrzymanie właściwego, wynikającego z wartości parcia gruntu i wody, ciśnienia w komorze roboczej, stateczności przodka oraz ocenę jednego z podstawowych parametrów drążenia, jakim jest tzw. strata objętości V_L, czyli *volume loss*. Znajomość wartości straty objętości, wyrażonej w procentach, jest niezbędna do wyznaczenia głębokości i zasięgu niecki osiadania nad tunelem.

Urządzenia do przeprowadzenia iniekcji uszczelniającej pustkę za obudową segmentową to kolejny element decydujący o oddziaływaniu robót podziemnych na powierzchnię terenu. Właściwie przeprowadzona iniekcja uszczelniająca i odpowiednie wypełnienie przestrzeni, jaka powstaje po przejściu powłoki tarczy między gruntem a obudową segmentową tunelu, wpływa na osiadania powierzchni terenu nad drążonym tunelem.

Za tarczą instalowane jest zaplecze, tzw. pociąg, składające się z kilku części, gdzie umieszczono wszystkie niezbędne urządzenia do prowadzenia robót i budowy tunelu, w tym urządzenia do transportu żelbetowych segmentów obudowy tunelu do tarczy oraz do wyprowadzania urobku na powierzchnię. Długość zaplecza w warszawskim metrze wynosiła 90 m. Obudowa tunelu II linii metra składa się z sześciu (pięć typowych i jeden kluczowy) żelbetowych segmentów o grubości 0,3 m, jedynie w tunelach pod Wisłą zastosowano segmenty o grubości 0,5 m.

Budowę tuneli rozpoczęto od wykonania na płycie fundamentowej kolejnych stacji – komór startowych, tzw. kołyski, czyli miejsca, gdzie zostały opuszczone maszyny (por. ryc. 6). Aby tarcza rozpoczęła drążenie i budowę tunelu, w komorze startowej wykonano konstrukcję oporową, od której odpychały się tłoki lewarów, przesuwając tarczę w grunt. Potem zbudowano kilka pierścieni obudowy i rozpoczęto właściwe drążenie i budowę tunelu. Ten etap prac na budowie metra pokazano na rycinie 8.

Tarczą zmechanizowaną tunel buduje się w wielokrotnie powtarzalnych cyklach: urabianie gruntu, przesuw maszyny i następnie układanie obudowy tunelu. Podczas urabiania gruntu głowicą skrawającą komora robocza wypełnia się urobkiem. Urobek stopniowo jest odprowadzany z komory i maszyna przesuwa się – tłoki lewarów wysuwają się na całą swoją długość, odpychając się od już wykonanej obudowy tunelu. Następnie wciąga się stopniowo na obwodzie maszyny tłoki lewarów i na to miejsce z pomocą erektora układa się żelbetowe segmenty

Ryc. 8. Konstrukcja oporowa i zmontowany fragment obudowy tunelu w szybie startowym tarczy [7]

tworzące kolejne pierścienie obudowy tunelu. Po zmontowaniu pierścienia przeprowadza się iniekcję z zaczynu cementowego uszczelniającą pustkę za obudową.

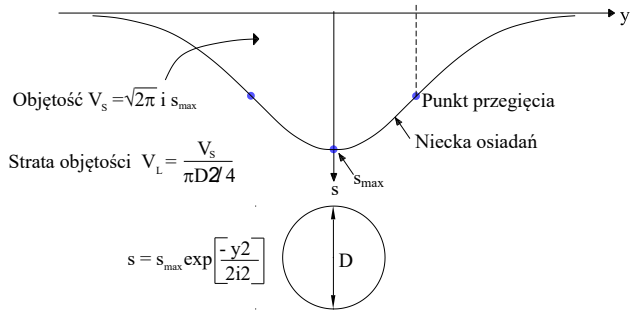
Tarcze wyrównanych ciśnień gruntowych najlepiej przystosowane są do drążenia tuneli w gruntach spoistych, o mniejszej przepuszczalności wody i bardziej jednorodnych. W tarczy EPB konieczne jest stosowanie dodatków, czyli plastyfikatorów. Są one wstrzykiwane przez specjalne dysze usytuowane w głowicy skrawającej, w ścianie ciśnieniowej komory roboczej, w przenośniku ślimakowym, a niekiedy też dookoła przedniej części powłoki tarczy. Na skutek mieszania gruntu z plastyfikatorem za pomocą głowicy urabiającej dochodzi do homogenizacji urobku i jego uszczelnienia. W Warszawie jako plastyfikator najczęściej stosowano pianę mydlaną – jej zaletą była biodegradowalność, mimo to urobek z tarczy EPB jest traktowany jako odpad i musi być odpowiednio składowany.

3. Oddziaływanie prac tunelowych na środowisko

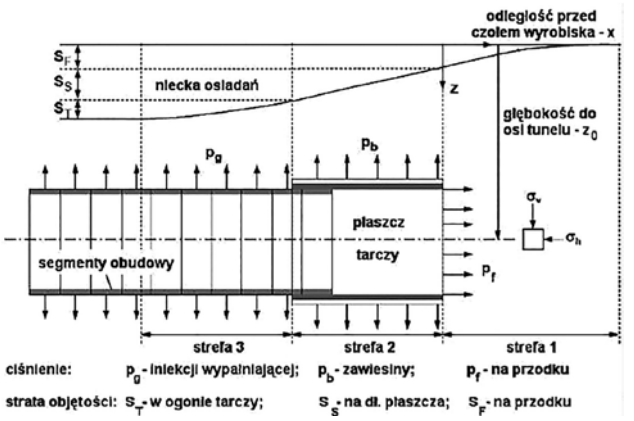
Budowniczowie II linii warszawskiego metra po raz pierwszy w kraju zetknęli się z problemem oddziaływania robót podziemnych na szeroko pojęte środowisko, czyli powierzchnię terenu, obiekty sąsiednie, infrastrukurę oraz wody podziemne. Trasa II linii biegnie przez ścisłe centrum Warszawy, dzielnice mieszkaniowe, pod obiektami zabytkowymi i infrastrukturą techniczną. Należało ocenić teoretycznie głębokość i zasięg niecki osiadania nad tunelami drążonymi tarczą oraz wyznaczyć wpływ wykonania głębokich wykopów na przemieszczenia budynków sąsiadujących z budowanymi stacjami. Jednym z głównych oddziaływań prac związanych z drążeniem tuneli z zastosowaniem tarcz zmechanizowanych są deformacje powstające na powierzchni terenu. Wielu z badaczy zakłada, że powstająca niecka w przekroju poprzecznym ma kształt krzywej Gaussa, jej równanie i wykres pokazano na rycinie 9 [8, 9, 10]. Oprócz niecki poprzecznej powstaje niecka podłużna, na którą składają się osiadania nad głowicą i ogonem tarczy oraz obudową tunelu (ryc. 10).

Analizując rozwój niecki podłużnej, składowe osiadania można podzielić na [8]:

- osiadania krótkoterminowe (natychmiastowe) powodowane przejściem tarczy. Ich wielkość zależy głównie od spełnienia warunku równowagi i stanu granicznego na przodku, na który ma wpływ stateczność przodka, tempo robót tunelowych, czas instalacji poszczególnych pierścieni obudowy oraz czas i jakość



Ryc. 9. Wykres niecki osiadania powstającej nad tunelem drążonym tarczą [8, 10]



Ryc. 10. Elementy składowe wzdłużnej niecki osiadania nad tunelem drążonym tarczą [8, 10]

wypełniania pustek między obudową, płaszczem tarczy i gruntem (w części ogonowej tarczy). Osiadania te uwidaczniają się w pewnej odległości przed czołem wyrobiska i kończą się w momencie uzyskania odpowiedniej wytrzymałości przez medium wypełniające pustki za obudową;

- osiadania spowodowane odkształceniem obudowy tunelu. Dotyczą głównie tuneli o dużych średnicach wykonanych na niewielkich głębokościach. Ich znaczenie jest stosunkowo nieduże z uwagi na możliwość przewidzenia występujących w nadkładzie gruntu obciążeń i odpowiednio sztywne zaprojektowanie obudowy;
- osiadania długoterminowe spowodowane konsolidacją gruntów spoistych lub ściśliwych, zależną od szybkości rozpraszania ciśnienia porowego oraz od pełzania uzależnionego od rodzaju gruntu. Czas pojawienia się tych przemieszczeń zależy od cech gruntu i może wynieść od tygodni czy miesięcy (w piaskach i gruntach słabo skonsolidowanych) do lat (zwarte iły).

Istnieje wiele metod oceny deformacji podłoża nad tunelem drążonym tarczą – są to metody empiryczne (sformułowane dla bardzo konkretnych sytuacji geotechnicznych) i metody numeryczne wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES) [11, 12]. W każdej z tych metod pojawia się element prawidłowej oceny warunków geologicznych, wartości parametrów geotechnicznych [4, 13, 14] oraz czynnik technologiczny wynikający z typu maszyny TBM zastosowanej w konkretnym realizowanym przypadku [5]. Na etapie opracowania opinii środowiskowej prognoza głębokości i zasięgu niecki osiadania jest istotnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa obiektów położonych bezpośrednio nad drążonym tunelem i w strefie oddziaływania robót tunelowych [3].

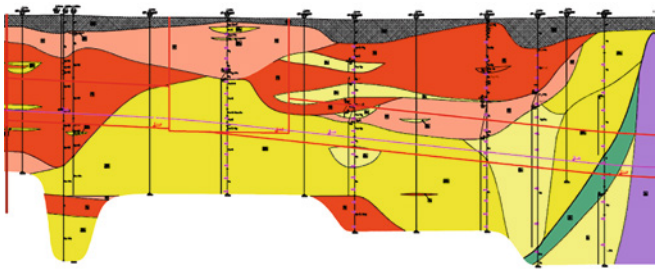
Metodami empirycznymi można zdefiniować zasięg i głębokość niecki osiadania nad pojedynczym tunelem. W przypadku drążenia dwóch równoległych tuneli, tak jak to miało miejsce

w Warszawie, przyjmuje się, że całkowite osiadania wynikają z superpozycji dwóch, liczonych niezależnie, sąsiadujących niecek osiadania. Metody numeryczne są wykorzystywane dopiero na etapie weryfikacji założeń projektu budowlanego lub wykonawczego. Trudności w stosowaniu MES są związane z dokładnym rozpoznaniem warunków geotechnicznych na trasie tunelu, zakresem badań podłoża, metodą oceny parametrów mechanicznych i fizycznych gruntów w przekroju drążonego tunelu oraz nad nim.

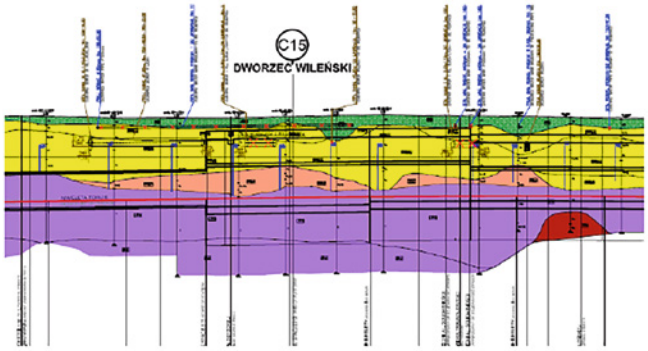
Uzupełnieniem teoretycznej prognozy jest projekt monitorowania przemieszczeń powierzchni terenu, obudowy tunelu, obiektów w strefie oddziaływania oraz wód gruntowych. W projekcie tym oprócz szczegółowego opisu aparatury i lokalizacji przekrojów pomiarowych należy ustalić progi dopuszczalnych wartości przemieszczeń (progi uwagi, alertu i alarmu) z punktu widzenia bezpieczeństwa budynków i budowli. W rzeczywistości osiadanie powierzchni terenu zależy od wielu czynników, takich jak:

- warunki geologiczne, hydrogeologiczne i geotechniczne na trasie tunelu,
- geometria tunelu – średnica i wielkość nadkładu gruntu nad stropem tunelu,
- zagłębienie poniżej poziomu terenu – tunel płytki lub głęboki,
- metody drążenia – rodzaj maszyny TBM – zawiesinowa czy EPB,
- jakość wykonawstwa i zarządzania robotami podziemnymi.

Na II linii metra w Warszawie wszystkie tunele szlakowe są tunelami płytkimi. Jako umowną głębokość graniczną, liczoną od powierzchni terenu do rzędnej stropu, przyjmuje się wartość odpowiadającą trzem średnicom tunelu, czyli 19,5 m. Jak wspomniano powyżej, wykonawca kontraktu podjął decyzję o zastosowaniu tarczy wyrównywanych ciśnień gruntowych EPB ze względu na warunki geologiczne i geotechniczne na całej trasie II linii. Tunele szlakowe biegną w utworach czwartorzędowych i trzeciorzędowych. Najstarsze osady wzdłuż trasy II linii to utwory pliocenu (w przewadze iły i iły pylaste, lokalnie pyły). Głębokość występowania stropu pliocenu na wysoczyźnie jest zmienna – od ok. 12 m p.p.t. (stacja Nowy Świat – Uniwersytet) do ok. 20 m p.p.t. Przekrój geotechniczny wzdłuż tunelu szlakowego między stacjami Rondo ONZ a Świętokrzyska pokazano na rycinie 11. Najstarsze utwory czwartorzędowe to osady akumulacji lodowcowej występujące na stropie pliocenu w formie ciągłej warstwy glin piaszczystych, lokalnie piasków gliniastych. Pod glinami morenowymi wysoczyzny zalega ciągła warstwa piasków średnich, lokalnie z domieszką żwirów. W dolinie Wisły i na jej terasach na stropie pliocenu leży warstwa piasków rzecznych o zróżnicowanej miąższości. Przekrój geotechniczny na jednej ze stacji po stronie praskiej przedstawia rycina 12. Zwierciadło wody gruntowej występuje na głębokości 6–7 m p.p.t.



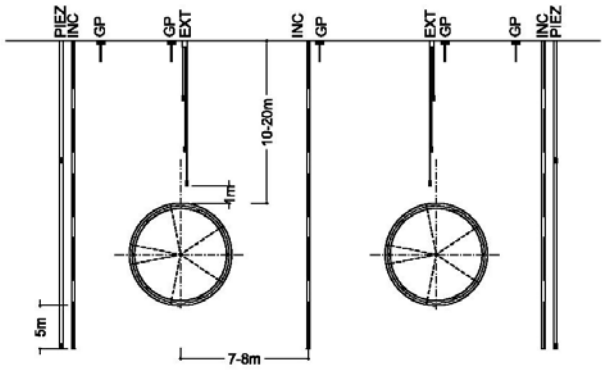
Ryc. 11. Przekrój geotechniczny wzdłuż tuneli szlakowych II linii metra na odcinku centralnym na wysoczyźnie [15]



Ryc. 12. Układ warstw geotechnicznych po stronie praskiej II linii metra [15]

na odcinku centralnym wysoczyzny i na odcinku zachodnim. Po stronie praskiej, na odcinkach wschodnich II linii, wody występują w osadach piaszczysto-żwirowych tarasu praskiego o zwierciadle generalnie swobodnym, zasilanym bezpośrednio z rzeki.

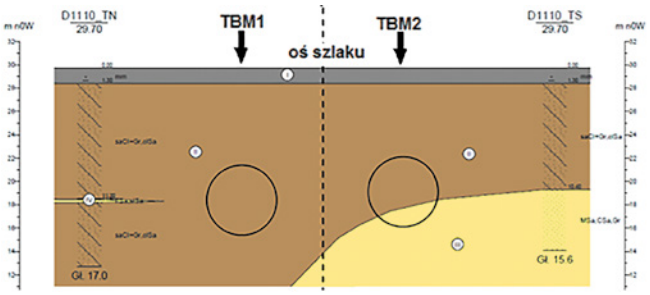
Ze względu na fakt, że tunele metra drążone tarczą biegną przez obszary silnie zurbanizowane, ze zwartą zabudową miejską, zaprojektowano rozbudowany monitoring przemieszczeń powierzchni terenu. Pomiary wykonywano przez cały okres prowadzenia prac tunelowych w kilkudziesięciu przekrojach badawczych, wyposażonych w aparaturę pomiarową, na którą składały się gruntowe repery niwelacyjne GP, inklinometry INC, ekstensometry EXT i piezometry PIEZ. Repery gruntowe były zainstalowane we wszystkich przekrojach badawczych, natomiast pozostała aparatura w wybranych ze względu na lokalizację przekroju i geotechnikę. Na rycinie 13 pokazano przekrój badawczy na odcinku szlaku C10, wyposażony w trzy inklinometry, dwa ekstensometry, cztery piezometry i pięć reperów. Taki układ gwarantował ocenę rzeczywistej głębokości i zasięgu niecki osiadania powstającej podczas drążenia tuneli szlakowych centralnego odcinka II linii metra – północnego jako pierwszy TBM1, i południowego TBM2 jako drugi, w odstępie technologicznym ok. 100 m. Przekroje badawcze były usytuowane wzdłuż tuneli szlakowych w odstępie ok. 200 m.



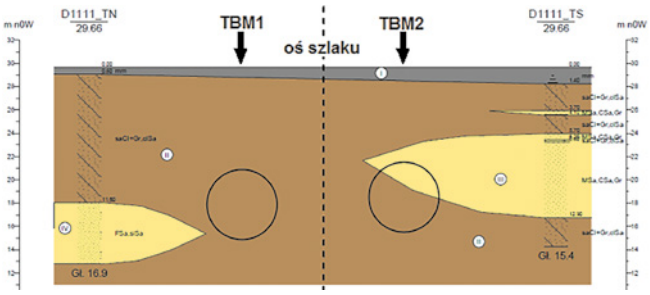
Ryc. 13. Przekrój pomiarowy wraz z lokalizacją aparatury badawczej [10]

Celem prowadzonych badań było po pierwsze określenie rzeczywistej niecki osiadania – jej maksymalnej głębokości i zasięgu nad dwoma tunelami drążonymi TBM EPB. Po drugie, weryfikacja wyników analiz teoretycznych, prowadzonych kilkoma metodami empirycznymi, i stwierdzenie, która z nich najlepiej opisuje powstającą nieckę. Po trzecie i najważniejsze, stała obserwacja zagrożenia dla obiektów znajdujących się nad lub w sąsiedztwie trasy tuneli, ewentualna korekta parametrów technicznych maszyny bądź w przypadku przekroczenia progów alarmowych wstrzymanie robót podziemnych. Poniżej przedstawiono dwa przykładowe

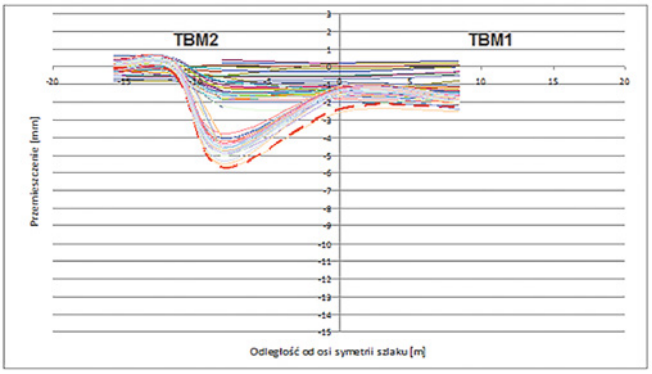
przekroje badawcze – układ warstw geotechnicznych (ryc. 14 i 15) oraz wyniki pomiarów rozwoju niecki podczas pochodu maszyny (ryc. 16 i 17). Osiadania zostały zebrane narastająco od początku pomiarów (wykonywanych z wyprzedzeniem ok. dwóch miesięcy w stosunku do pochodu przodka tarczy) aż do momentu przejścia tarczy i ustabilizowania się osiadań (do ok. siedmiu, ośmiu miesięcy). Częstotliwość pomiarów była zróżnicowana w zależności od odległości przodka tunelu przed i za przekrojem. Na rycinach zaznaczono czerwoną, przerywaną linią zasięg maksymalnego osiadania, uwzględniającego osiadania długoterminowe zaistniałe w okresie pomiarowym. W większości przekrojów analizowanych w pracy [10] rozwój niecki osiadania, narastający w czasie, pokazuje w pierwszej kolejności wystąpienie osiadania nad tunelem północnym – prawa strona wykresów (tarcza północna TBM1 przeszła jako pierwsza), a następnie nieregularne powiększanie się osiadania nad tunelem południowym – lewa strona wykresów, który został wykonany w późniejszym okresie. Tak też jest to widoczne na dwóch przykładowych wykresach (por. ryc. 16 i 17).



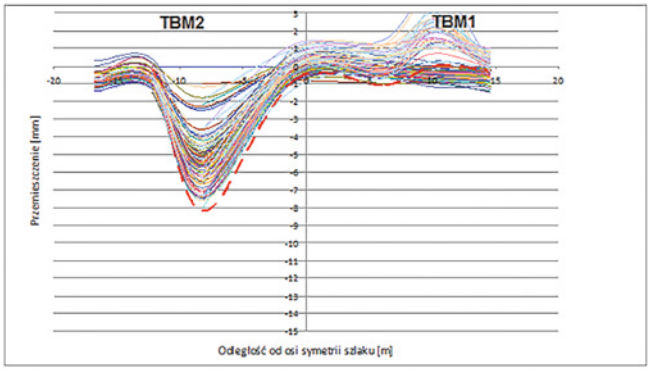
Ryc. 14. Układ warstw geotechnicznych w przekroju pomiarowym D1110 na szlaku D10 II linii metra [10]



Ryc. 15. Układ warstw geotechnicznych w przekroju pomiarowym D1111 na szlaku D10 II linii metra [10]

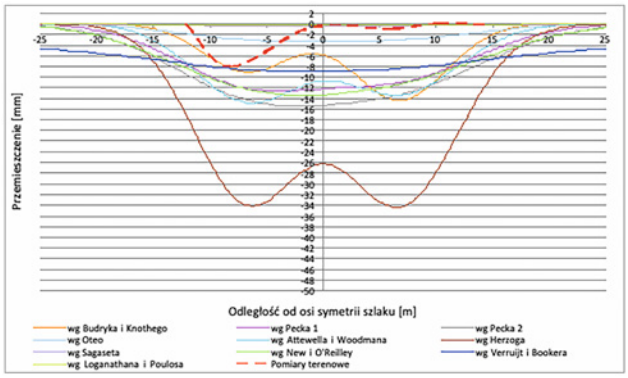


Ryc. 16. Rozwój niecki osiadania w przekroju badawczym D1110 podczas drążenia tunelu północnego TBM1 i południowego TBM2 [10, 16]



Ryc. 17. Rozwój niecki osiadania w przrekroju badawczym D1111 podczas drążenia tunelu północnego TBM1 i południowego TBM2 [10, 16]

Wyniki pomiarów w terenie porównano z rezultatami obliczeń analitycznych kilkoma wybranymi metodami empirycznymi [16]. Na wykresie na rycinie 18 zaznaczono czerwoną, przerywaną linią rzeczywistą nieckę osiadania, ustaloną na podstawie pomiarów, a kolorami wynikającą z obliczeń. Jak widać, prognoza w niektórych przypadkach daleko odbiega od realnych wartości osiadania powierzchni terenu.

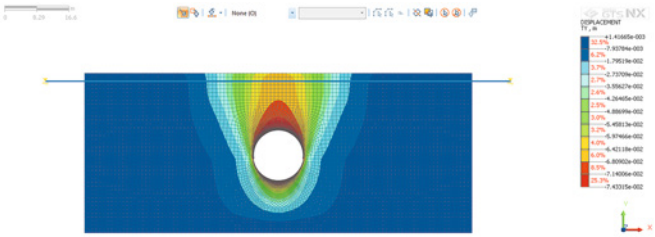


Ryc. 18. Porównanie wyników obliczeń metodami empirycznymi z rzeczywistą niecką osiadania [16]

Dane z pomiarów w kolejnych przekrojach pomiarowych świadczą o tym, że nie ma zgodności obliczeń analitycznych i danych z pomiarów, jedynie rząd wielkości prognozowanych osiadań jest zgodny – wartości wyrażone w milimetrach. Założenie symetrii, tzn. sumowanie niecek osiadania nad pojedynczym tunelem jako wynikowa, obliczeniowa niecka nad dwoma tunelami drążonymi tarczą, nie odpowiada rzeczywistości [16]. Pomierzona głębokość niecki osiadania nad tunelem północnym, drążonym jako pierwszy, waha się od 0 mm do 5 mm, a nad tunelem południowym, drążonym w drugiej kolejności, wynosi od 0 mm do 8 mm. Zasięg obydwu niecek wynosi ok. 30 m, licząc od osi symetrii szlaku.

Jak wynika z przytoczonego przykładu, metody analityczne w większości przypadków prowadzą do niedoszacowania lub przeszacowania głębokości i zasięgu niecki osiadania. Różnice te są większe, gdy drążone są dwa równoległe tunele i sumuje się dwie teoretyczne niecki. Z drugiej strony, proste w stosowaniu i niewymagające wielu danych geotechnicznych metody analityczne oceny głębokości i zasięgu niecki osiadania nad tunelami drążonymi tarczą są dobrym narzędziem do pierwszego przybliżenia spodziewanych oddziaływań prac tunelowych.

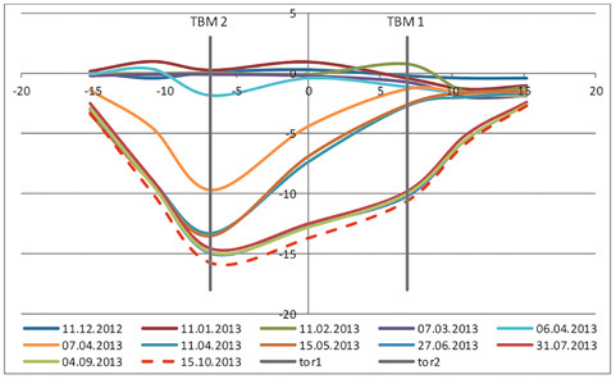
Innym, dokładniejszym sposobem są metody numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych 2D i 3D. Na rycinie 19 pokazano przykładowy model numeryczny i rozkład przemieszczeń pionowych nad tunelem drążonym tarczą EPB.



Ryc. 19. Niecka osiadania nad tunelem drążonym tarczą EPB [17]

Metody numeryczne wymagają stosowania geotechnicznych programów obliczeniowych przeznaczonych do analizy zagadnień współpracy konstrukcji z podłożem. Programy te posługują się zaawansowanymi modelami konstytutywnymi podłoża, takimi jak *hardening soil* (HS) czy *hardening soil small* (HSS), oprócz tradycyjnie już wykorzystywanego w obliczeniach geotechnicznych modelu *Coulomba Mohra (*MC). Stosowanie MES wymaga właściwej oceny parametrów modeli konstytutywnych i parametrów mechanicznych gruntów [14], co pociąga za sobą konieczność przeprowadzenia właściwego rozpoznania geotechnicznego i badań laboratoryjnych oraz *in situ* cech fizycznych i mechanicznych warstw geotechnicznych, w których posadowiony jest tunel. Jest to kosztowne, wymaga czasu i akceptacji ze strony wykonawcy lub inwestora. Jednocześnie analiza danych z obliczeń numerycznych i wyników monitoringu daje możliwość prowadzenia analiz wstecznych i oceny tą metodą realnych wartości parametrów gruntu, szczególnie modułu odkształcenia, który jest jednym z wiodących w obliczeniach MES [13].

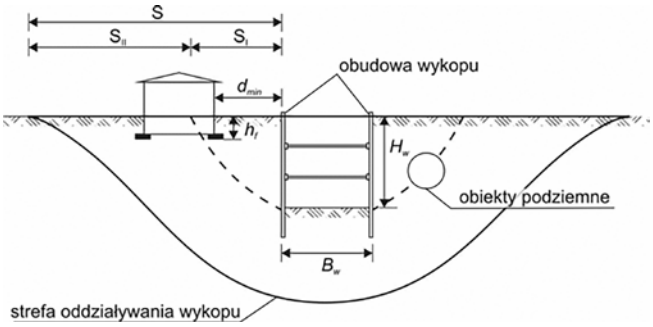
Dodać należy tutaj, że osiadania nad tunelem TBM w dużym stopniu zależą również od doświadczenia i kwalifikacji personelu technicznego prowadzącego maszynę. Utrzymywanie właściwego ciśnienia w komorze roboczej, ciśnienie w lewarach hydraulicznych, prędkość drążenia i zakładania obudowy, ciśnienie iniekcji uszczelniającej, szczelność ogona tarczy oraz przestoje techniczne maszyny – to wszystko wpływa na rozwój poprzecznej i podłużnej niecki. W analizie wyników pomiarów trudno oddzielić od siebie te wszystkie czynniki. Należy jednak w przypadku wystąpienia nieoczekiwanych zjawisk przeanalizować parametry techniczne drążenia, które są na bieżąco rejestrowane przez system czujników zainstalowanych w kabinie sterowania TBM. Budowa odcinka centralnego II linii metra była dla obsługi technicznej TBM dużym poligonem doświadczalnym, służyła m.in. do nabrania doświadczenia, jak zachowuje się tarcza EPB w warszawskich gruntach czwarto- i trzeciorzędowych. To doświadczenie zaowocowało na odcinkach zachodnim i wschodnim. Maksymalne pomierzone



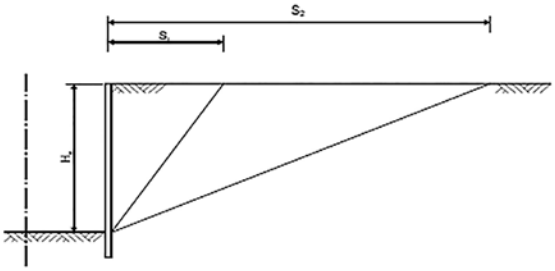
Ryc. 20. Pomierzona niecka osiadania nad dwoma tunelami drążonymi tarczą EPB w iłach plioceńskich [17]

osiadania wyniosły 15 mm w przypadku drążenia tuneli na Pradze w iłach plioceńskich (ryc. 20).

Odrębnym problemem zarówno dla projektantów, jak i wykonawców była ocena wpływu wykonania głębokiego wykopu stacji metra na przyległą zabudowę, powierzchnię terenu i obiekty podziemnej infrastruktury technicznej. Problem ten nie był zupełnie nowy, gdyż podczas budowy I linii metra prowadzono obszerne obserwacje budynków znajdujących się w strefie wpływu wykopów. Efektem tych prac było opracowanie przez Instytut Techniki Budowlanej Instrukcji 376/2002 *Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów* [18], w której sformułowano wytyczne odnośnie do m.in. określania zasięgu stref oddziaływania głębokiego wykopu w zależności od warunków geotechnicznych. Na rycinie 21 przedstawiono schemat głębokiego wykopu (rozpartego), sąsiadującej zabudowy oraz strefy oddziaływania, a na rycinie 22 sposób określania zasięgu tych stref w przypadku wykonywania wykopu w piaskach, glinach i iłach.



Ryc. 21. Parametry głębokiego wykopu i strefy jego oddziaływania: H_w i B_w – wymiary wykopu, S – zasięg strefy oddziaływania wykopu, S_I – zasięg strefy bezpośredniego oddziaływania wykopu, S_{II} – zasięg wpływów wtórnych, d – odległość budynku od obudowy, h_f – głębokość posadowienia budynku [19]



Tab.2. Zasięg strefy oddziaływań wykopu

Rodzaj gruntów	S_1	S_2
Wykop w piaskach	0,5 H_w	2,0 H_w
Wykop w glinach	0,75 H_w	2,5 H_w
Wykop w iłach	1,0 H_w	3÷4 H_w

Rys. 5. Zasięg stref oddziaływania wykopu S_1 i S_2 [3].

Ryc. 22. Zasięg stref oddziaływania wykopu w zależności od warunków gruntowych [18]

Jak widać, w przypadku najgłębszych stacji odcinka centralnego II linii metra zasięg stref oddziaływania wykopów stacyjnych wynosił nawet ponad 100 m. Na pozostałych stacjach było to od 15 m do 40 m. Inaczej definiują strefy oddziaływania tuneli i stacji wytyczne ITA (International Tunnelling and Underground Space Association) [12]. W przypadku tuneli jest to 100 m niezależnie od rodzaju podłoża, w przypadku stacji – 50 m (strefa bezpośrednich wpływów) i 100 m – strefa oddziaływania. Na podstawie obserwacji z centralnego odcinka II linii metra powstała kolejna wersja wytycznych ITB [19] oraz dokument uwzględniający wzajemne położenie tuneli metra i nowo

wznoszonych obiektów [20]. Według tych dokumentów oraz ustawy Prawo budowlane [21] i rozporządzenia [22] wszystkie obiekty znajdujące się w strefie oddziaływania wykopów stacji metra powinny być zinwentaryzowane, określony ich stan techniczny i kategoria budynku oraz zdefiniowane możliwe zagrożenia. Dlatego na trasie II linii metra przeprowadzono szczegółową ocenę stanu technicznego kilku tysięcy budynków i monitoring geodezyjny (tachimetry zautomatyzowane, repery, minipryzmaty) został zaprojektowany adekwatnie do istniejącego ryzyka. Dodatkowo monitorowano sieci podziemne – gazowe, wodociągowe, ciepłownicze i kanalizacyjne.

Oprócz monitoringu geodezyjnego prowadzono monitorowanie poziomów wód podziemnych – monitoring piezometryczny. Miał on na celu ocenę skuteczności prowadzonego odwodnienia podłoża oraz analizę sytuacji po wyłączeniu kolejnych pomp głębinowych (po zakończeniu robót). Jednym z elementów obserwacji piezometrycznych była informacja, jak wykonanie liniowego obiektu podziemnego wpłynie na ustabilizowane zwierciadło wód gruntowych, a konkretnie, czy nie nastąpi spiętrzenie wód podziemnych na skutek wykonania przegrody w postaci tuneli i stacji. Był to jeden z celów opinii środowiskowej, która została opracowana dla zachodniego odcinka II linii metra – od stacji Lazurowa do stacji postojowej Karolino. Teren ten od kilku lat jest obszarem intensywnych inwestycji deweloperskich. Wzdłuż przyszłej linii metra powstały wielokondygnacyjne budynki z podziemnymi garażami. Należało sprawdzić, czy nie nastąpi podpiętrzenie poziomu wód gruntowych w tym rejonie, co mogłoby doprowadzić do zalania podziemnych kondygnacji istniejących budynków.

4. Podsumowanie

Budowa II linii metra w Warszawie to największa inwestycja tunelowa w Polsce. Koszt budowy odcinka centralnego wyniósł prawie 1,2 mld €. Koszt obecnie realizowanego przedłużenia wschodniego i zachodniego to w sumie ponad 1 mld €. Ostatni etap – 370 mln €. Tak dużych środków finansowych zaangażowanych w budownictwo podziemne jeszcze w kraju nie było. Duży w tym udział funduszy unijnych, ale wkład władz samorządowych Warszawy też jest niemały.

Obecnie opracowywane jest studium wykonalności III linii – południowo-wschodniej z Dworca Wschodniego na Gocław. Doświadczenia z budowy II linii, w tym m.in. dane o wpływie tunelowania tarczą EPB na powierzchnię terenu i budynki, będą bardzo cenne przy projektowaniu kolejnych tuneli. Zakłada się, że będą one drążone tym samym typem maszyny i geometria przekrojów poprzecznych będzie taka, jak na II linii. Równie ważne są informacje o postępie drążenia, zachowaniu stateczności przodka i o innych parametrach technicznych TBM EPB. Budowa II linii spowodowała konieczność prowadzenia obszernego rozpoznania geologiczno-inżynierskiego do znacznie większych głębokości (ponad 50 m), niż to miało miejsce na budowie I linii. Bez wątpienia budowa metra była motorem rozwoju wielu dyscyplin związanych z budownictwem, nie tylko podziemnym.

Literatura

[1] www.metro.waw.pl

[2] Wielobranżowy projekt koncepcyjny dla zaprojektowania i budowy odcinka centralnego II linii metra w Warszawie. Biuro Projektów Metroprojekt i AMC Andrzej M. Chołdzyński, wrzesień 2008.

[3] Siemińska-Lewandowska A., Kuszyk R.: *Wpływ drążenia tuneli tarczą zmechanizowaną TBM na osiadania powierzchni terenu oraz budynki.* Materiały konferencji Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 5–8 marca 2013.

[4] Siemińska-Lewandowska A., Grodecki W.: *Rozpoznanie geotechniczne a budowa tuneli za pomocą tarcz zmechanizowanych.* Materiały konferencji Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 7–10 marca 2017.

[5] Guglielmetti V. et al.: *Mechanized Tunnelling in Urban Areas. Design Methodology and Construction Control*. Taylor & Francis/Balkema 2008.

[6] www.herrenknecht.de

[7] Archiwum własne autorów.

[8] Mair R.J.: *Tunneling in urban areas and effects on infrastructure. Advances in research and practice*. Muir Wood Lecture 2011. ITA-AITES materials, July 2011.

[9] Mair R.J., Taylor R.N., Bracegirdle A.: *Subsurface settlement profiles above tunnels in clays*. „Geotechnique" 1993, Vol. 43, No. 2, pp. 315–320.

[10] Kuszyk R.: Metodyka oceny rozwoju niecki osiadań podczas budowy tuneli za pomocą tarcz zmechanizowanych, praca doktorska. Politechnika Warszawska, 2018.

[11] Leca E.: *NEW B. ITA/AITES Report on settlements induced by tunneling in soft ground*. „Tunneling and Underground Space Technology" 2007, Vol. 22, pp. 119–149.

[12] AFTES. Recommendations. Settlements induced by tunnelling. GT16R1A1, 1995.

[13] Bogusz W.: Prediction of tunneling-induced ground movements (Prognoza przemieszczeń podłoża gruntowego spowodowanych realizacją tuneli), praca doktorska. ITB. Warszawa 2021.

[14] Bogusz W., Godlewski T., Siemińska-Lewandowska A.: *Parameters used for prediction of settlement trough due to TBM tunnelling*. „Archives of Civil Engineering" 2021, Vol. 67, No. 4, pp. 351–367.

[15] Dokumentacja geotechniczna dla II linii metra od stacji „Rondo Daszyńskiego" do stacji „Dworzec Wileński" w Warszawie. GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne. Warszawa, lipiec 2010.

[16] Kuszyk R., Siemińska-Lewandowska A.: *Subsidence trough asymmetry calculations in twin tube TBM tunnelling*. „Archives of Civil Engineering" 2021, Vol. 67, No. 2, pp. 675–689.

[17] Prace badawcze Zakładu Geotechniki, Mostów i Budowli Podziemnych. Politechnika Warszawska. Warszawa 2021.

[18] Instrukcja ITB nr 376/2002 *Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów.*

[19] Instrukcja ITB 376/2020 *Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów.* Autorzy W. Kotlicki, L. Wysokiński. Warszawa 2020.

[20] Wymagania techniczne dla inwestycji projektowanych i realizowanych, mogących oddziaływać na obiekty metra. ITB, Biuro Projektów Metroprojekt Sp. z o.o. na zamówienie Metra Warszawskiego Sp. z o.o. Warszawa 2014.

[21] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane. Dz.U. 1994, nr 89, poz. 414, z późn. zm.

[22] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 2002, nr 275, poz. 690 z późn. zm.

Referat wygłoszony podczas Wrocławskich Dni Mostowych *Wyzwania współczesnego mostownictwa*, Wrocław, 24–25 listopada 2022 r.

Czytaj więcej