

# Miejskie inwestycje tunelowe w Polsce

## 1. Wstęp

Rozwój budownictwa tunelowego w Polsce na przestrzeni ostatnich 10 lat znacznie przyspieszył. Inwestycje infrastrukturalne – budowa metra w Warszawie, tunele kolejowych i drogowych sprawiły, że stosowanie nowoczesnych metod budowy tuneli takich jak metoda tarczowa czy konwencjonalna (NATM) jest codzienną praktyką inżynierską. Stacje metra, podziemna budynków, komory startowe maszyn TBM lub inne obiekty podziemne realizuje się w głębokich wykopach, zabezpieczanych ścianami szczelinowymi sięgającymi głębokości nawet 50 m. Konieczność ograniczenia napływu wody gruntowej i wymagania co do szczelności przepon przeciwfiltracyjnych spowodowały, że iniekcja strumieniowa (jet-grouting), mrożenie czy też tzw. biała wanna są technologiami znanymi i używanymi powszechnie. Budowa II linii metra w Warszawie przyniosła istotne zmiany w wielu obszarach przygotowania i realizacji dużych inwestycji infrastrukturalnych. Była impulsem do stosowania nowych technologii na dalszych, obecnie budowanych odcinkach, a także do podjęcia realizacji dużych tuneli kolejowych (Łódź) i drogowych w Gdańsku i Świnoujściu. Metro a także tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku wpłynęły na aktywizację urbanistyczną i biznesową miasta oraz na zmiany na rynku nieruchomości. Najlepszym przykładem jest warszawska Wola, gdzie po wybudowaniu II linii metra i stacji Rondo Daszyńskiego wokół powstało zupełnie nowe centrum biurowców. Należy się spodziewać podobnych zmian po dokończeniu II linii, budowie tuneli kolejowych w Łodzi, drogowego na trasie S2 w Warszawie i w Świnoujściu.

## 2. Metro

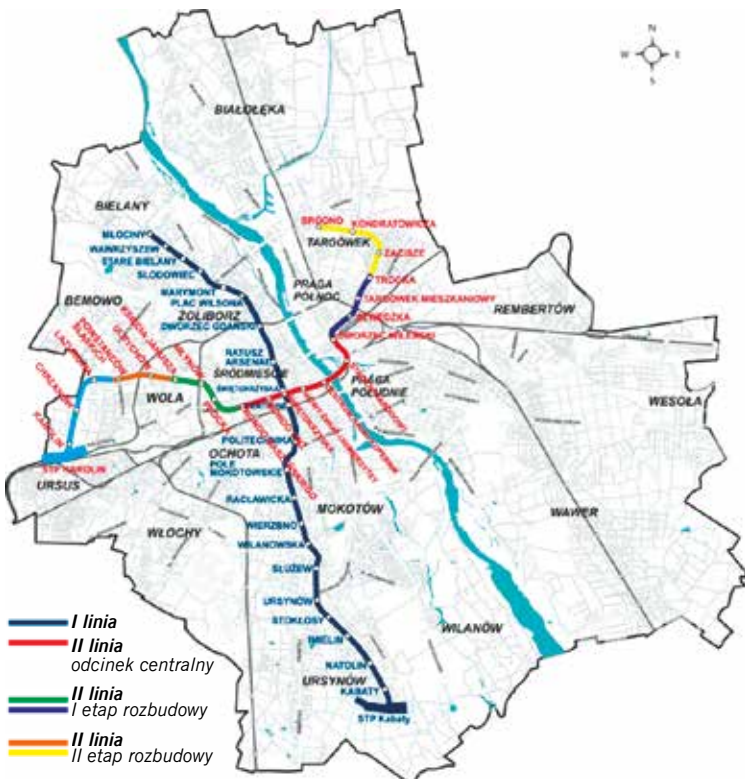
Pierwszą krajową dużą podziemną inwestycją komunikacyjną jest metro w Warszawie. Pierwsza koncepcja powstała w 1928 roku, natomiast roboty podziemne rozpoczęto w latach 50. i od tych lat można mówić o rozwoju budownictwa podziemnego w Polsce

[1]. W latach 1951-1958 budowano w Warszawie pierwszą linię metra na kierunku wschód – zachód. Oprócz znaczenia komunikacyjnego, tj. dla przewoźów pasażerskich, tunele metra miały też spełniać rolę strategiczną jako między innymi 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 płoceńskie, podobnie jak ity londyńskie, są korzystne dla drążenia głębokich tuneli metra. Wyniki prowadzonych badań nie potwierdziły tej oceny. Wydrążono 17 szybów o średnicach 6,00 m i 5,10 m, z których większość miała ponad 40 m głębokości, a najgłębszy osiągnął 66,10 m poniżej poziomu terenu. Niestety, liczne awarie na budowie szybów, względy ekonomiczne i polityczne spowodowały, że realizację metra głębokiego porzucono. Późniejsze o ponad 60 lat wydarzenia (2012 r.) na budowie stacji Centrum Nauki Kopernik potwierdziły, że ity miopłoceńskie na obszarze Warszawy są bardzo trudnym do tunelowania podłożem.

Dopiero na przełomie lat 70. i 80. rozpoczęto prace nad projektowaniem i budową I linii metra przebiegającej wzdłuż Wisły na kierunku południe – północ (rys. 1). Stacje budowano metodami odkrywkowymi, tunele szlakowe na odcinku śródmiejskim drążono tradycyjną tarczą niezmechanizowaną. W dzielnicach peryferyjnych, jakimi był wtedy Ursynów, Kabaty i Młociny, tunele szlakowe również budowano w głębokich wykopach. Jako obudowę wykopu stosowano ścianę berlińską kotwioną lub rozpiętą oraz ścianę szczelinową, która wtedy była jedynie obudową tymczasową wykopu, a nie jak obecnie, elementem konstrukcyjnym tunelu. Konstrukcja tunelu była konstrukcją monolityczną, wylewaną na mokro z izolacją przeciwwodną na zewnątrz obudowy. Dopiero na odcinku północnym metra zaczęto projektować i wykonywać ściany szczelinowe jako konstrukcje docelowe (stacja metra Ratusz).

Budowę odcinka centralnego rozpoczęto w 2011, a oddano do eksploatacji w roku 2015. Założenie o budowie stacji metodą odkrywkową utrzymano także na odcinku centralnym II linii i na obecnie realizowanych przedłużeniach w kierunku wschodnim i zachodnim. Rozwiązanie to wymaga takiego harmonogramu robót, aby stacje były gotowe chociaż w stanie surowym. Maszyna TBM po wydrążeniu tunelu szlakowego przebija się przez ścianę szczelinową na tym fragmencie zbrojoną prętami z włókna szklanego (rys.2) i jest przeprowadza-

Rys. 1. Układ I i II linii metra w Warszawie (www.metrowaw.pl)



Rys. 2. Głowica skrawająca maszyny TBM po przewierceniu się przez ścianę szczelinową stacji (fot. autor)



na przez stację na specjalnie przygotowanej konstrukcji, po czym ponownie startuje do drążenia kolejnego tunelu (rys.3). Podczas tej operacji odbywa się przegląd techniczny maszyny, wymiana noży i dysków skrawających, ewentualne naprawy i regeneracje urządzeń hydraulicznych. Gorzej, gdy szybkość drążenia wyprzedza budowę stacji. Tak zdarzyło się podczas budowy centralnego odcinka między stacją Rondo Daszyńskiego a stacją Rondo ONZ, na której wykonane były jedynie ściany szczelinowe. Tarcza drążyła tunel północny z prędkością około 40 m na dobę gotowego tunelu. Wówczas po analizie numerycznej z wykorzystaniem MES (rys.4) oceny oddziaływania sił wywieranych przez głowicę skrawającą i powłokę tarczy na istniejące w gruncie ściany szczelinowe, zdecydowano o przejściu tarczy przez podłoże w obszarze niewykonanej stacji. Następnie stację wykonano metodą stropową, rozbierając fragmenty wykonanego tunelu.

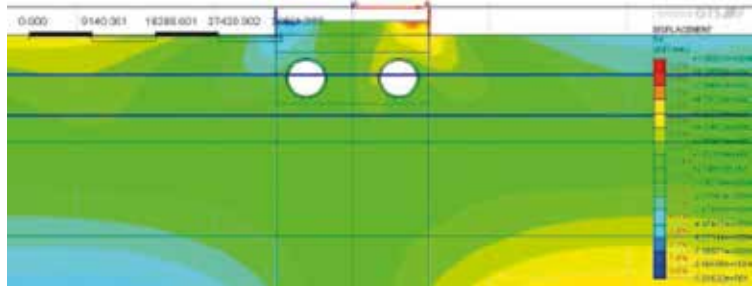
Jak wspomniano powyżej, wszystkie stacje na odcinku centralnym II linii metra oraz na obecnie budowanych odcinkach w kierunku wschodnim (3 stacje) i zachodnim (3 stacje) są wykonywane metodą stropową, inaczej w literaturze nazywaną metodą mediolańską. W pierwszej fazie wykonuje się ściany szczelinowe o grubości od 0,80 m do 1,40 m i głębokości wynikającej z projektu i zagłębienia stacji. Następnie po wykonaniu 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. Na rys. 5 pokazano przekrój poprzeczny jednej z dwóch najgłębszych stacji – „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 poniżej poziomu terenu. W obydwu przypadkach, ze względu na duże wartości momentów zginających, w ścianach szczelinowych zaprojektowano trzy stropy pośrednie. Z uwagi na konieczność przejścia przez stację maszyny TBM rozpiętość przęsła ściany szczelinowej wynosi 8,6 m. Stacja „Centrum Nauki Kopernik” – jej korpus zachodni był szybem odbiorczym dwóch tarcz drążących tunele szlakowe na zachodnim odcinku II linii. W korpusie wschodnim stacji – bliżej Wisły, odebrano tarcze drążące odcinek praski oraz szlakowe tunele pod Wisłą. Widok wyjętej maszyny pokazano na rys. 6.

Rys. 6. Widok tarczy zmechanizowanej, która wydrążyła odcinek praski II linii oraz tunele metra pod Wisłą (fot. autor)



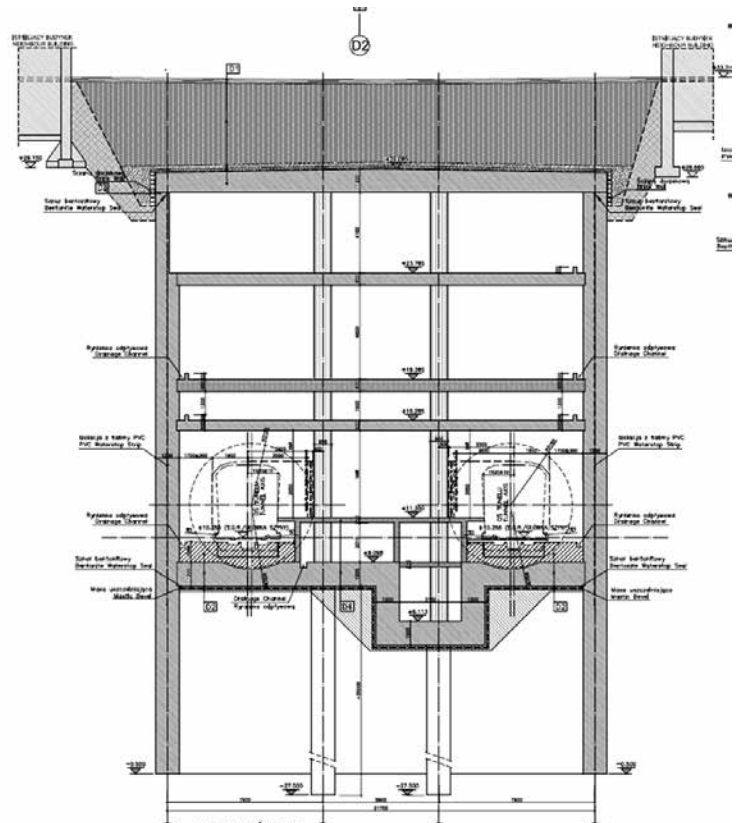
Dlatego między innymi terminowe wykonanie stacji „Centrum Nauki Kopernik”, roboczo nazywanej wówczas „Powiśle”, której fragment znajduje się pod tunelem Wistostrady, był kluczowym elementem harmonogramu prac. Awaria, która wydarzyła

Rys. 3. Przejście maszyny TBM przez stację (fot. autor)



Rys. 4. Model obliczeniowy – symulacja przejścia obydwu maszyn TBM przez stację Rondo ONZ [4]

Rys. 5. Przekrój poprzeczny stacji metra „Nowy Świat Uniwersytet” [3], [4]





Rys. 7. Tunel łącznikowy na stacji „Centrum Nauki Kopernik” – drążenie w zamrożonym gruncie (fot. autor)

się w sierpniu 2012 r., zatrzymała prace na rok. Potwierdziły się prognozy z lat 50. dotyczące tunelowania w iłach pliczeńskich. Po wielokrotnych próbach opanowania sytuacji za pomocą iniekcji nisko- i wysokociśnieniowej zastosowano mrożenie gruntu ciekłym azotem i solanką (rys.7). Doświadczenia z tej budowy wykorzystali później wykonawcy tunelu pod Martwą Wisłą do przebiccia w zamrożonym gruncie przejść awaryjnych między dwoma tunelami drogowymi.

Tunele szlakowe na odcinku centralnym i na obydwu budowanych obecnie przedłużeniach są drążone tarczą zmechanizowaną TBM typu EPB, tzn. wyrównywanych ciśnień gruntowych. Szczegółowy opis konstrukcji tej maszyny oraz zasada działania zostały szczegółowo omówione w wielu publikacjach, między innymi w pozycjach [1] i [6]. Pierwsze tunele szlakowe centralnego odcinka II linii metra w Warszawie były poligonem doświadczalnym dla specjalistów prowadzących tarczę. Uzyskano informacje o postępie dobowym prac, kierowaniu tarczą, doborze ciśnienia na przodku, prędkości ewakuacji urobku z komory roboczej i utrzymaniu stateczności przodka. Równie ważne były obserwacje niekiedy osiadania na powierzchni terenu i ocena oddziaływania robót tunelowych na sąsiednie obiekty, środowisko i wody gruntowe. Na budowie centralnego odcinka po raz pierwszy użyto w Polsce na tak dużą skalę nowoczesnych

Rys. 8. Tarcza „Maria” w momencie opuszczania na dno szybu startowego – stacji „Rondo Daszyńskiego” (fot. autor)



tarcz zmechanizowanych (w sumie 4 maszyny), chociaż nie były to pierwsze TBM w Polsce. Pierwszą tarczą zmechanizowaną w kraju była maszyna drążąca tunel pod Wisłą prowadzący ścieki z lewobrzeżnej Warszawy do oczyszczalni „Czajka”. Tarcza zawieszinowa miała średnicę 5,35 m, tunel techniczny (tzw. syfon) o średnicy 4,5 m prowadzi dwa rurociągi o średnicy 1,6 m. Całkowita długość tunelu pod Wisłą wynosi 1350 m. Budowę ukończono w 2010 r. Inwestycji tej towarzyszyła przebudowa sieci kanalizacyjnej zarówno w lewobrzeżnej jak i prawobrzeżnej Warszawie.

Tarcze warszawskiego metra były sprowadzane do Polski w wielu elementach, głównie ze względu na ich ciężar (największy z nich to ciężar głowicy skrawającej). Po montażu na placu budowy specjalnie sprowadzonym dźwigiem tarcze były opuszczane do wykopu stacji, która była jednocześnie szybem startowym. Na rys. 8 pokazano moment opuszczania tarczy o wadze około 400 ton na dno stacji „Rondo Daszyńskiego”. Po zmontowaniu za nią tzw. pociągu o długości około 80 m, zawierającego wszystkie niezbędne urządzenia do wykonania obudowy tunelu, iniekcji uszczelniającej za obudową, transportu segmentów obudowy na przodek i zestawu do ewakuacji urobku taśmociągami TBM, jest gotowy do drążenia.

Doświadczenie zdobyte na odcinku centralnym procentuje obecnie na budowie wschodniego przedłużenia o długości 3,1 km (stacje Szwedzka, Targówek, Trocka) i zachodniego – 3,4 km (stacje Płocka, Młynów, Księcia Janusza). Na obydwu odcinkach wydrążono wszystkie tunele szlakowe, korzystając z tych samych maszyn, które wykonały odcinek centralny. Po stronie wschodniej gotowe są wszystkie stacje i niebawem zostaną oddane do eksploatacji. Za stacją „Trocka” wykonano tory odstawcze o długości prawie 200 m, co bardzo usprawni użytkowanie II linii i zasilanie jej w składki pociągów. Rozstrzygnięto przetargi na dalsze dwa etapy – wschodni o długości 3,9 km od stacji Zacisze, Kondratowicza na Bródno oraz zachodni o długości 2,1 km, obejmujący dwie stacje: Wola Park i Powstańców Śląskich. Przyznano również środki na realizację ostatniego etapu o długości 3,9 km do stacji postojowej Karolino i trzy stacje – Lazurowa, Chrzanów, Potczyńska.

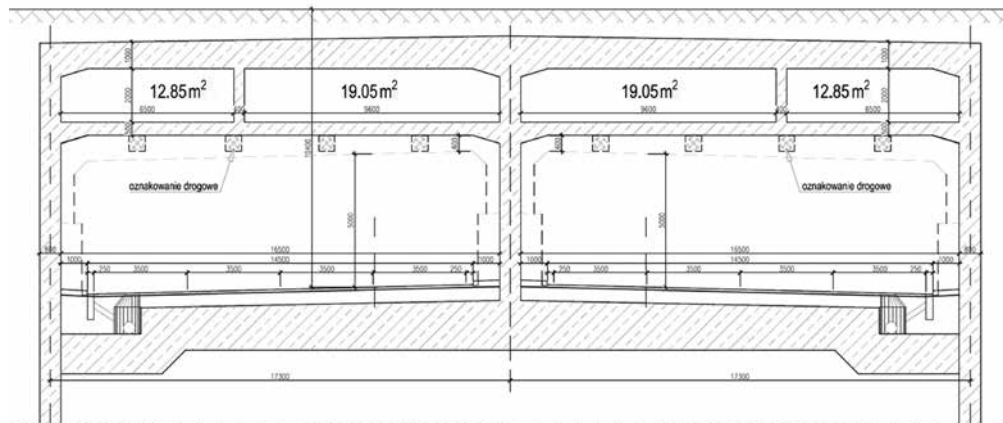
Budowa II linii metra w Warszawie to największa inwestycja tunelowa w Polsce. Koszt budowy odcinka centralnego wyniósł prawie 1,2 mld euro. Koszt obecnie realizowanego przedłużenia wschodniego i zachodniego to w sumie około 500 mln euro. Koszt dalszych etapów – 490 mln euro. Ostatni etap – 370 mln euro. 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 Goctław (rys. 1).

### 3. Inwestycje w tunele kolejowe w miastach

Ostatnia dekada to prawdziwy boom w budowie tuneli kolejowych. W 2012 r. oddano do eksploatacji tunel kolejowy do terminalu na Lotnisku Chopina w Warszawie i tunel dojazdowy do największego



Rys. 11. Przekrój poprzeczny tunelu POW [8]



8,5 m i dwóch tuneli jednotorowych. Doświadczenia z wielu budów na świecie dowodzą, że niecka osiadania nad tunelami dwutorowymi jest głębsza aniżeli w przypadku dwóch tuneli o mniejszej średnicy. Złożone warunki geologiczne, obecność wody gruntowej i układ geotechniczny podłoża są dodatkową komplikacją. Kluczowymi elementami są lokalizacja i głębokość sztywów startowych i odbiorczych każdej z maszyn TBM.

#### 4. Miejskie tunele drogowe

Lata ostatnie to realizacjach dwóch dużych tuneli drogowych – pod Martwą Wisłą w Gdańsku i na etapie projektu pod Świną w Świnoujściu. Obecnie trwa budowa dwóch dużych tuneli miejskich – Trasy Łągiewnickiej w Krakowie i najdłuższego miejskiego tunelu drogowego – na Ursynowie, w ciągu Południowej Obwodnicy Warszawy. Tunel będzie miał długość prawie 2,7 km i prowadzi 2 x po trzy pasy ruchu w każdą stronę. Ze względu na przewidywane natężenia ruchu (droga ekspresowa S2) i warunki pożarowe konieczne jest zapewnienie odpowiedniej wentylacji (poprzecznej lub półpoprzecznej). Dlatego powierzchnia przekroju poprzecznego tunelu (rys. 11) jest dodatkowo zwiększona o powierzchnię kanałów wentylacyjnych. Technologicznie budowa tego tunelu nie jest trudna – budowany jest metodą stropową z zastosowaniem ścian szczelinowych o różnej grubości. Najtrudniejszym etapem, od którego rozpoczęto prace, jest przejście pod tunelem I linii metra w rejonie skrzyżowania ulic Płaskowickiej i Komisji Edukacji Narodowej. Tunel drogowy POW na odcinku przejścia pod I linią metra ma konstrukcję żelbetową, monolityczną, trójnawową o szerokości 41,2 m (nawy boczne po 17,0 m i nawa środkowa 4,0 m) i wysokości 10,5 m. Grubość płyty stropowej wynosi 1,0 m, a płyty dennej 1,4 m, płyta pośrednia w nawie środkowej ma grubość równą 0,3 m. Ściany zewnętrzne tunelu o grubości 1,0 m i wysokości około 20 m są wykonane w technologii ścian szczelinowych.

Współpracującą z wykonawcą firma zaproponowała całkowite odsłonięcie tunelu metra w otwartym wykopie zabezpieczonym ścianą berlińską, a następnie ujęcie tunelu metra w żelbetowe belki spoczywające na ścianach szczelinowych i baretach. Po takim wzmocnieniu prowadzenie dalszych robót pod czynną linią metra.

Oprócz przejścia pod I linią metra równie ważna jest ocena oddziaływania prac odwodnieniowych na osiadania budynków mieszkalnych znajdują-

cych się w strefie wpływu robót tunelowych. Opracowano model numeryczny całego obszaru i oceniono, że pionowe przemieszczenia przyległego terenu nie przekroczą 5 mm. Od początku trwania budowy prowadzony jest szeroki monitoring przemieszczeń powierzchni terenu, budynków i przede wszystkim tunelu i torowiska I linii metra.

#### 5. Podsumowanie

Wg danych światowych tunele to około 7% rynku budownictwa infrastrukturalnego. W Europie tunele metra stanowią 35% ogólnej wartości kontraktów tunelowych, tunele kolejowe 29%, a tunele drogowe 30%. W kraju tunele nadal postrzegane są jako bardzo drogie inwestycje, budowane zawsze powyżej kosztów przetargowych, trudne do utrzymania i zarządzania. Opisane powyżej przykłady dowodzą, że to podejście zaczyna się zmieniać.

**prof. Anna Siemińska-Lewandowska**  
**Politechnika Warszawska**

#### Bibliografia

- 1 Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A. O rozwoju budownictwa podziemnego w XX i XIX wieku, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7/8 2018, str.383-389
- 2 *Opinia techniczna dotycząca wykonania konstrukcji stacji C10 II linii metra w Warszawie, opracowanie Instytutu Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska, styczeń 2013 r.*
- 3 *Wielobranżowy Projekt Konceptyjny dla zaprojektowania i budowy odcinka centralnego II linii metra w Warszawie, Autorzy: B.P. METROPROJEKT I AMC - ANDRZEJ M. CHOŁDZYŃSKI, wrzesień 2008*
- 4 *Projekt budowlany AGP (08/2010), E-ILF-B-C13-CST-SPC-0002\_R03\_PL Projekt budowlany, Konstrukcja, Tom III,*
- 5 Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A., Lejk J. *II linia metra w Warszawie – perspektywy i metody jej realizacji, Inżynieria i Budownictwo nr 7-8/2007, str. 365 – 368*
- 6 Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A. *Rozpoznanie geotechniczne a budowa tuneli za pomocą tarcz zmechanizowanych. Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, marzec 2017 r.*
- 7 *Analiza porównawcza i ocena techniczna dwóch koncepcji budowy tunelu kolejowego w Łodzi, opracowanie Instytutu Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska marzec 2018*
- 8 *Remont tunelu szlakowego B3 I linii metra na odcinku segmentów wzmocnionych, MDR-projekt sp. z o.o.ul. Modlińska 129, z kwietnia 2016 r.*