

O rozwoju budownictwa podziemnego w XX i XXI wieku

W Polsce obserwuje się rozwój budownictwa podziemnego. Dotyczy on budowy tuneli komunikacyjnych oraz głębokich podziemi budynków lub niezależnych obiektów podziemnych, takich jak garaże, zbiorniki, komory elektryczne. Tunele komunikacyjne wykonuje się metodami odkrywkowymi, drąży tarczą lub stosując metodę konwencjonalną (NATM). Stacje metra, podziemia budynków lub inne obiekty realizuje się w głębokich wykopach.

Budowa I i 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 realizowanych odcinkach, a także do podjęcia budowy dużych tuneli drogowych w Gdańsku i Świnoujściu.

Pierwszą ważną podziemną inwestycją komunikacyjną było metro w Warszawie, którego koncepcja powstała w 1928 r., natomiast roboty podziemne rozpoczęto w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku i od tych lat można mówić o rozwoju budownictwa podziemnego w Polsce.

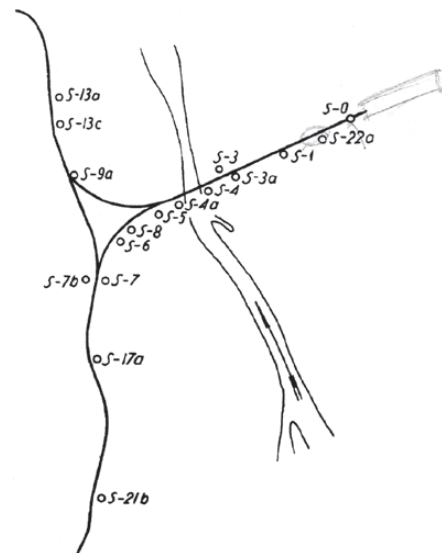
Od lat pięćdziesiątych XX wieku do współczesności

W latach 1951–1958 budowano w Warszawie pierwszą linię metra na kierunku wschód-zachód. Oprócz znaczenia komunikacyjnego tunele metra miały też spełniać rolę strategiczną jako m.in. schrony. Z tego też względu przyjęto założenie budowy metra głębokiego. Interpretacja badań geologicznych wykonanych na potrzeby metra w latach czterdziestych i na początku lat pięćdziesiątych wskazywała na daleko idącą ostrożność w uznawaniu, że trzeciorzędowe utwory plioceńskie stwarzają korzystne warunki do drążenia tuneli. Pliocen budują ility i ility pylaste, grunty pylaste i pylasto-piaszczyste, a także drobne piaski. Przekładki pylasto-piaszczyste i drobne piaski były silnie nawodnione, a ciśnienie hydrostatyczne zawartej w nich wody odpowiadało swobodnemu poziomowi zwierciadła wody gruntowej.

Ze względu na założenie budowy tuneli metra głębokiego (głębiej niż 30 m poniżej poziomu terenu) dążono do uzyskania możliwie szybko praktycznych doświadczeń geotechnicznych w gruntach na takich głębokościach. Chociaż wyniki wierceń badawczych dawały pewien obraz geologiczny gruntów, to dopiero zetknięcie się z nimi podczas robót podziemnych mogło wskazać, jakie metody trzeba będzie stosować w robotach i jakich trudności należy oczekiwać.

Odpowiedzi na te pytania uzyskano podczas drążenia 17 szybów średnicy 6,00 i 5,10 m, z których większość miała głębokość ponad 40 m, a najgłębszy miał 66,10 m poniżej poziomu terenu (rys. 1). Budowa szybów stała się dobrym poligonem doświadczalnym. Stosowano tu bowiem prawie wszystkie metody budowy, takie jak studnie opuszczane, górnicze, metodę kesonową (praca pod sprężonym powietrzem) mającą na celu niedopuszczenie

do dopływu wody gruntowej wraz z gruntem do wnętrza szybu, a także – wykorzystywaną w przypadku różnych awarii – metodę sztucznego zamrażania gruntu oraz metodę elektropetryfikacji. Metoda kesonowa szerzej stosowana w Polsce w budowie podpór mostowych, najczęściej filarów usytuowanych w korycie rzek, z dużym powodzeniem znalazła zastosowanie nie tylko w przypadku budowy szybów, lecz również w budowie sztolni i tuneli metra.



Rys. 1. Rozmieszczenie szybów wzdłuż linii I etapu budowy metra według projektu z lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku [9]

Największe ciśnienie sprężonego powietrza, jakie musiało przyjąć w celu opanowania stanów awaryjnych, osiągnęło aż 0,35 MPa, co oczywiście bardzo ograniczyło efektywny czas pracy robotników w warunkach kesonowych. W przypadku 6 szybów uszczelnienie i wzmocnienie gruntu na zewnątrz ich obudowy osiągnięto, stosując jego sztuczne zamrożenie. Użyto dwóch różnych instalacji wytwarzających „zimno”, wykorzystując amoniak NH_3 bądź dwutlenek węgla CO_2 . Na skutek gwałtownego rozprężania np. amoniaku uzyskuje się w węzownicy parownika temperaturę od około -20°C do około -25°C . Parownik jest wypełniony cieczą okalającą węzownicę, tzw. solanką (np. chlorek wapnia i chlorek magnezu), która osiąga podobną temperaturę. Ciecz ta jest doprowadzana do tzw. rur mroźnych, umieszczonych w otworach wiertniczych w gruncie wokół szybu i, odbierając od niego ciepło, powoduje zamrażanie tego gruntu. Solanka krąży w obiegu zamkniętym i po ogrzaniu się od gruntu powraca do aparatury wytwarzającej „zimno”. Metoda ta okazała się skuteczna w najtrudniejszych warunkach gruntowych i wodnych, natomiast próby jej zastosowania do wyrobisk poziomych nie dały oczekiwanych rezultatów. Na większą skalę sztuczne mrożenie gruntów zastosowano znacznie

później na budowie stacji Centrum Nauki Kopernik, zbudowanej na II linii metra w Warszawie podczas drążenia łącznika pod tunelem Wisłostrady. W tym przypadku grunt mrożono za pomocą otwartej instalacji na ciekły azot. Po szybkim zamrożeniu gruntu jego stan zamrożenia był podtrzymywany za pomocą solanki. Razem był to więc system mieszany. Rury mrożne były umieszczone zarówno w pionie, jak i pod niewielkim kątem do poziomu.

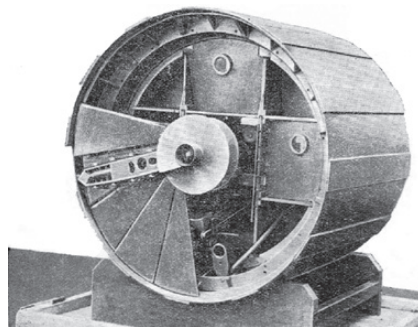
Liczne awarie, które zdarzały się na budowie szybów na trasie przyszłych tuneli metra w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku i wdzierająca się do szybów woda z gruntem stały się impulsem do poszukiwania i zastosowania również innych metod opanowywania tego zjawiska. Sądzono, że taką metodą będzie elektropetryfikacja. Polega ona na wprowadzeniu do gruntu – wykorzystując prąd elektryczny – takich roztworów chemicznych, które mają zdolność wytrącania się w postaci żelu uszczelniającego grunt i sklejającego jego ziarna. Czynnikiem wytwarzającym lepszycze jest zazwyczaj szkło wodne, a przyspieszającym jego koagulację – chlorek wapnia. W wyniku elektropetryfikacji następuje wzmocnienie i uszczelnienie gruntu. Wadą metody jest to, że nie następuje jednorodne wzmocnienie gruntu, ponieważ nie do wszystkich miejsc docierają roztwory. Obok partii zeskalonych występują partie niewzmocnione. Doświadczenia budowniczych szybów wykazały, że metoda elektropetryfikacji niestety nie była efektywna i nie pozwoliła na opanowanie wdzierającej się do szybów wody z gruntem pod znacznym ciśnieniem.

W podobnej sytuacji stosowano zastrzyki do gruntu za obudowę szybu. Tłoczono pod niewielkim ciśnieniem różne iniektory, takie jak zaprawa cementowa i mleczko cementowe (cementacja) oraz silikaty, tj. szkło wodne (silikatyzaacja). Nie osiągnano jednak stabilizacji gruntów pylastych i drobnych piasków. Abstrahując od tego konkretnego przykładu zastosowań iniekcji cementowych, należy zauważyć, że wraz z produkcją mikrocementów (o bardzo drobnym przemiale) na skutek lepszej zdolności penetrującej jest możliwe skuteczne iniektowanie gruntów o mniejszych rozmiarach ziaren niż w przypadku tradycyjnej zaprawy cementowej.

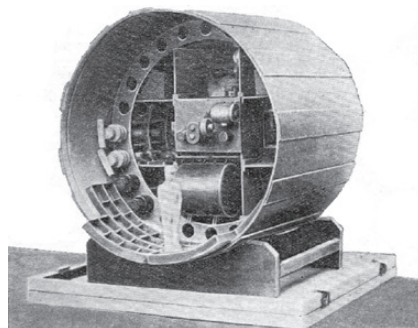
W budownictwie podziemnym szerokie zastosowanie znalazła iniekcja wysokociśnieniowa (iniekcja strumieniowa, jet-grouting). Polega ona na zniszczeniu naturalnej struktury gruntu za pomocą strumienia zaczynu cementowego podawanego pod wysokim ciśnieniem i mieszanie gruntu z tym zaczynem. W rezultacie powstaje nowy materiał, tzw. gruncocement. Charakteryzuje się on znaczną wytrzymałością i szczelnością. Technologia iniekcji strumieniowej umożliwia uzyskiwanie m.in. kolumn (pali) lub cienkich paneli. W pierwszym przypadku jest możliwe np. uszczelnienie dna głębokiego wykopu przez zachodzące na siebie kolumny, a także uzyskiwanie wyprzedzającego tzw. parasola ochronnego w stropie następującego wyrobiska podziemnego. Z kolei panele z gruncocementu mogą stanowić przegrodę w przypadku dopływu wody gruntowej do chronionego obszaru. Oba sposoby znalazły zastosowanie na budowie łącznika między dwiema częściami stacji metra Centrum Nauki Kopernik w Warszawie.

W budowie metra w latach pięćdziesiątych XX w. z racji przyjętego wariantu metra głębokiego założono, że zarówno tunele szlakowe, jak i stacje podziemne będą wykonywane pod osłoną tarcz. Miały to być tarcze niezmechanizowane, w których odspajanie gruntu jest wykonywane za pomocą małych urządzeń mechanicznych,

np. młotków pneumatycznych. W owym czasie nie były jeszcze znane tarcze zmechanizowane – TBM. Stosując wspomniane proste sposoby urabiania gruntu, należało się liczyć z niewielkim postępowaniem robót. Dlatego poszukiwano lepszych sposobów drążenia. Konstruktorzy Biura Projektów „Metroprojekt” opracowali oryginalny projekt tarczy zmechanizowanej (rys. 2 i 3), który uzyskał pozytywną ocenę rzeczoznawców, jednak do realizacji projektu nie doszło i nawet tunele I linii metra w Warszawie, budowanej kilkadziesiąt lat później, były drążone pod osłoną tradycyjnej tarczy niezmechanizowanej.

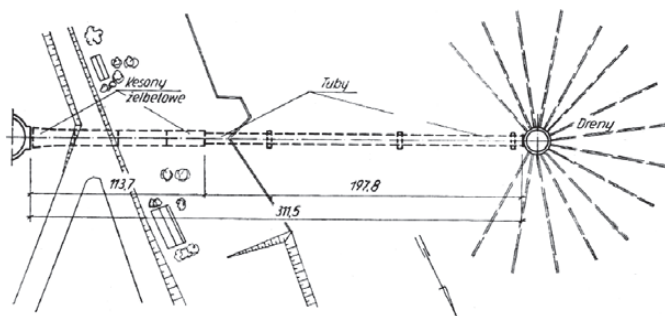


Rys. 2. Model tarczy zmechanizowanej z lat pięćdziesiątych. Widok od strony przodka robót [9]

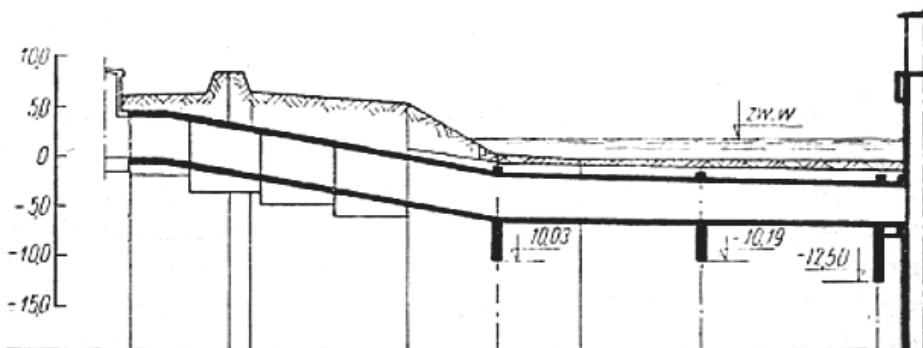


Rys. 3. Model tarczy zmechanizowanej z lat pięćdziesiątych. Widok od strony gotowego tunelu [9]

W latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku powstał projekt zaopatrzenia mieszkańców stolicy w wodę spod dna Wisły. W tym celu wybudowano na Saskiej Kępie, na prawym brzegu rzeki, Zakład Uzdatniania Wody, a w korycie Wisły – studnię, tzw. Grubą Kaškę. Studnia ta ma średnicę 11 m i została wykonana metodą kesonową. Z jej wnętrza zainstalowano promieniście drenaż. Zbierająca się w nich woda sływa do studni i jest następnie przepompowywana do Zakładu Uzdatniania przewodami (rys. 4 i 5) umieszczonymi w tunelu długości 311,5 m. Jego budowę rozpoczęto w 1960 r. Część brzegowa tunelu została wykonana w postaci 4 żelbetowych skrzyń (kesonów), opuszczonych przy zastosowaniu sprężonego powietrza. Część podwodną wykonano natomiast, po raz pierwszy zastosowaną w Polsce, metodą zatapiania segmentów prefabrykowanych,



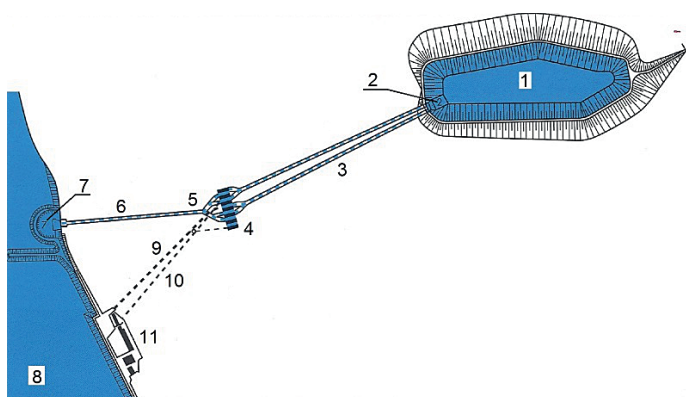
Rys. 4. Plan tunelu podwodnego do „Grubej Kaški” w Warszawie [13]



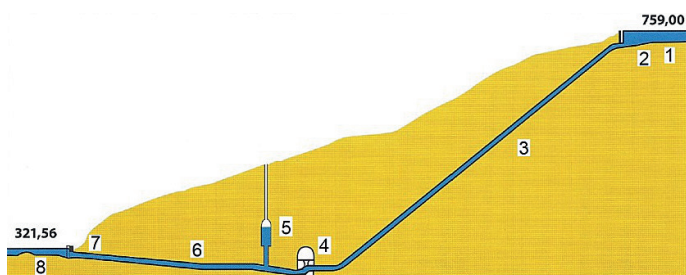
Rys. 5. Przekrój wzdłużny tunelu podwodnego do „Grubej Kałki” w Warszawie [13]

które stanowiły stalowe rury długości 40 m i średnicy 4,60 m, wykonane z blachy grubości 4 mm. Były one spławione Wisłą ze stoczni w Sandomierzu. Po wyciągnięciu rur na brzeg zabetonowano wewnętrzną powłokę grubości 30 cm, a następnie po spuszczeniu na wodę połączono rury w dwa odcinki, każdy długości 80 m. W miejscach połączeń tych odcinków wykonano metodą kesonową tymczasowe podpory i na nich oparto rury po ich dobalastowaniu. Wcześniej w dnie Wisły wykonano za pomocą pogłębiarki rów, na którego dnie ostatecznie osiadł zatopiony segmentowy tunel. Ostatnią czynnością było obsypanie go narzutem kamiennym, aby zapewnić stateczność tunelu w przypadku wysokiego stanu wody w Wiśle.

Do niewątpliwych sukcesów budownictwa podziemnego należy wybudowanie podziemnej elektrowni szczytowo-pompowej Porąbka-Żar. Prawie wszystkie jej obiekty zlokalizowano we wnętrzu góry Żar, z wyjątkiem górnego zbiornika (rys. 6 i 7). Górę buduje flisz karpacki, składający się z naprzemianległych warstw piaskowca i łupka



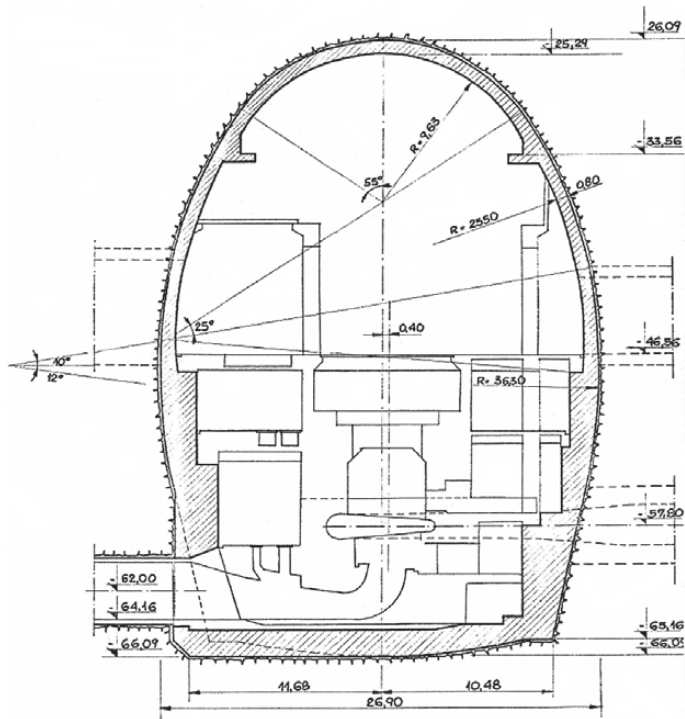
Rys. 6. Plan sytuacyjny obiektów układu technologicznego elektrowni Porąbka-Żar [11]: 1 – zbiornik górny, 2 – ujęcie wody ze zbiornika górnego, 3 – sztolnie upadowe, doprowadzające, 4 – budynek elektrowni, 5 – komora wyrównawcza, 6 – sztolnia odpływowa, 7 – niecka wypadowa, 8 – zbiornik dolny, 9 – sztolnia komunikacyjna, 10 – sztolnia kablowa, 11 – budynki administracyjno-techniczne



Rys. 7. Przekrój derywacji elektrowni Porąbka-Żar [11]: (objaśnienia 1–8 – jak na rys. 6)

różnych grubości, o różnych wzajemnych proporcjach i różnych właściwościach mechanicznych. Do największych tego rodzaju obiektów w Europie należy komora elektrowni, mieszcząca turbiny i generatory prądu; ma – w świetle stałej 80-centymetrowej żelbetowej obudowy wyrobiska – długość 123,86 m, wysokość 40,0 m i szerokość 27,0 m (rys. 8). Wyłomy wykonywano głównie metodami mechanicznymi, a także stosując materiały wybuchowe. Obudowę tymczasową wyrobisk stanowiły kotwy żelbetowe i sprężone kotwy kablowe oraz beton natryskowy.

Na budowie całego systemu elektrowni roboty górnicze trwały od 1970 do 1975 r., a 4 turbozespoły oddano do eksploatacji w 1979 r. Doświadczenia z budowy tej elektrowni we fliszu karpackim stanowią cenne źródło wiedzy o tej formacji geologicznej jako środowisku przyszłych obiektów podziemnych. Tę wiedzę, stale pogłębianą, wykorzystuje się przy projektowaniu i budowie na południu Polski tuneli komunikacyjnych, m.in. tunelu Laliki i w Nawprawie na trasie Kraków – Zakopane.



Rys. 8. Przekrój poprzeczny komory elektrowni Porąbka-Żar [11]

XXI wiek – głębokie stacje metra i podziemia budynków

Ostatnie dekady w Polsce charakteryzuje budowa dużych podziemnych obiektów kubaturowych, takich jak stacje metra, podziemia apartamentowców, budynków użyteczności publicznej czy garaży, co wiąże się z wykonywaniem i projektowaniem głębokich wykopów. Tego rodzaju inwestycje, jak metro, obiekty biurowe, hotelowe i handlowe są impulsem do innowacyjnych rozwiązań. Dotyczą one zarówno technologii wykonania obudowy głębokiego wykopu i części konstrukcyjnej podziemi, jak również działań związanych z ograniczeniem wpływu wody gruntowej bądź poprawą warunków geotechnicznych.

Przy wyborze rodzaju obudowy i technologii wykonania głębokiego wykopu są uwzględniane [10]: warunki geotechniczne i poziom wody gruntowej, głębokość wykopu i jego położenie w stosunku do istniejących obiektów, rodzaj zabudowy sąsiadującej z wykopem, metody budowy części podziemnej budynku lub tunelu powstającego w wykopie.

Obecnie w budowie obiektów w głębokich wykopach [8] wykorzystuje się ściany szczelinowe, ścianki berlińskie i z grodziec stalowych, iniekcję strumieniową (jet-grouting), mikropale, kotwy gruntowe – tymczasowe i trwałe, specjalne technologie wzmocnienia i uszczelniania podłoża, nowoczesne technologie betonowania, wzmocnienia skarp, np. gwoździowanie.

Technologie te są stosowane w celu zabezpieczenia pionowych ścian wykopów w budownictwie ogólnym (podziemia budynków użyteczności publicznej, podziemne garaże budynków mieszkalnych, podziemne parkingi), komunikacyjnym (tunele samochodowe i tunele metra wykonywane metodami odkrywkowymi, szyby startowe do tarcz tzw. TBM) i robót instalacyjnych (kolektory wodociągowe, kanalizacyjne, ciepłownicze).

Najczęściej stosowane i uzasadnione ekonomicznie są ściany szczelinowe, palisady, ścianka berlińska i ścianka z grodziec stalowych. Sposób realizacji robót ziemnych oraz zapewnienia stateczności ścian wykopu zależą od rodzaju jego obudowy, rozmiarów i warunków w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Obudowa wykopu w miarę jego pogłębiania jest jednostronnie odsłaniana. Wykop może być otwarty lub zamknięty – gdy jako rozparcie obudowy ścian wykorzystuje się stropy podziemnych kondygnacji. Ten drugi sposób budowy jest nazywany metodą stropową, przy czym dodatkowo wyróżnia się w niej metody: klasyczną stropową, półstropową oraz tzw. „top & down”, czyli jednocześnie wznoszenie części naziemnej i podziemnej budynku.

Metoda wykonania głębokiego wykopu i sposób stabilizacji jego ścian powinny być określone już na etapie wstępnej koncepcji obiektu. Wybór konkretnego rozwiązania wpływa na pracę statyczną ścian, wartości sił w ich podparciach, przemieszczenia poziome ścian oraz przyległego terenu i obiektów sąsiednich. Ma też duże znaczenie przy ocenie aspektów ekonomicznych inwestycji. Metoda wykonania wykopu zależy również istotnie od warunków hydrogeologicznych i jeżeli jest to wymagane – przewidywanego systemu odwodnienia. Nierzadko te względy mają decydujące znaczenie przy wyborze rodzaju obudowy i zmianach koncepcyjnego projektu obiektu.

Realizacja II linii metra pod istniejącą I linią, Skarpa Warszawską i Wisłą oraz budowa stacji posadowionych na głębokości kilkudziesięciu metrów („Nowy Świat – Uniwersytet” i „Centrum Nauki Kopernik”) [3], [7] spowodowała, że głębokie wykopy sięgające nawet 30 m stały się obecnie w Polsce normalną praktyką w budownictwie infrastrukturalnym i kubaturowym. Przygotowania do budowy metra poprzedziło rozpoznanie geologiczne i geotechniczne. Wiercenia i sondowania zarówno na etapie przetargu, jak i projektowania wykonywano do znacznych głębokości – nawet do 50 m. To wymagało zastosowania nowych technik badawczych, podobnie jak i prowadzenia laboratoryjnych badań cech mechanicznych gruntów. Z kolei projekty budowlane i wykonawcze stacji były wykonane zaawansowanymi narzędziami obliczeniowymi w przestrzeni 3D. Bardzo istotnym elementem było moni-

torowanie przemieszczeń tuneli i stacji, jak również powierzchni terenu oraz budynków sąsiadujących z budową. W tym celu wykorzystuje się nowoczesną aparaturę geodezyjną oraz system kontroli na budowie. Wszystko to sprawia, że każdy z podanych wyżej elementów wpłynął na rozwój technologii, metod badawczych, a także narzędzi bądź metod projektowania.

Tunele drążone tarczą zmechanizowaną

W Polsce przed rokiem 2008 nie drążono tuneli komunikacyjnych tarczami zmechanizowanymi, tzw. TBM (ang. Tunnel Boring Machine). W ostatnich latach w Warszawie wydrążono pod Wisłą tunel kanalizacyjny doprowadzający ścieki z prawobrzeżnej części miasta do oczyszczalni „Czajka”, zakończono budowę centralnego odcinka II linii metra, a w Gdańsku zbudowano tunel pod Martwą Wisłą [8]. Obecnie trwa budowa odcinków wschodnich i zachodnich II linii metra, na których odcinki szlakowe, podobnie jak w części centralnej, są wykonywane z wykorzystaniem tej technologii. Do budowy tunelu kanalizacyjnego w Warszawie i drogowego w Gdańsku zastosowano tarczę TBM zawieszinową (tzw. Slurry Shield), tunele metra wydrążono i drąży się nadal tarczą TBM EPB (Earth Pressure Balance), czyli wyrównywanych ciśnien gruntowych.

Urządzenie o nazwie „tarcza” (shield) zostało opatentowane w 1818 r. w Anglii przez *M.J. Brunela*. Miało ono stanowić osłonę robotników drążących tunel przed zawalaniem otaczającego gruntu oraz jednocześnie być tymczasową obudową przesuwaną – w odróżnieniu od pracochłonne wykonywanych drewnianych obudów tymczasowych stosowanych w klasycznych metodach górniczych.

Po raz pierwszy *M.J. Brunel* zastosował swój pomysł na budowie tunelu pod Tamizą w Londynie, a zaprojektowana tarcza miała kształt prostokątny szerokości 10,8 m i wysokości 6,4 m. Budowa tego tunelu trwała 18 lat (1825–1843) i obfitowała w liczne katastrofy.

Prostokątny kształt przekroju poprzecznego tarczy okazał się źle przystosowany do sterowania jej pochodem i utrzymywania zamierzonej trasy tunelu. Z tych względów następne tarcze przybrały kształt kołowy, umożliwiający jednocześnie zmechanizowanie układania za pomocą erekatora prefabrykowanych segmentów obudowy, które w pierwszych rozwiązaniach konstrukcyjnych nosiły nazwę „tubing” w odniesieniu do żeliwnych elementów kasetonowych, a obecnie stosuje się nazwę „segment” w odniesieniu do obudowy żelbetowej.

Kołowy kształt obudowy był też lepiej przystosowany do przenoszenia obciążeń parciem gruntu i ciśnieniem wody gruntowej, zwłaszcza w gruntach, w których stosunek parcia poziomego do parcia pionowego zbliża się do jedności. Pojęciem „tarcze” objęto wszystkie urządzenia stosowane do budowy tuneli metodą tarczową i wyposażone w cylindryczną, stalową powłokę. Natomiast tarczami zmechanizowanymi nazwano urządzenia występujące pod angielską nazwą Tunnel Boring Machines (TBM), które oprócz tradycyjnych funkcji, dzięki wyposażeniu w głowicę urabiającą (skrawającą) pełnym przekrojem, są zarazem urządzeniami drążącymi wyrobisko. Do drążenia tuneli metodą tarczową stosuje się różne rodzaje tych urządzeń. Ich klasyfikacja zależy od sposobu urabiania gruntu, dostępu do przodka tunelu oraz sposobu zapewnienia stateczności przodka. W tarczach zmechanizowanych stateczność przodka może być zapewniona przez zastosowanie sprężonego powietrza, wywieranie na przodek odpowiedniego ciśnienia zawiesziny bentonitowej bądź

parcie urobionego gruntu, który znajduje się w komorze roboczej. Uproszczoną klasyfikację tarcz zmechanizowanych opracowaną przez *W. Grodeckiego* [4] na podstawie klasyfikacji DAUB (Deutscher Ausschuß für unterirdisches Bauen) [1] przedstawiono na rys. 9.

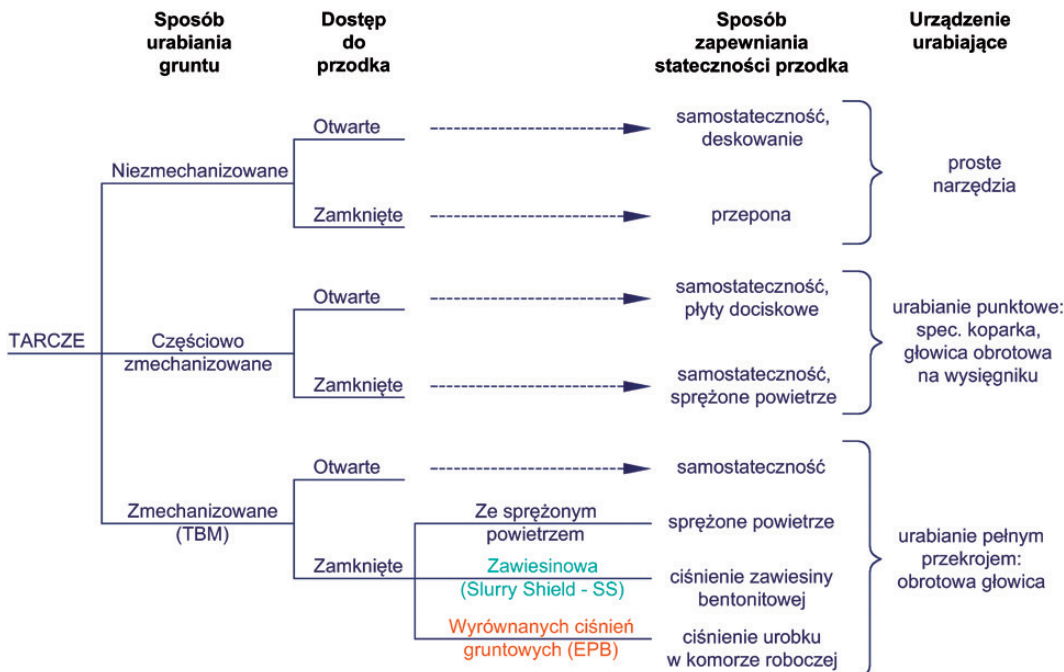
W przypadku zastosowania zawiesziny bentonitowej przyjęto taką tarczę nazywać zawieszinową, a jej odpowiednikiem w technicznej literaturze anglojęzycznej jest Slurry Shield (SS) lub w niemieckiej – Mixshield (Ms). Jeżeli stateczność przodka jest zapewniona przez parcie urobionego gruntu w komorze roboczej, to taką tarczę nazwano tarczą wyrównanych ciśnień gruntowych – Earth Pressure Balanced Shield (EPB lub EPBs) (por. rys. 9).

W odniesieniu do tarcz, które określono jako częściowo zmechanizowane, urabianie gruntu odbywa się nie pełnym przekrojem wyrobiska, lecz – jak to określono na schemacie – z niepełnym urabianiem przodka. Do tego celu służą maszyny wyposażone w hydraulicznie sterowane wysięgniki, tzw. organ urabiający – głowicę skrawającą, obracającą się wokół osi tegoż wysięgnika lub wokół osi do niego prostopadłej, albo też w rodzaj zębów „zdrapujących” grunt przodka. W obu przypadkach urabianie gruntu odbywa się małymi fragmentami. Po urobieniu gruntu, opadając na spąg wyrobiska, jest z niego usuwany za pomocą różnego rodzaju przenośników w głąb już wykonanego tunelu.

Z uwagi na krajowe uwarunkowania geologiczne i hydrogeologiczne w Polsce są stosowane dwa typy tarcz: zawieszinowa (Slurry Shield) oraz wyrównywanych ciśnień (Earth Pressure Balance).

Tarcza zawieszinowa powstała i została opatentowana w 1964 roku. Jej autorem jest brytyjski inżynier *J.V. Bartlett*. Po raz pierwszy zastosowano ją w Europie do budowy tunelu metra pod Tamizą w Londynie. Jednocześnie trwały prace nad skonstruowaniem tarczy zawieszinowej w Niemczech i Japonii, a prototypy znalazły zastosowanie na licznych budowach tuneli.

W Japonii pierwsza tarcza zawieszinowa wystartowała w 1967 r., a w 1978 roku pracowało tam 36 tego typu tarcz, z których największa miała średnicę 7,6 m.



Rys. 9. Uproszczona klasyfikacja tarcz według *W. Grodeckiego* [4]

Tarczę EPB zastosowano po raz pierwszy w 1976 roku w Japonii do budowy w mieście Nagoya tunelu kanalizacyjnego o średnicy 2,68 m i długości 1393 m. Prace prowadzono w trudnych warunkach gruntowych, tj. w nawodnionych żwirach z otoczkami, 10 m poniżej poziomu terenu i jednocześnie poziomu zwierciadła wody gruntowej.

Tarcza zawieszinowa – schemat konstrukcyjny i zasada działania

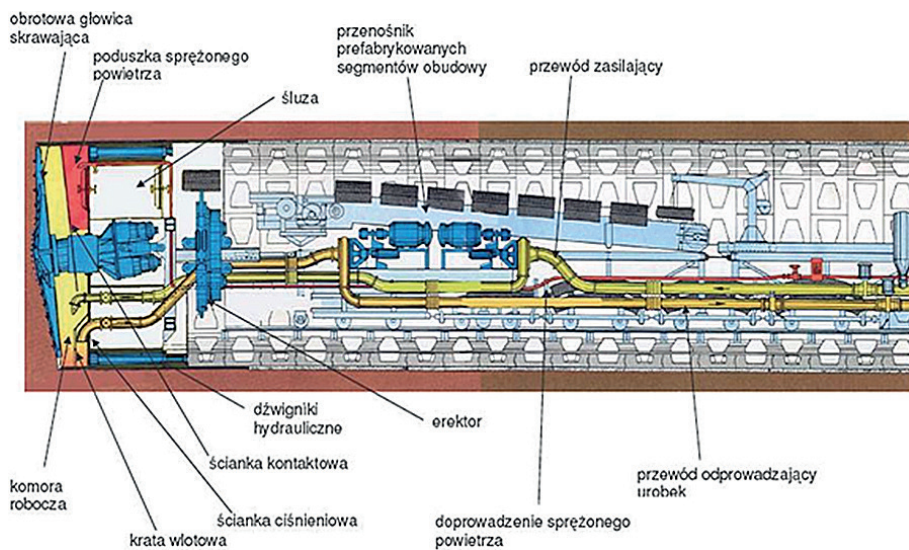
Zasadą działania tego rodzaju tarcz jest zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej na przodku za pośrednictwem przeciwnie skierowanego ciśnienia zawiesziny bentonitowej. Polega ona na tym, że zawieszina będąca pod ciśnieniem infiltruje w pory urabianego gruntu na pewną odległość, wypełnia je blaszkami iłu, zmniejszając przepuszczalność gruntu, nadając mu spójność i poprawiając tym samym jego samostateczność. Jednocześnie, osadzając cząstki iłu na powierzchni przodka, wytwarza cienką błonkę, przez którą wywiera stabilizujące ciśnienie na przodek, równoważące wcześniej wspomniane zewnętrzne parcie gruntu i ciśnienie wody gruntowej.

Omawiana tarcza jest podzielona szczelną i masywną przegrodą, zwaną ścianką ciśnieniową, na dwie części. Część przednia stanowi komorę roboczą (rys. 10). Tu odbywa się urabianie gruntu pełnym przekrojem za pomocą obrotowej głowicy skrawającej. Zazwyczaj głowica ta, w zależności od rodzaju urabianego gruntu i oporów, jakie on stawia, może wykonać od 1 (przy tarczach o dużych średnicach) do 3 pełnych obrotów na minutę. Komora robocza jest wypełniona zawiesziną bentonitową o właściwościach tiksotropowych. W nowszych modelach tarcz zawieszinowych wymagane ciśnienie zawiesziny uzyskuje się za pośrednictwem poduszki sprężonego powietrza, która wytwarza się w części komory roboczej usytuowanej między ścianką ciśnieniową a ścianką kontaktową (rys. 10).

Doprowadzona do komory roboczej zawieszina bentonitowa i urobiony przez głowicę skrawającą grunt mieszają się i w postaci pulpy są odpompowywane systemem pomp i rurociągów na powierzchnię terenu do zakładu separacji

urobku i regeneracji zawiesziny. Tu wspomniana pulpa dostaje się na sита wibracyjne, a następnie do wirówek, gdzie następuje ostateczne oddzielenie kosztownej zawiesziny od urobionego gruntu. Z kolei wykonuje się badania właściwości tak odzyskanej zawiesziny i w zależności od potrzeb regeneruje się ją przez np. zmieszanie z nową, jeszcze nieużywaną zawiesziną, i ponownie systemem przewodów doprowadza do komory roboczej w tarczy.

Jeżeli w gruncie występują głaziki o średnicy większej niż 30–50 mm na przewodzie odprowadzającym urobek, przed pierwszą pompą, licząc



Rys. 10. Tarcza zawieszinowa – przekrój wzdłużny (prowww.herrenknecht.de)

od tarczy, instaluje się osadnik, do którego te kamienie trafiają i nie są odpompowywane do zakładu separacji urobku. Przy większych fragmentach skalnych lub głazach w komorze roboczej montuje się kruszarkę, zdolną rozdrobnić ten materiał na frakcje do 25–30 mm, a więc takie, które mogą być usuwane systemem pomp na powierzchnię terenu.

Zainstalowana w ścianie ciśnieniowej służa pozwala na przedostawanie się obsługi do komory roboczej, co może być związane z koniecznością wymiany noży – frezów w głowicy urabiającej, usunięcia pewnych przeszkód na trasie tunelu, których nie może pokonać głowica itp. W przekroju wzdłużnym tarczy zawieszinowej są odpowiednio usytuowane służa, dźwigniki hydrauliczne do przesuwania tarczy, erektor do montażu prefabrykowanych segmentów obudowy tunelu, a także fragment urządzeń pomocniczych, zainstalowanych na tzw. pociągu (back-up train), poruszającym się po szynach za tarczą (por. rys. 9). Na specjalnych wagonach tego pociągu znajdują się rurociągi wraz z pompami i ich silnikami, przewoźniki do segmentów obudowy, instalacje (mieszalniki, pompy) do wykonywania iniekcji wypełniających puste przestrzenie za obudową itp. Długość tego „pociągu” niekiedy przekracza 100 m.

Systemy rurociągów – zawiesziny, hydrotransportu urobku i sprężonego powietrza mają wspólną cechę, tj. wraz z postępowaniem tarczy jest konieczne ich wydłużanie. W przewody te są wbudowane krótkie odcinki rur teleskopowych, np. o długości 5 m. Rurociąg wydłuża się, gdy tarcza jest przesuwana do przodu. W czasie przerwy w pracy tarczy, kiedy jest układany kolejny pierścień segmentów obudowy, dokonuje się wmontowania stałego odcinka przewodu, a fragment teleskopowy zostaje sprowadzony do pozycji wyjściowej.

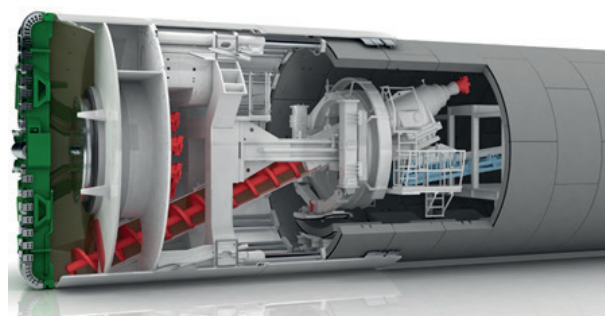
Tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych (EPB) – schemat konstrukcyjny i zasada działania

W tym rodzaju tarcz stateczność przodka, tj. zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej, zapewnia urobiony przez głowicę skrawającą grunt, wypełniający komorę roboczą. Jest ona oddzielona od reszty tarczy i tunelu bardzo masywną ścianą. W niej jest osadzony przewoźnik ślimakowy z cylindryczną, szczelną obudową (rys. 11). Za pomocą tego przewoźnika urobiony grunt jest usuwany z komory roboczej i zrzucany

na kołowe lub szynowe środki transportu albo na przewoźnik taśmowy, którymi jest usuwany z tunelu.

Podczas pracy tarczy EPB, w celu zapewnienia stateczności przodka, najważniejsze jest zachowanie równowagi między ilością gruntu urobionego i usuniętego z komory roboczej. Aby odpowiednio dobrać wartość parcia w komorze roboczej w stosunku do założonego w projekcie, zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej, w komorze instaluje się czujnik do pomiaru parcia urobku. Jeżeli wskazuje on, że to parcie jest większe niż te oddziaływania zewnętrzne, to należy albo zwiększyć wydobywanie urobku z komory roboczej przez zwiększenie prędkości obrotowej przewoźnika ślimakowego, albo zmniejszyć prędkość przesuwu tarczy, odpowiednio sterując

naciskami popychających ją dźwigników hydraulicznych. W przypadku odwrotnym – należy zmniejszyć prędkość obrotową przewoźnika ślimakowego lub zwiększyć prędkość przesuwu tarczy, zwiększając prędkość wysuwania tłoków dźwigników hydraulicznych.



Rys. 11. Schemat tarczy wyrównanych ciśnień gruntowych (prowww.herrenknecht.de)

Drażąc tunel za pomocą tarczy wyrównanych ciśnień gruntowych w gruntach pozbawionych spójności, gruntach zwartych lub skałach jest konieczne stosowanie tzw. dodatków. Są one wstrzykiwane przez specjalne dysze usytuowane w głowicy skrawającej w ścianie ciśnieniowej komory roboczej, w przewoźniku ślimakowym, a niekiedy też dookoła przedniej części powłoki tarczy.

Często wspomniane dodatki noszą nazwę plastyfikatorów, bowiem uplastyczniają urobiony grunt, zmniejszając jego tarcie wewnętrzne. Na skutek mieszania gruntu z plastyfikatorem za pomocą głowicy urabiającej i ewentualnie dodatkowo zainstalowanych mieszadeł dochodzi do homogenizacji urobku i jego uszczelnienia. W konsekwencji pozwala to również na zmniejszenie potrzebnego momentu obrotowego głowicy urabiającej. Dobrze zmieszany grunt z plastyfikatorem powoduje równomierne i ciągle przedostawanie się tej mieszanki do przewoźnika ślimakowego. Tak uplastyczniony i uszczelniony urobek ułatwia pracę przewoźnika dzięki zmniejszeniu tarcia powstającego w jego wąskiej, cylindrycznej obudowie, co znacząco wpływa na zmniejszenie jego koniecznego momentu obrotowego oraz wywołuje powstanie korka, przez który nie może się przedostać woda gruntowa. Z tych względów w celu dodatkowego rozpoznania warunków gruntowych

przed czołem tarczy, a także w przypadku konieczności wykonywania wyprzedzającej iniekcji wzmacniającej grunt przed i wokół przyszłego wyrobiska tunelowego w głowicy umieszcza się wiertnice, za pomocą których jest możliwe pobranie próbek gruntu do badań laboratoryjnych lub wprowadzenie zestawu urządzeń do wykonania iniekcji wzmacniającej grunt przed czołem tarczy i wokół niej.

Wstrzykiwanie plastyfikatora wokół powłoki tarczy zmniejsza tarcie między nią a gruntem, co pozwala na zmniejszenie siły nacisku w dźwignikach przesuwających tarczę oraz wstępnie uszczelnia tę przestrzeń.

Na głowicy urabiającej są rozmieszczone różnego rodzaju narzędzia skrawające, dostosowane do przewidywanych warunków gruntowych. Równocześnie w głowicy są rozmieszczone otwory, którymi urobiony grunt przedostaje się do komory roboczej. Rozmiary tych otworów są tak dobrane, aby przedostające się przez nie kamienie lub fragmenty rozkruszonej skały odpowiadały zdolności transportowania przez przenośnik ślimakowy. W przypadku tarcz EPB nie stosuje się kruszarek, jak to może mieć miejsce w przypadku tarcz zawieszonych, ale przenośniki ślimakowe zdolne do transportowania kamieni i fragmentów skał o znacznie większych wymiarach niż system hydrotransportu w tych ostatnich tarczach.

Oprócz fazy stałego pochodu tarczy równie ważny dla bezpieczeństwa robót oraz oddziaływania na podłoże i powierzchnię terenu jest moment, w którym głowica tarczy i cała maszyna przebija się przez ścianę szybu startowego, w którym została zmontowana. Aby zmniejszyć parcie gruntu i wody gruntowej na głowicę urabiającą, bezpośrednio za ścianą szybu wykonuje się w strefie wyjścia tarczy iniekcję strumieniową, która wzmacnia i uszczelnia podłoże na długości kilku metrów za szybem, natomiast w ścianie szczelinowej montuje się specjalne kołnierze i uszczelki.

Szczegółowo zasady doboru typu tarczy do warunków gruntowych, oddziaływanie robót tarczą na powierzchnie terenu i budynki, sposób projektowania obudowy, metody doboru plastyfikatorów w tarczach EPB oraz pełne informacje o tarczach zmechanizowanych są przedstawione w publikacjach [2, 5, 6, 8, 12, 14].

Podsumowanie

W najbliższych latach przewiduje się w Polsce przede wszystkim budowę kolejnych tuneli drogowych i kolejowych oraz obiektów budownictwa podziemnego.

Trwają przygotowania do drażenia tarczą zmechanizowaną tunelu drogowego pod Świną w Świnoujściu, metodą konwencjonalną jest budowany tunel drogowy na trasie Naprawa – Skomielna Biała, w Warszawie powstaje najdłuższy w Polsce tunel drogowy na Południowej Obwodnicy Warszawy, wznoszony metodą stropową w głębokim wykopie. Ponadto jest planowana budowa tuneli drogowych w województwie podkarpackim na trasach S3 i S19. W Łodzi trwa realizacja inwestycji związanej z udrożnieniem łódzkiego węzła kolejowego, obejmująca budowę pięciu tuneli kolejowych łączącej długości 7,5 km, drażonych tarczą. Na etapie przetargu na dokumentację projektową jest kilka tuneli kolejowych w Małopolsce.

W okresie od 2012 do 2018 r. zrealizowano w Polsce z sukcesem duże tunele, stosując 7 maszyn TBM.

PIŚMIENNICTWO

- [1] DAUB Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Stand 10/2010.
- [2] Guidelines for the design of Tunnels. "Tunnelling and Underground Space Technology", Vol. 3, No. 3/1988.
- [3] Grodecki W., Lejk J., Siemińska-Lewandowska A.: II linia metra w Warszawie – perspektywy i metody realizacji. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 7–8/2007.
- [4] Grodecki W.: Technologia tarcz zmechanizowanych. Część I. Materiały seminarium (na prawach rękopisu). Metro Warszawskie, Warszawa 2006.
- [5] Guglielmetti V., Grasso P., Mastab A., Xu Shulin.: Mechanized Tunneling in Urban Areas. Design Methodology and Construction Control. Taylor & Francis/Balkema 2008.
- [6] Peila D., Picchio A., Siemińska-Lewandowska A.: Badania plastyfikatorów stosowanych w drażeniu tuneli tarczami typu EPB. „Materiały Budowlane”, nr 2/2015.
- [7] Mitew-Czajewska M., Siemińska-Lewandowska A., Lejk J.: Doświadczenia z budowy centralnego odcinka II linii metra w Warszawie. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 8/2017.
- [8] Petrow-Ganew D.: Dobór głowic tunelowych TBM w zależności od istniejących warunków geotechnicznych i hydrogeologicznych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2013.
- [9] Rossmann J. (redakcja): Studia i projekty metra w Warszawie 1928–1958. Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa 1962.
- [10] Siemińska-Lewandowska A.: Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. Arkady, Warszawa 2008.
- [11] Sobolewski T. (redakcja): Monografia elektrowni szczytowo-pompowej Porąbka-Żar. Copyright PGE Energia Odnawialna SA, 2010.
- [12] Standards / Manuals of Mechanized Tunneling, WG 14 – Mechanized Tunneling, March 2007 (www.ita-aite.org).
- [13] Stamatello H.: Tunele i miejskie budowle podziemne. Arkady, Warszawa 1970.
- [14] Thewes M.: Soft ground shield tunneling. Materiały szkoleniowe kursu "Shield tunnelling in soft soils". DelftGeoAcademy, Delft 2008.