



Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa
Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

DYPLOM

w konkursie autorskim artykułów wyróżniających się
ujęciem tematyki i przydatnością praktyczną, opublikowanych
na łamach miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” w roku 2022

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

przyznała

I NAGRODĘ

za artykuł pt. „Budowa drogowych tuneli podwodnych
tarczami zmechanizowanymi” (nr 3-4/2022).

Laureatką została

prof. dr hab. inż. ANNA SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA

SERDECZNIE GRATULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego

A blue ink signature of Barbara Goszczyńska.

Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

W imieniu Rady Programowej

A blue ink signature of Anna Halicka.

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Przewodnicząca Rady

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Budowa drogowych tuneli podwodnych tarczami zmechanizowanymi

Tunele podwodne można generalnie podzielić na płytkie, znajdujące się bezpośrednio w dnie rzeki lub morza, oraz głębokie, biegnące od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów poniżej dna cieku wodnego. Tunele płytkie wykonuje się metodą zatapiania gotowych elementów, powszechnie stosowaną od lat w krajach Beneluxu, a także w Skandynawii – tunel w cieśninie Sund, planowany Fehmarnbelt i w Turcji pod cieśniną Bosfor. Głębokie tunele podwodne buduje się klasycznymi metodami górniczymi (np. Seikan w Japonii), a najczęściej drąży tarczami zmechanizowanymi. Metodą tarczową wykonano na przestrzeni ostatnich 30 lat wiele tuneli podmorskich (np. Euro-tunel) oraz tuneli pod rzekami. W Polsce jest kilka tuneli podwodnych. Tunele techniczne – wodociągowe, ciepłownicze i tunel przesyłowy ścieków do „Czajki” – pod Wisłą. Ten ostatni wydrążony pierwszą w Polsce tarczą zawieszinową o średnicy 5,5 m. Dwa tunele szlakowe II linii metra na odcinku od stacji Stadion do stacji Centrum Nauki Kopernik wykonano pod Wisłą tarczą typu EPB. Za najbardziej interesujące realizacje ostatnich lat należy uznać budowę dwóch dużych podwodnych tuneli drogowych – pod Martwą Wisłą w Gdańsku (oddany do eksploatacji w 2016 r.) oraz tunel pod Świną w Świnoujściu.

Metoda tarczowa budowy tuneli jest znana od prawie 200 lat. Po raz pierwszy tarcza została wykorzystana do budowy tunelu pod Tamizą w Londynie w 1826 roku. Od tego czasu technologia ta jest stale modernizowana, a nowoczesne tarcze zmechanizowane są urządzeniami umożliwiającymi drążenie tuneli w bardzo zróżnicowanych warunkach gruntowych, na terenach silnie zurbanizowanych, pod rzekami lub pod istniejącą zabudową. Z uwagi na uwarunkowania geologiczne i hydrogeologiczne w przypadku tuneli podwodnych, drążonych pod rzekami, kanałami portowymi czy morzami, w niniejszym artykule ograniczono się do analizy zastosowań tarczy zawieszinowej (Slurry Shield) czasami nazywanej, szczególnie w opracowaniach niemieckich, Mixshield. W dalszej części pracy stosowane będzie określenie: tarcza (TBM) zawieszinowa.

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 w Japonii, a prototypy znalazły zastosowanie na licznych budowach tuneli. W Japonii pierwsza tarcza zawieszinowa wystartowała w roku 1967, a w 1978 pracowało tam 36 tego typu tarcz, z których największa miała średnicę 7,6 m.

Jak widać z przytoczonych powyżej danych metoda tarcz zawieszinowych ma wieloletnią historię i jest na całym świecie powszechnie wykorzystywana do budowy tuneli komunikacyjnych i technicznych (wodociągowych, kanalizacyjnych).

W artykule przedstawiono krótki opis tarczy z podaniem jej podstawowych elementów konstrukcyjnych (w tym terminologii angielskiej), zasadę działania tarczy zawieszinowej oraz przykłady zastosowania tych tarcz z ostatnich lat do budowy tuneli podwodnych, które dowodzą skuteczności metody i racjonalności rozwiązań.

Elementy konstrukcyjne tarczy zmechanizowanej

Tarcza zmechanizowana składa się ze stalowej obudowy w kształcie walca (*shield skin*), w której montowane są urządzenia służące do urabiania gruntu oraz montażu obudowy tunelu. Podstawowe elementy konstrukcyjne tarczy to:

- obrotowa głowica skrawająca (*cutter head*) do urabiania gruntu;
- dźwigniki/lewary hydrauliczne (*hydraulic jacks*) służące do utrzymywania nacisku na głowicę skrawającą oraz do przesuwu całości maszyny;
- urządzenia do ewakuacji urobku z komory roboczej – w tarczy zawieszinowej urobek jest odprowadzany rurami wraz z zawiesziną ilową, a w tarczy EPB za pomocą przenośnika ślimakowego (*screw conveyer*);
- urządzenie do montażu obudowy – dźwиг próżniowy, czyli erektor (*erector*) układający segmenty żelbetowe obudowy tunelu (*tunnel segmental lining*), tworzące kolejne pierścienie obudowy tunelu (*tunnel ring*);
- urządzenia do przeprowadzenia iniekcji uszczelniającej pustkę za obudową segmentową (*grouting equipment to fill the voids behind the segments*).

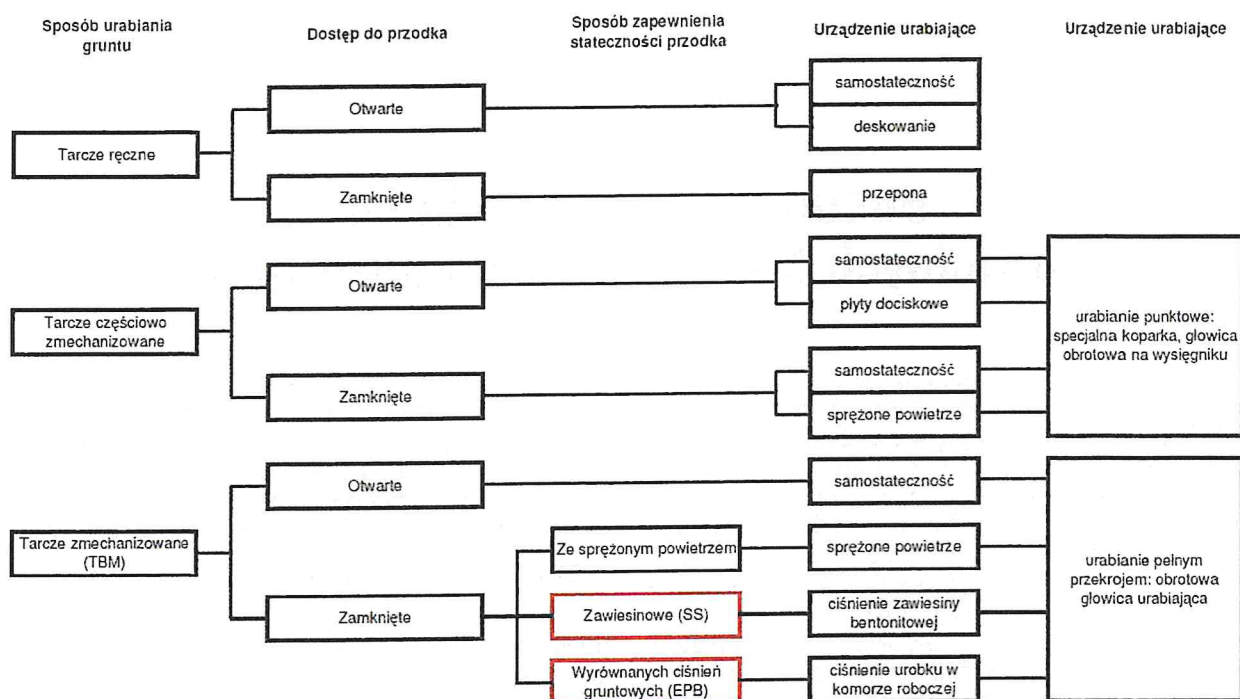
Przestrzeń tarczy, czyli komora robocza, gdzie urabiany i zbierany jest grunt, jest oddzielona od pozostałej części, w której panuje ciśnienie atmosferyczne, przegrodami ciśnieniowymi. Ważnym elementem jest ogon tarczy (*tailskin*) z uszczelkami (szczotkami) uniemożliwiającymi penetrację podczas iniekcji zaczynu, a także wody i gruntu do wnętrza tarczy.

Terminem TBM określa się całość urządzenia drążącego tunel, czyli tarczę i zaplecze (pociąg) zawierające wszystkie urządzenia niezbędne do wykonania tunelu. Długość pociągu waha się od 60 m do nawet 190 m.

Omawiana w dalszej części artykułu tarcza zawieszinowa jest tarczą typu zamkniętego, a jej miejsce na schemacie klasyfikacji tarcz wg W. Grodeckiego pokazano na rys. 1.

Zasada pracy maszyny TBM drążącej tunel polega na wielokrotnie powtarzalnych następujących fazach:

- urabianie gruntu głowicą skrawającą z jednoczesnym zapewnieniem stateczności przodka;
- wypełnienie urobkiem komory roboczej;
- usuwanie urobku – w zależności od typu maszyny rurami z zawiesziną lub przenośnikiem ślimakowym;
- przesuw tarczy – tłoki dźwigników/lewarów hydraulicznych wysuwają się na całą swoją długość – od 1 do 2 m



Rys. 1. Klasyfikacja tarcz wg W. Grodeckiego [1]

(w zależności od wymiarów pojedynczego segmentu), odpychając się od już wykonanej obudowy tunelu;

- wciąganie kolejnych na obwodzie maszyny łożysk lewarów – na to miejsce montaż segmentów żelbetowych i budowa kolejnego pierścienia obudowy tunelu;

- iniekcja uszczelniająca pustki za obudową segmentową;

- urabianie gruntu i kolejne powtarzające się etapy pracy maszyny.

Opisane powyżej fazy pracy TBM dotyczą sytuacji drążonego tunelu z wykonaną już obudową segmentową. Rozpoczęcie budowy tunelu TBM przebiega w następujących etapach:

- wykonanie komory startowej w obudowie ze ścian szczelinowych – niezależnego obiektu lub w przypadku budowy metra stacji, która jednocześnie służy jako szyb startowy;

- wykonanie na dnie komory odpowiednio wyprofilowanej płyty dennej;

- opuszczenie w całości lub montaż maszyny w komorze startowej, montaż zaplecza;

- wykonanie konstrukcji oporowej, od której odepchnie się maszyna, rozpoczynając drążenie;

- uszczelnienie iniekcją strumieniową gruntu za ścianą szczelinową na pierwszych kilku metrach drążenia tunelu;

- przebicie ściany szczelinowej i montaż kilku pierścieni obudowy w szybie startowym.

Jednocześnie z rozpoczęciem drążenia należy wykonać komorę odbiorczą.

Tarcza zawieszinowa – schemat konstrukcyjny i zasada działania

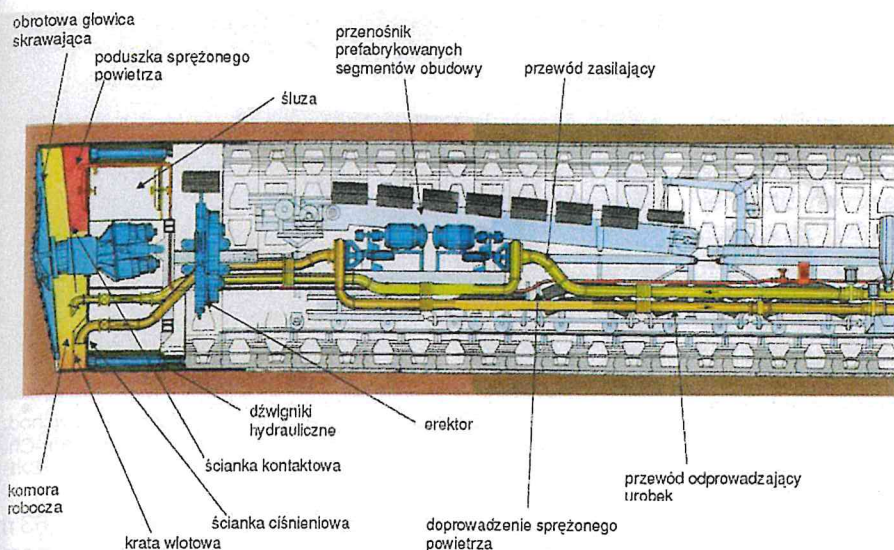
Zasadą działania tarczy zawieszinowej jest zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej na przodku za pośrednictwem przeciwnie skierowanego ciśnienia zawiesziny ilowej [1]. Mechanizm tego zrównoważenia polega na tym, że zawieszina będąca pod ciśnieniem infiltruje w pory urabianego gruntu na pewną odległość, wypełnia je blaszkami ilu, zmniejszając prze-

puszczalność gruntu, nadając mu spójność i poprawiając tym samym jego samostateczność. Jednocześnie osadzając cząstki ilu 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. 2). 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 pomiędzy ścianką ciśnieniową a ścianką kontaktową, widoczną na rys. 2.

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. Tam wspomniana pulpa dostaje się na sita wibracyjne, a potem 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 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 mon-



Rys. 2. Schemat tarczy zawieszinowej [4]

tuje się kruszarkę, zdolną rozdrobnić ten materiał na frakcje do 25÷30 mm, a więc takie, które mogą być ewakuowane systemem pomp na powierzchnię terenu.

Zainstalowana w ścianie ciśnieniowej śluz umożliwia przedostanie 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.

Na rysunku 2 przedstawiono przekrój wzdłużny przez tarczę zawieszinową wraz z pokazaniem usytuowania wyżej wspomnianej śluzy, dźwigników hydraulicznych do przesuwania tarczy, erektora do montażu prefabrykowanych segmentów obudowy tunelu, a także fragmentu urządzeń pomocniczych, zainstalowanych na tzw. pociągu (zapleczu), poruszającym się po szynach za tarczą. Na specjalnych wagonach tego pociągu znajdują się rurociągi wraz z pompami i ich silnikami, przenośniki do segmentów obudowy, instalacje (mieszalniki, pompy) do wykonywania iniekcji wypełniających puste przestrzenie za obudową itp.

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

Tarcze zawieszinowe najlepiej nadają się do drążenia tuneli w gruntach pozbawionych spójności – w piaskach i żwirach oraz w gruntach niejednorodnych. Nie oznacza to jednak, że nie mogą skutecznie pracować w innych gruntach, np. spoistych, a nawet w przewarstwieniach skalistych. Jak to już wspomniano wcześniej, zastosowanie dodatkowych urządzeń, np. kruszarki, pozwala rów-

niez na drążenie tuneli w gruntach, w których występują kamienie o większych rozmiarach niż żwiry. Również występowanie dużych głazów narzutowych, jakie występują w glinach zwałowych, nie jest przeszkodą nie do pokonania dla tego rodzaju tarcz; mogą one jednak wpłynąć na zmniejszenie postępu drążenia. Natomiast zmieniające się warunki gruntowe na trasie tunelu będą wymagać starannego doboru zawiesziny, jej gęstości i odpowiednich dodatków.

W tarczach zawieszinowych łatwiej automatycznie kontrolować ciśnienie podparcia przodka w komorze roboczej niż w tarczach EPB. Sposób urabiania gruntu do minimum ogranicza wpływ tunelowania na podłoże, jest niezawodny i bezpieczny [2]. Zalecenia dotyczące wyboru rodzaju TBM

w zależności od warunków gruntowych opisano w [3].

Doświadczenia światowe w stosowaniu tarczy zawieszinowej do budowy tuneli podwodnych

W tablicy 1 zestawiono wybrane dane dotyczące stosowania tarczy zawieszinowej do budowy tuneli podwodnych na świecie. Informacje usystematyzowano wg średnicy maszyn; przedstawiono dane dla tarcz o średnicy powyżej 8 m. W dalszej części artykułu opisano wybrane budowy w celu szczegółowego przedstawienia danych technicznych.

Tablica 1

Zestawienie danych o stosowaniu tarczy zawieszinowej na świecie

Lp.	Nazwa tunelu/Miasto/Państwo	Typ tarczy	Średnica tarczy [m]	Liczba maszyn	Rodzaj tunelu
1.	Tuen Mun-Chek Lap/Hongkong	zawieszinowa	17,63	1	drogowy
2.	Szanghaj/Chiny	zawieszinowa	15,43	2	drogowy
3.	Hamburg/Niemcy	zawieszinowa	14,20	1	drogowy
4.	Lefortowo/Rosja	zawieszinowa	14,20	1	drogowy
5.	Srebrny Bór/Rosja	zawieszinowa	14,20	1	drogowy
6.	Tuen Mun-Chek Lap/Hongkong	zawieszinowa	13,95	2	drogowy
7.	Eurasia/Stambuł/Turcja	zawieszinowa	13,70	1	drogowy
8.	Świna/Świnoujście/Polska	zawieszinowa	13,46	1	drogowy
9.	Martwa Wisła/Gdańsk/Polska	zawieszinowa	12,50	1	drogowy
10.	Paryż/Francja	zawieszinowa	11,59	1	drogowy
11.	Skalda/Holandia	zawieszinowa	11,34	2	drogowy
12.	Sydney/Australia	zawieszinowa	10,71	1	metro
13.	Berlin/Niemcy	zawieszinowa	8,93	2	kolejowy
14.	Antwerpia/Belgia	zawieszinowa	8,27	1	kolejowy
15.	Londyn/Wielka Brytania	zawieszinowa	8,16	2	kolejowy

Tunel podwodny w Hongkongu

Tunel Tuen Mun – Chek Lap Kok Link o dwóch nawach po 2 pasy ruchu i o długości około 5 km łączy północną część Hongkongu z międzynarodowym lotniskiem oraz z oddaną do użytku w 2018 r. przeprawą tunelowo-mostową Hong Kong-Zhuhai – Macau. Biegnie na głębokości 50 m pod deltą rzeki Perłowej. Prace rozpoczęto w 2013 r., a oddano tunel do eksploatacji 27 grudnia 2020 r.

Warunki geologiczne to grunty aluwialne, osady morskie (iły), skała – granit oraz całkowicie zwietrzały granit (CDG).

Wykonawca wykorzystał do budowy tunelu trzy maszyny: dwie o średnicy 14 m (13,95 m) i trzecią, największą obecnie na świecie tarczę zawieszinową o średnicy 17,63 m, widoczną na rys. 3. Począwszy od północnej komory startowej większa maszyna w maju 2015 r. rozpoczęła drążenie 650 m tunelu o wymaganej geometrii średnicy wewnętrznej powyżej 16 m. Po wejściu do pośredniej komory odbiorczej w listopadzie 2015 r. (rys. 4) zmieniono tarczę na mniejszą, o średnicy 14 m, pozostawiając to samo zaplecze, i w marcu 2016 r. rozpoczęło dalsze drążenie w kierunku międzynarodowego lotniska. Jednocześnie trwały prace przy równoległej nitce tunelu. Tarcza o średnicy 14 m wystartowała z tej samej komory co większa w czerwcu 2015 r. i 27 lutego 2019 r. jednocześnie dwie maszyny weszły do komory odbiorczej (rys. 5). Ich średnia prędkość drążenia wyniosła około 20 m na dobę, a szczytowa 30,8 m na dobę. Oprócz części tunelowej należało wykonać komory oraz rampy dojazdowe i fragmenty tuneli budowane metodą odkrywkową – łącznie 1874 m. W tym celu wykonano specjalną groblę w grodach ze ścian szczelinowych z dodatkowym uszczelnieniem podłoża technologią CMC oraz przegrodą jet-grouting. Komora startowa miała wymiary 85 m na 44 m i głębokość 22 m.

Jest to najdłuższy i najgłębiej położony drogowy, podmorski tunel w Hongkongu, a jednocześnie największy kontrakt w robotach publicznych. Podczas jego budowy po raz pierwszy na świecie:



Rys. 5. Dwie tarcze zawieszinowe o średnicy 14 m jednocześnie wchodzą do komory odbiorczej po wydrążeniu 2 x 5 km tunelu Tuen Mun-Chek Lap Kok [5]

- zastosowano tarczę zawieszinową o średnicy 17,63 m;
- zmieniono średnicę maszyny, pozostawiając to samo zaplecze;
- jednocześnie dwie maszyny o średnicy prawie 14 m (13,95 m) weszły do komory odbiorczej, przebijając ściany szczelinowe szybu;
- do wykonania 46 przejść ewakuacyjnych między dwoma tunelami drogowymi wykorzystano mikrotunelowanie i tarczę AVN 3000 o średnicy 3,6 m.

Dane techniczne tarcz zawieszinowych są następujące:

- 1 maszyna TBM zawieszinowa; średnica 17,630 m, moc głowicy – 5600 kW, moment obrotowy 27 722 kN·m, maksymalne ciśnienie na głowicę – 5 do 7 barów;
- 2 maszyny TBM zawieszinowe; średnica 13,95 m, moc głowicy – 4900 kW, moment obrotowy 24 256 kN·m, maksymalne ciśnienie na głowicę – 5 do 7 barów;
- 2 maszyny AVN, średnica 3,065 m, moc głowicy – 400 kW, moment obrotowy 800 kN·m.

Realizacja tunelu Tuen Mun – Chek Lap Kok została wyróżniona w 2019 r. nagrodą Międzynarodowego Stowarzyszenia Tunelowego i Przestrzeni Podziemnej ITA AWARD za największy projekt tunelowy na świecie o wartości powyżej 500 milionów euro [6].

Tunel pod rzeką Jangcy w Szanghaju (Changjiang Under River Tunnel Project)

Tunel o długości 8,9 km znajduje się u ujścia rzeki Jangcy do Morza Chińskiego i łączy dzielnicę przemysłową Pudong z położoną na rzece wyspą Chagxing; dalej trasa prowadzona jest mostem na następną wyspę Chongming. Budowa tunelu w latach 2006–2008 miała na celu uniezależnienie coraz bardziej rosnącego ruchu drogowego od przepraw promowych oraz stworzenie stałego połączenia z łodem z uwagi na ułożone na wyspie tereny światowego Expo 2010 w Szanghaju.

Ze względu na warunki geotechniczne [2], grunty aluwialne – piaski drobne, iły, pyły piaszczyste do drążenia tunelu wybrano tarczę zawieszinową. Wymagania ruchu – konieczność przeprowadzenia trzech pasów w każdym kierunku oraz wymagania pożarowe i eksploatacyjne zdecydowały o dużej średnicy maszyny – 15,43 m, największej na świecie tarczy zawieszinowej w tamtym czasie. Wewnętrzna średnica tunelu wynosiła 13,70 m. Na jeden pierścień obudowy składa się 10 żelbetowych segmentów, 7 typowych, dwa przykluczowe i jeden kluczowy. Grubość segmentów wynosi 0,65 m, a szerokość 2 m. Poniżej płyty jezdni zaprojektowano przestrzeń dla przyszłej linii metra oraz korytarze ewakuacyjne [2]. Przejścia ewakuacyjne



Rys. 3. Tarcza zawieszinowa o średnicy 17,63 m i tarcza AVN; odbiór maszyn u producenta [5]



Rys. 4. Tarcza zawieszinowa o średnicy 17,63 m w momencie wejścia do pośredniej komory odbiorczej; z prawej widoczne przejście przez komorę maszyny o średnicy 14 m drążącej równoległy tunel [5]

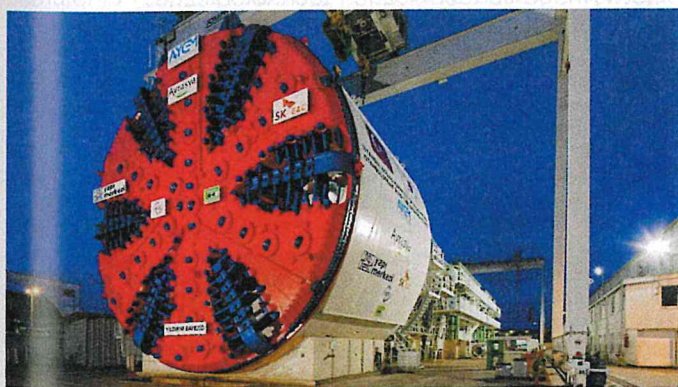
z jednego tunelu do drugiego wykonano co 830 m, stosując technologię gruntu mrożonego. Dodatkową trudnością był fakt, że tunel biegł około 60 m poniżej lustra wody i ciśnienie na głowicę wynosiło 6,5 bara. Dwie tarcze zawieszinowe równolegle drażyły dwa tunele w odległości osiowej 23 m. Pierwsza z nich rozpoczęła drażenie z komory startowej na Pudongu we wrześniu 2006 r., a druga w styczniu 2008 r. Obydwa tunele wykonano odpowiednio: pierwszy w 10, a drugi w 12 miesięcy. Średnia prędkość drażenia wyniosła 20 m na dobę, a szczytowa 26 m na dobę.

Dane techniczne tarcz zawieszinowych drażących dwa tunele w Szanghaju są następujące:

- 2 maszyny TBM zawieszinowe, średnica 15,43 m, moc głowicy – 3750 kW, moment obrotowy 39 984 kN·m, maksymalne ciśnienie na głowicę – 6,5 bara.

Tunel Eurasia pod cieśniną Bosfor (Istanbul Strait Road Tube Crossing Project)

Jest to drogowy tunel o długości 5,4 km łączący dwa kontynenty, biegnący 100 m poniżej poziomu morza w swoim najgłębszym punkcie. Aby uniknąć kolizji budowy z intensywnym ruchem statków w cieśninie Bosfor, zdecydowano o drażeniu odcinka długości 3,34 km tarczą zawieszinową o średnicy 13,66 m, pokazaną na rys. 6. Nigdy dotąd nie drażono tunelu tarczą pod tak dużym ciśnieniem, sięgającym 11 barów. Wewnętrzna średnica tunelu wynosi 12 m. Tunel ma dwa pasy ruchu w każdym kierunku położone jeden nad drugim. Duża średnica maszyny była utrudnieniem prac tunelowych. Jednak nie zmieniono koncepcji dwupoziomowego ruchu, bo tylko przy tej średnicy tunel Eurasia mógł spełnić swoje zadanie, czyli zapewnić przepustowość kilkudziesięciu tysięcy pojazdów na dobę. Tym samym czas dojazdu od strony południowej do przeprawy przez cieśninę i europejskiej strony Stambułu skrócił się w godzinach szczytu ze 100 minut do 15, ze względu na ominięcie bardzo obciążonego ruchem pierwszego z mostów przez Bosfor. Centrum 18-milionowej metropolii zostało uwolnione od ruchu z azjatyckiej części miasta i dzięki temu liczy się na znaczne ograniczenie emisji spalin i CO₂.



Rys. 6. Tarcza zawieszinowa o średnicy 13,66 m drażąca tunel Eurasia [7]

Warunki budowy były skomplikowane z uwagi na duże ciśnienie oraz zmienność geologii na trasie tunelu. Na długości 3,34 km 20% stanowiły grunty – ropy, piaski, żwiry i otoczaki, a 70% skały formacji trackiej – mułowiec, piaskowiec, skały wulkaniczne i zwarte skały. Z tego względu głowica maszyny została wyposażona w różnego typu narzędzia skrawające odpowiednie do każdego typu podłoża. Szerokie noże urabiały grunty miękkie, a 35 podwój-

nych, 19-calowych dysków o ciężarze 1 tony każdy – skałę. Pojedyncze, płaskie noże wylamywały skałę. Mniejsze okruchy skalne były transportowane z zawiesziną do stacji separacji, większe – dopiero po obróbce w kruszarce. Jednocześnie z urabianiem utrzymywano stały obieg zawiesziny zapewniającej odpowiednie ciśnienie w komorze roboczej i stateczność przodka. Producent maszyny opracował specjalny system pozwalający na wymianę narzędzi skrawających od wewnątrz maszyny, w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Dzięki takim zabiegom szybkość drażenia wyniosła od 8 do 10 m na dobę oraz rekordowe 167 m w tydzień.

Drażenie rozpoczęto po azjatyckiej stronie cieśniny w kwietniu 2014 r. Po 16 miesiącach pracy maszyna dotarła 22 sierpnia 2015 r. do komory odbiorczej po stronie europejskiej. Tunel drogowy Eurasia jest pierwszym stałym połączeniem historycznego półwyspu Złoty Róg z terenami portowymi leżącymi w Azji. Od 2016 r. dziesiątki tysięcy pojazdów na dobę przejeżdżają tunelem między dwoma kontynentami.

Dane techniczne tarczy zawieszinowej, która wydrażyła tunel Eurasia, są następujące:

- 1 maszyna TBM zawieszinowa, średnica 13,66 m, moc głowicy – 4900 kW, moment obrotowy 23 290 kN·m, maksymalne ciśnienie na głowicę – 11 barów.

Tunel pod Łabą w Hamburgu (Elbe 4 Röhre)

Łaba na odcinku estuarium od Morza Północnego do Hamburga jest jedną z najbardziej ruchliwych dróg wodnych. Dlatego już w 1911 roku powstał tam tunel dla pieszych, a następnie w 1975 roku autostradowy tunel drogowy wykonany metodą zatapiania gotowych elementów. Pod koniec lat 90. natężenie ruchu wyniosło 140 000 pojazdów dziennie, co znacznie przekraczało przepustowość istniejącego tunelu o sześciu pasach ruchu. Podjęto decyzję o budowie czwartej nitki, stąd nazwa tunelu: 4. Rura. Zaprojektowano przeprawę o długości 4,4 km, w tym tunel drażony tarczą o długości 2,56 km. W przekroju tunelu znajdują się 2 pasy ruchu o szerokości 3,75 m, pas awaryjny o szerokości 2 m oraz dwa chodniki bezpieczeństwa o szerokości 0,50 m i 0,63 m. Całkowita wewnętrzna średnica tunelu wynosi 12,35 m, a średnica tarczy – 14,20 m. Tunel ten był drażony w bezpośrednim sąsiedztwie już istniejącego.

Określona długość przeprawy, głębokość Łaby oraz maksymalny spadek wzdłużny równy 3,7% sprawiły, że tunel biegnie 7 do 13 m pod dnem rzeki, a maksymalny nadkład na północnym brzegu wynosi 50 m. Najniższy punkt niwelety znajduje się na głębokości 42 m poniżej poziomu morza. Bardzo zmienne i niejednorodne warunki geotechniczne obejmują w południowej części (na płaskim brzegu rzeki) tereny rekultywowane, tzn. nasypy, piaski i żwiry na długości około 500 m. Następnie trasa tunelu na długości około 1 km pod rzeką przechodzi przez osady lodowcowe: zagęszczone piaski, zwarte gliny i ropy, pyły i soczewki z wodą pod ciśnieniem. W warstwach tych stwierdzono występowanie głazów narzutowych o średnicach dochodzących do 2 m. Dalej w kierunku północnym tunelu zalegają pyły i margle lodowcowe. Z uwagi na złożone warunki gruntowe, zagęszczone piaski i zwarte ropy i gliny, a także głazy narzutowe spodziewano się dużych trudności podczas drażenia tunelu.

Tunel drażono tarczą zawieszinową o średnicy 14,20 m, przedstawioną na rys. 7, którą wybrano po rozpatrzeniu wielu kryteriów, ale głównie kryterium bezpieczeństwa prac. Planowany postęp robót wyniósł przeciętnie 2 pierścienie



Rys. 7. Tarcza zawieszinowa o średnicy 14,20 m z Hamburga [8]

(4 m) dziennie, wliczając w to wszystkie okresy zatrzymania robót. Drażnienie rozpoczęto z południowego szybu 15 października 1997 roku, a ukończono w szybie północnym 2 marca 2000 roku po 2 latach i 5 miesiącach pracy. Obecnie tunelem jeździ około 30 000 pojazdów na dobę.

Dane techniczne tarczy zawieszinowej, która wydrążyła tunel w Hamburgu, są następujące:

- 1 maszyna TBM zawieszinowa, średnica 14,20 m, moc głowicy – 3200 kW, moment obrotowy 26 000 kN·m, maksymalne ciśnienie na głowicę – 5,5 bara.

Tunel Lefortowo na obwodnicy Moskwy

Tunel Lefortowo znajduje się we wschodniej części trzeciej dużej obwodnicy Moskwy. Jego trasa biegnie pod terenami zabudowanymi, rzeką Jauza (dopływ Moskwy), podziemną infrastrukturą techniczną, w tym między innymi kablem energetycznym 110 kV. Jest to tunel drogowy, zawierający trzy pasy ruchu, kanał wentylacyjny oddymiający oraz pomieszczenia techniczne i tunele ewakuacyjne dla pieszych. Całkowita jego długość wynosi 2222 m, średnica tarczy – 14,22 m, wewnętrzna średnica tunelu – 12,35 m. Jeden pierścień obudowy jest zbudowany z 8 segmentów żelbetowych o grubości 0,70 m i ciężarze 20 ton oraz jednego segmentu kluczowego [9].

Trasa tunelu przebiega w bardzo zróżnicowanych warunkach geologicznych, zarówno w profilu podłużnym, jak i na wysokości 14,2 m przekroju poprzecznego. Z uwagi na warunki gruntowe i hydrogeologiczne tunel Lefortowo drażono tarczą TBM zawieszinową, tą samą, która wykonała tunel pod Łabą w Hamburgu. Drażnienie rozpoczęto 10 listopada 2001 roku, a zakończono 18 lutego 2003 roku. Oznacza to, że 2222 m tunelu wykonano w 15 miesięcy (tzn. kilka miesięcy krócej niż przewidywano). Tunel oddano do eksploatacji pod koniec 2003 roku. Tarcza zawieszinowa została wyremontowana i wykorzystana do drażnienia trzeciego już tunelu drogowego Srebrny Bór, również pod Moskwą.

Tunel pod zachodnim estuarium Skaldy (Westerschelde tunnel)

Tunel ten zapewnia połączenie drogowe między regionami Zuid – Beveland a Zeeuwisch-Vlaanderen położonymi na północnym i południowym brzegu Zachodniej Skaldy. Rzeka ta jest szlakiem żeglownym statków pełnomorskich cumujących w Antwerpii. Projekt stałej przeprawy w tym miejscu powstał już w latach 30. i 70. XX wieku, natomiast w 1986 roku podjęto definitywną decyzję

o budowie tunelu [10]. W podłożu rzeki występuje warstwa nieprzepuszczalnych ilów w stanie zwartym o miąższości od 8 do 38 m. Piaski zalegające pod i nad tą warstwą są silnie zagęszczone. Położenie ilów zdecydowało o przebiegu niwelety tunelu oraz o wyborze jako metody drażnienia tarczy zawieszinowej. Tunel ma 6,6 km długości; w najgłębszym punkcie znajduje się 60 m poniżej lustra wody.

Przekrój poprzeczny składa się z dwóch tuneli o średnicy zewnętrznej 11 m i wewnętrznej 10,10 m. Obudowę wykonano z segmentów żelbetowych o długości 2,0 m i wadze 11 ton każdy. Jeden pierścień obudowy tworzy 7 segmentów typowych i 1 kluczowy. Na brzegu rzeki uruchomiono specjalnie w tym celu wytwórnię i wykonano 52 000 segmentów. Tarcza ma średnicę 11,34 m i długość 11,55 m. Przystosowano ją do pracy pod ciśnieniem 8,5 bara. Całość TBM waży 2000 t i ma 195 m długości. Na budowie tego tunelu pracowały jednocześnie dwie maszyny w odległości 12 m z wyprzedzeniem 100 m jedna w stosunku do drugiej. Prace rozpoczęto w listopadzie 1997 roku, a zakończono w marcu 2003 roku, po 64 miesiącach.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono przykłady tuneli drogowych drażnionych tarczami zawieszinowymi pod rzekami i pod morzami, w trudnych warunkach geologicznych i z ciśnieniem wody działającym na głowicę skrawającą od 5 do 11 barów. Średnice tych maszyn są w przedziale od 11 m do 17,6 m.

Zauważa się dążenie do coraz większych średnic i co za tym idzie lepszego wykorzystania przekroju tunelu, nie tylko do ruchu drogowego, ale i metra. Coraz częściej spotyka się tunele o ruchu na dwóch poziomach. To zwiększa znacznie średnicę TBM, a jednocześnie pozwala na ulokowanie całej trasy w jednym przekroju tunelu. Dzięki temu prace tunelowe odbywają się tylko jednokrotnie od komory startowej do odbiorczej. Pozostaje pytanie o porównanie kosztów takich rozwiązań w stosunku do drażnienia dwóch tuneli równoległych o mniejszej średnicy.

Na tym tle tunele podwodne wykonane w ostatnich latach w Polsce – pod Martwą Wisłą w Gdańsku i obecnie budowany pod Świną w Świnoujściu wpisują się w aktualne wymagania techniczne i technologiczne.

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A.: Rozpoznanie geotechniczne a budowa tuneli za pomocą tarcz zmechanizowanych. Materiały konferencji Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła 2017.
- [2] Huang R.: Overview of Shanghai Yangtze River Tunnel Project. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground – Ng, Huang & Liu (eds) © 2009 Taylor & Francis Group, London. ISBN 978-0-415-48475-6; <https://www.issmge.org/publications/online-library/>
- [3] ITA Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs) Tribune Hors Serie MAI 2001 – ISSN 1267-8422.
- [4] www.herrenknecht.de
- [5] <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/hong-kong-tuen-mun-cheh-lap-kok-link/>
- [6] <https://awards.ita-aifes.org/component/cck/?task=download&file=proceeding&id=1883>
- [7] <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/istanbul-strait-road-tube-crossing/>
- [8] <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/4th-elbe-river-tunnel-hamburg/>
- [9] <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/lefertovo/>
- [10] <https://www.westerscheldetunnel.nl/en/about-the-tunnel/facts-en-figures.htm>