

Budowa tuneli tarczami zmechanizowanymi – bezpieczeństwo robót

ANNA SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA*

Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska

Streszczenie: W artykule opisano podstawowe elementy konstrukcyjne tarczy zmechanizowanej podając terminologię w języku polskim i angielskim. Wyjaśniono cykle pracy tarczy, etapy budowy tunelu i funkcjonowanie tarczy zawieszinowej i tarczy EPB. Podano zasady projektowania segmentowej żelbetowej obudowy tunelu. Omówiono oddziaływanie robót tunelowych na powierzchnię terenu i obiekty sąsiednie. Przedstawiono zagrożenia uwzględniane w analizie ryzyka i mające wpływ na bezpieczeństwo robót tunelowych.

Słowa kluczowe: tunel, TBM, tarcza zawieszinowa, tarcza EPB, niecka osiadania, monitorowanie

1. Wstęp

Budownictwo podziemne, w tym budowa tuneli, to ta dziedzina budownictwa, która jest obciążona największym ryzykiem. Ryzyko technogenne ma kluczowe znaczenie w budownictwie podziemnym, jednak nie można zapominać o innych rodzajach ryzyka, jak ryzyko prawne (związane ze zmieniającym się przepisami prawa) lub ryzyko rynkowe (związane ze zmieniającą się sytuacją rynkową). W nauce o bezpieczeństwie definiuje się pojęcie ryzyka jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia z (awarii/katastrofy) i straty poniesionej w wyniku zajścia zdarzenia z (awarii/katastrofy) [14]. Ryzyko w przeciwieństwie do bezpieczeństwa jest mierzalne, a strata jest ściśle związana z ryzykiem towarzyszącym każdej budowie. Współczesna nauka o bezpieczeństwie bezpośrednio związana jest z zagadnieniami oceny i analizy ryzyka, a część danych o sytuacji ma charakter losowy [14]. W przypadku budowy tunelu to np. warunki gruntowe i geologiczne zawsze oceniane z pewnym prawdopodobieństwem; występowanie wód podziemnych, tektonika skał, parametry geotechniczne, błędy technologiczne, wykonawcze a także wybór właściwej metody realizacji inwestycji.

Tunele buduje się (lub drąży) wieloma metodami [2, 10]. Najogólniej można te metody usystematyzować w trzy podstawowe grupy: metody klasyczne (górnictwe), które swój początek wywodzą z XIX wieku i technik stosowanych w górnictwie; metody odkrywkowe, dynamicznie rozwijające się w XX wieku, a polegające na budowie tunelu w głębokim wykopie oraz metody specjalne. Do tych ostatnich zalicza się metodę tarczową (również powstała w XIX wieku), metodę zatapiania i opuszczania gotowych elementów, stosowane do budowy tuneli podwodnych oraz metody polegające na wzmacnianiu/uszczelnianiu podłoża (oponowaniu wody gruntowej) i wykorzystanie którejs z wymienionych wyżej metod. Patrząc

*Autor do korespondencji: a.lewandowska@il.pw.edu.pl

na duże inwestycje tunelowe z ostatnich lat (tunele transalpejskie, podmorskie, nowe linie tranzytowe metra) widać wyraźnie dominację dwóch metod ich budowy:

- metody tarczowej – tarczy zmechanizowanej czyli Tunnel Boring Machine oraz
- metody klasycznej, górniczej nazywanej Nową Metodę Austriacką NATM (*New Austrian Tunnelling Method*) lub metodą konwencjonalną wg ITA (*International Tunnelling and Underground Space Association*) i jej odmiany ADECO RS.

Metody odkrywkowe, oprócz budowy tuneli miejskich i systemów metra, pojawiają się w tych inwestycjach jako roboty wstępne lub uzupełniające, chociaż równie ważne jak np. budowa szybów startowych i odbiorczych tarczy TBM. Podobnie jest i w Polsce. Na opublikowanym przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad planie modernizacji dróg ekspresowych w Polsce widnieje szereg tuneli drogowych wykonanych metodą tarczową (TBM) – pod Martwą Wisłą w Gdańsku oddany do eksploatacji w 2016 r, budowany – pod Świną w Świnoujściu, planowany na Via Carpathia S19 Reszów – Babica oraz konwencjonalną – NATM (S1 Szare Laliki; S1 Węgierska Górka; S3 Bolków – Kamienna Góra; S7 Zakopianka).

Dynamiczny rozwój krajowych aglomeracji miejskich (Warszawa, Wrocław, Kraków, Łódź, Trójmiasto) powoduje coraz większe zapotrzebowanie na szybki transport miejski, rozbudowaną i nowoczesną infrastrukturę techniczną oraz trasy komunikacyjne o dużej przepustowości. W Warszawie powstaje II linia metra, pierwszą linię metra planuje się również w Krakowie, Łódź po wybudowaniu podziemnego dworca Łódź Fabryczna i tuneli łączących tę stację z pozostałymi dwoma (Łódź Kaliska i Łódź Żabieniec) stanie się ważnym, krajowym węzłem Kolei Dużych Prędkości. We Wrocławiu powstaje Studium Wykonalności budowy sieci metra. Coraz częściej kolektory kanalizacyjne (np. tunel do oczyszczalni Czajka pod Wisłą w Warszawie, Kolektor Wiślany), sieci ciepłownicze i wodociągowe są prowadzone w tunelach. Wszystkie te obiekty budowane są z wykorzystaniem metody tarczowej czyli tarcz zmechanizowanych TBM.

W Polsce TBM jest to technologia stosunkowo nowa w aspekcie projektowania tego typu tuneli, bezpieczeństwa robót i bezpieczeństwa obiektów sąsiednich oraz oceny oddziaływania robót tunelowych na powierzchnię terenu i środowisko. Na świecie panuje przekonanie, że jest to jedna z najbezpieczniejszych metod budowy tuneli, szczególnie w przypadku powszechnie stosowanych tarcz zamkniętych typu zawieszinowa (*Slurry Shield*) i wyrównywanych ciśnien gruntowych (*EPB Shield*). Coraz dłuższe tunele, większe średnice maszyn (do 17,63 m), coraz głębsze tunele podwodne (do 11 barów ciśnienia wody) zrealizowane z powodzeniem w ostatnich latach świadczą o skuteczności tej metody.

W dalszej części artykułu zostanie omówiona konstrukcja tarczy zmechanizowanej, zasada działania obydwu rodzajów wyżej wymienionych maszyn oraz te elementy technologiczne, etapy drażenia i działania, które decydują o bezpieczeństwie ludzi, tunelu i obiektów na powierzchni terenu.

2. Konstrukcja tarczy zmechanizowanej i zasada jej działania

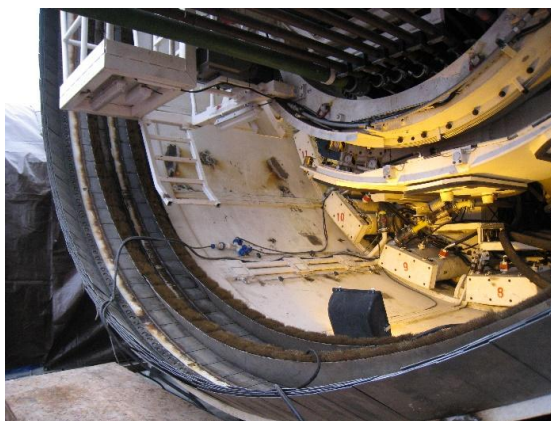
Konstrukcja tarczy została omówiona w wielu publikacjach [3, 4, 18]. Dla przypomnienia poniżej opisano jej główne elementy konstrukcyjne.

Powłoka tarczy – jest to stalowy walec o grubości od kilkunastu do kilkudziesięciu milimetrów i o długości równej około 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 cm 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. Tarczę – głowicę skrawająca i powłokę pokazano na rys. 1. Szczególnie istotna jest część tylna

powłoki nazywana ogonem tarczy (*tail skin*). Jej właściwe uszczelnienie odpowiednio zamontowanymi szczotkami ułożonymi w kilku rzędach i posmarowanych smarem zabezpiecza przed napływem do tarczy gruntu lub wody gruntowej oraz iniektu podczas prowadzenia iniekcji uszczelniającej pustkę za obudową tunelu. Szczotki i ogon tarczy pokazano na rys. 2.



Rys. 1. Tarcza – widoczna głowica skrawająca i powłoka tarczy [fot. autor].



Rys. 2. Ogon tarczy i szczotki uszczelniające, w głębi erektor i stopy tłoków lewarów [fot. autor].

Głowica skrawająca (*cutter head/cutter wheel*) – 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 a nawet 5500 kW. Głowica wykonuje (w zależności od średnicy) od 1 do 3 obrotów na minutę. Moment obrotowy głowicy przeciętnie jest zawarty w przedziale od 23 000 do 37 000 kNm. Średnice głowic skrawających wahają się od kilku do kilkunastu metrów. Przy średnicach w przedziale od 0,8 do 4,8 m mówi się o mikrotunelowaniu. Średnice od 5,5 do 6,5 m to tunele metra jednotorowe; średnice od 7 do 8,5 m to tunele metra dwutorowe, tunele kolejowe jednotorowe; średnice powyżej 12 m odpowiadają tunelom kolejowym dwutorowym, tunelom drogowym od dwóch pasach ruchu; największe obecnie średnice maszyn powyżej 15 m są w przypadku tuneli drogowych od dwóch poziomach ruchu lub tuneli drogowo-kolejowych. Największa obecnie tarcza zawieszinowa ma średnicę 17,63 m, a tarcza typu EPB – 17,48 m. Układ narzędzi skrawających, powierzchnia otworów oraz inne

elementy głowicy są projektowane dokładnie do spodziewanych warunków geotechnicznych, urabianych gruntów lub skały [16]. Na rys 3. pokazano głowicę skrawającą tarczy EPB.



Rys. 3. Głowica skrawająca tarczy typu EPB, średnica 12 m, za nią zaplecze (pociąg) [fot. autor].

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 jest bezpośredni kontakt z wodą gruntową na przodku jest jednym z elementów gwarantujących bezpieczeństwo prac w tarczach zmechanizowanych. W przegrodach zainstalowane są śluzy umożliwiające wejście obsługi do komory roboczej, przewody dostarczające zawieszinę, sprężone powietrze oraz urządzenia do ewakuacji urobku.

Lewary/dźwigniki/siłowniki hydrauliczne (*hydraulic jacks/ thrust cylinders*) spełniają podwójną rolę – 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 opierającą się o już wykonaną obudowę tunelu; tę sytuację pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Tłoki lewarów hydraulicznych oparte o wykonany pierścień obudowy tunelu [fot. autor].

Erektor (*erector*) – dźwig próżniowy do montażu żelbetowych segmentów (*tunnel segmental lining*) tworzących kolejne pierścienie obudowy tunelu (rys. 5).



Rys. 5. Erektor – dźwig próżniowy do montażu żelbetowych segmentów obudowy tunelu [fot. autor].

Przenośnik ślimakowy (*screw conveyor*) – 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 ślimaczniczy) zależy od różnicy ciśnień między komorą roboczą a wnętrzem tarczy i wynosi czasami kilkanaście metrów. Widok wewnętrznej ślimaczniczy przygotowanej do montażu przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Widok ślimaczniczy przed zamontowaniem w przenośniku ślimakowym [fot. autor].

Urządzenia do przeprowadzenia iniekcji uszczelniającej pustkę za obudową segmentową (*grouting equipmet to fill the voids behind the segments/ backfilling*).

Za tarczą instalowane jest zaplecze tzw. pociąg (*back-up train*) składający się z kilku części, gdzie umieszczono wszystkie niezbędne urządzenia do prowadzenia robót tunelowych i budowy tunelu, w tym urządzenia do transportu żelbetowych segmentów obudowy tunelu do tarczy oraz do wyprowadzania urobku na powierzchnię. Długość zaplecza waha się od kilkudziesięciu do nawet 190 m w przypadku tarczy drążącej tunele w skałach (tzw. *gripper*).

Terminem TBM określa się całość – tarczę i zaplecze. Po przejściu TBM tunel jest gotowy do dalszych prac konstrukcyjnych – wznoszenia płyty jezdni lub podtorza, kanałów wentylacyjnych, pomieszczeń na infrastrukturę techniczną oraz do robót związanych z wykonaniem przejść awaryjnych.

Budowę tunelu tarczą rozpoczyna się od wykonania komory startowej, w której po wykonaniu płyty fundamentowej formuje się tzw. kołyskę czyli miejsce gdzie zostanie opuszczona lub zmontowana maszyna. Przy mniejszych średnicach (do około 7 m) tarcza, która dostarczana jest na plac budowy w częściach, jest montowana w sąsiedztwie komory i następnie w całości opuszczana na dno (rys. 7).



Rys. 7. Opuszczanie tarczy na dno komory startowej – metro warszawskie [fot. autor].

Większe maszyny są montowane w komorze, oprócz głowicy skrawającej, której główny element jest opuszczany w całości. W przypadku budowy metra szybami startowymi oraz odbiorczymi są stacje, co wymusza dotrzymanie harmonogramu robót tak, aby kolejne stacje były gotowe na przyjęcie maszyny i przeprowadzenie jej do miejsca rozpoczęcia drążenia następnego tunelu szlakowego. W tunelach drogowych czy kolejowych komory startowa i odbiorcza to odrębne obiekty, wykonywane w obudowie ze ścian szczelinowych. W miejscu przejścia maszyny przez ścianę szczelinową wykonuje się na niej tzw. okular z odpowiednim uszczelnieniem, a zbrojenie jest z włókna szklanego (rys. 8). Aby tarcza rozpoczęła drążenie i budowę tunelu należy w komorze startowej wykonać konstrukcję oporową, od której odpychają się tłoki lewarów, przesuając tarczę w grunt; potem montuje się w komorze startowej kilka pierścieni obudowy i rozpoczyna właściwe drążenie i budowę tunelu.

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 (1 do 2 m w zależności od szerokości pojedynczego segmentu) 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 tworzące kolejne pierścienie obudowy tunelu. Po zmontowaniu pierścienia przeprowadza się iniekcję z zaczynu cementowego uszczelniającą pustkę, która powstaje między gruntem a obudową tunelu. Pustka jest wynikiem stożkowatego kształtu powłoki tarczy oraz grubości jej powłoki pod którą jest montowana obudowa.

Tunele budowane tarczą mają charakterystyczną obudowę – tworzą ją kolejne pierścienie na które składa się od 6 do nawet 10 żelbetowych segmentów (w zależności od średnicy tunelu). O segmentach szerzej w dalszej części artykułu.



Rys. 8. Okular na ścianie szczelinowej komory startowej w miejscu, w którym przejdzie tarcza [fot. autor].

Podczas każdego cyklu pracy TBM kluczowym jest zachowanie stateczności przodka tzn. zrównoważenia parcia gruntu i wody gruntowej na głowicę skrawającą ciśnieniem bądź zawiesziny ilowej, wspomaganym sprężonym powietrzem (tarcze zawieszinowe), bądź parciem gruntu z plastyfikatorem w komorze roboczej (tarcza EPB).

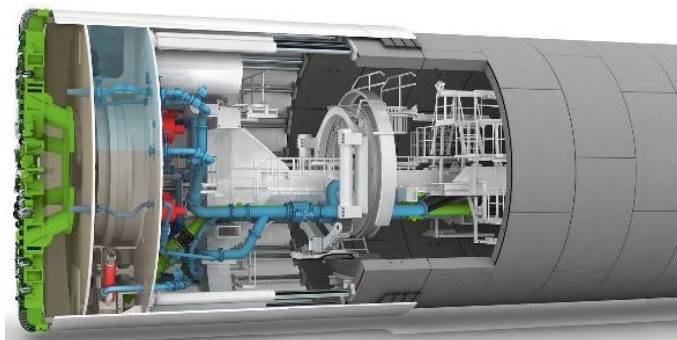
3. Zasada działania tarczy zawieszinowej (*Slurry Shield*) i tarczy wyrównywanych ciśnień gruntowych (EPB)

Obydwa rodzaje maszyn są bardzo szczegółowo opisane w literaturze zagranicznej [4, 15], [16, 21] i krajowej [3, 8, 9]. W niniejszym artykule podano ogólne zasady utrzymywania stateczności przodka w każdym z dwóch rodzajów TBM i w konsekwencji oddziaływania na powierzchnię terenu.

Tarcza zawieszinowa

W Polsce często można spotkać potocznie stosowany termin „tarcza płuczkowa” lub Mixshield. Ten drugi odpowiada niemieckiej terminologii i w dokumentach oraz normatywach tak ta tarcza jest w Niemczech określana (lub SM-V4 wg klasyfikacji DAUB). Natomiast pierwszy z terminów nie jest do końca słuszny, gdyż z wiertnictwa znane są różne rodzaje płuczki, a chodzi dokładnie o zawieszinę ilową (bentonitową). Dlatego w polskich publikacjach zaleca się stosowanie określenia „tarcza zawieszinowa”.

Schemat konstrukcyjny tarczy zawieszinowej pokazano na rys. 9. Zasadą działania tego rodzaju tarcz jest zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej na przodku za pośrednictwem przeciwnie skierowanego ciśnienia zawiesziny bentonitowej. Zawieszina będąca pod ciśnieniem infiltruje w pory urabianego gruntu na pewną odległość, wypełnia je blaszkami łu, zmniejszając przepuszczalność gruntu, nadając mu spójność i poprawiając tym samym jego samostateczność. Jednocześnie osadzając cząstki łu na powierzchni przodka wytwarza cienką błonkę, przez którą wywiera stabilizujące ciśnienie na przodek, równoważące wcześniej wspomniane zewnętrzne parcie gruntu i ciśnienie wody gruntowej.

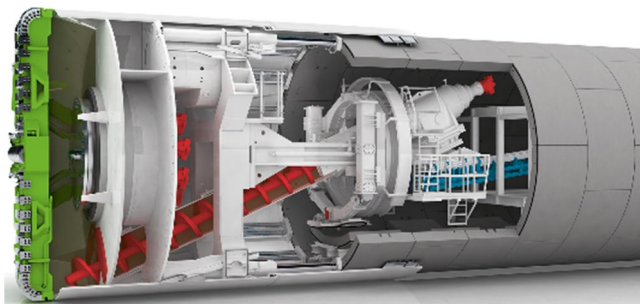


Rys. 9. Schemat tarczy zawieszinowej <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/mixshield/>.

Jest to tarcza typu zamkniętego tzn. przodek jest całkowicie oddzielony od pozostałej części tarczy szczelną i masywną przegrodą (ścianą kontaktową). Część przednia stanowi komorę roboczą. Tu odbywa się urabianie gruntu pełnym przekrojem. Komora robocza wypełniona jest zawiesiną bentonitową o właściwościach tiksotropowych. Wymagane ciśnienie zawiesiny uzyskuje się za pośrednictwem poduszki sprężonego powietrza, która wytwarza się w części komory roboczej usytuowanej pomiędzy ścianką ciśnieniową a ścianką kontaktową, widoczną na rys.10. Zawiesina ilowa jest doprowadzana do komory roboczej systemem rur i dysz (niebieski kolor na schemacie), a następnie po wymieszaniu z urobkiem odpompowywana systemem pomp i rurociągów (kolor zielony rur na schemacie) na powierzchnię terenu do zakładu separacji urobku i regeneracji zawiesiny. Tarcze zawieszinowe najczęściej stosuje się do drażenia tuneli w gruntach niespoistych – w piaskach i żwirach oraz w gruntach niejednorodnych, nawet w słabych spękanych skałach, z dużym ciśnieniem wody gruntowej. Dlatego wykorzystywane są do drażenia tuneli podwodnych (pomorskich lub pod rzekami). Obecnie stosowane średnice tych tarcz są w przedziale od 3,7 do 17,63 m. Polskie tarcze zawieszinowe to 5,5 m (tunel przesyłowy pod Wisłą do Czajki), 12,56 m (Gdańsk) i 13,46 m (Świnoujście). Przy tak dużych średnicach różnica ciśnień na wysokości przekroju głowicy sięga 1,5 bara, co sprawia, że utrzymanie stateczności przodka jest bardzo precyzyjną operacją i wymaga stałej kontroli parametrów zawiesiny, objętości odprowadzanego urobku i utrzymania właściwego ciśnienia w komorze roboczej. Z danych producentów tarcz wynika, że tarcza zawieszinowa lepiej reaguje na zmienne ciśnienie gruntu i wody niż maszyna typu EPB.

Tarcza wyrównywania ciśnień gruntowych (*Earth Pressure Balance*) – EPB lub SM-V5 wg klasyfikacji DAUB

Schemat konstrukcyjny przedstawia rys. 10. 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 osadzony jest przenośnik ślimakowy z cylindryczną, szczelną obudową (kolor czerwony na schemacie). Za pomocą tego przenośnika urobiony grunt jest usuwany z komory roboczej i ewakuowany z tunelu taśmociągami. Podczas pracy tarczy EPB parcie gruntu w komorze roboczej jest utrzymywane na wymaganym poziomie przez automatyczne kontrolowanie warunków drażenia tzn. prędkości posuwania się tarczy oraz sił nacisku dźwigników hydraulicznych, prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego głowicy i przenośnika ślimakowego. W celu zapewnienia stateczności przodka najważniejsze jest zachowanie równowagi pomiędzy objętością gruntu urobionego i usuniętego z komory roboczej.



Rys. 10. Schemat tarczy wyrównywanych ciśnień gruntowych EPB <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/>.

Tarcze wyrównywanych ciśnień gruntowych najlepiej przystosowane są do drążenia tuneli w gruntach spoistych, o mniejszej przepuszczalności dla wody i bardziej jednorodnych. W tarczy EPB konieczne jest stosowanie dodatków czyli tzw. 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.

Obecnie stosowane średnice tarcz EPB wynoszą od 1,7 do 17,63 m (Hong Kong). Polskie tarcze EPB to 6,3 m (II linia metra w Warszawie), 8,82 m (Łódź – tunel jednotorowy) i 13,04 m (Łódź – tunel dwutorowy) oraz 15,40 m (planowany tunel drogowy na S19).

4. Obudowa tunelu budowanego tarczą

Projektując tunel budowany tarczą należy spełnić kilka warunków, z których najważniejszy to kołowy kształt przekroju poprzecznego i wynikająca z tego segmentowa żelbetowa obudowa tworząca kolejne pierścienie (*rings*). Pozostałe warunki dotyczą układu niwelety i dopuszczalnego promienia poziomego łuku nie mniejszego niż 300 m; nadkładu gruntu na stropem równego co najmniej jednej średnicy maszyny TBM, długości tunelu (pożądana powyżej 1 km) oraz w miarę jednorodnych warunków geotechnicznych na wysokości przekroju głowicy skrawającej.

Metoda tarczowa budowy tuneli ma prawie 200 lat; po raz pierwszy zastosował tarczę angielski inżynier Marc Brunel do budowy tunelu pod Tamizą w 1826 r. Przez pierwsze dziesięciolecia obudowę tworzyły żeliwne tubingi, skręcane na śruby i uszczelniane drutem ołowianym. Współczesne segmenty produkowane są w specjalnie do tego celu uruchomionej wytwórni, w formach o podwyższonych wymaganiach odnośnie geometrii i tolerancji wymiarów. Równie wysokie są wymagania dotyczące szczelności betonu i procesu pielęgnacji. Wg wytycznych ITA [13] projektowanie segmentowej żelbetowej obudowy tunelu drążonego tarczą przebiega w następujących etapach (stan STR, GEO, UPL oraz SGN i SGU):

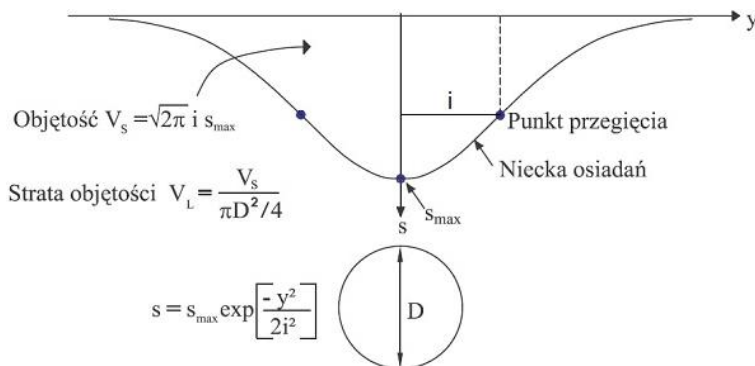
- projekt wstępny jednego pierścienia obudowy – geometria odpowiadająca skrajni ruchu oraz układowi trasy w pionie i w poziomie – promienie łuków,
- obliczenia konstrukcyjne – wybór przekrojów obliczeniowych ze względu na warunki geotechniczne i inne obciążenia – model MES – wyznaczenie obciążeń/oddziaływań,
- obliczenia pojedynczego pierścienia pod obciążeniem siłą osiową i momentem zginającym,
- sprawdzenie złączy promieniowych,

- obliczenia konstrukcyjne dla etapu produkcji segmentu czyli: rozformowanie segmentów, składowanie na czas krótki, składowanie długoterminowe, transport, montaż w obudowie tunelu, ciśnienie od iniekcji uszczelniającej pustkę.
- obliczenia konstrukcyjne dla tymczasowych warunków obciążenia czyli od: siły nacisku siłowników maszyny TBM, ciśnienia iniekcji uszczelniającej w ogonie tarczy, ciśnienia iniekcji wtórnej oraz obliczenia łączników, uszczelki, śrub.
- warunki wyjątkowe dla obudowy – odporność ogniowa, sprawdzenie stateczności na wypór oraz dla zalecanych przekrojów krytycznych.

Układ segmentów w kolejnych pierścieniach (położenie styków oraz segmentu zamykającego – kluczowego) jest dokładnie zaprojektowany tak, aby nie dopuścić do osłabienia przekroju tunelu. Zarówno pierścienie jak i segmenty mają swoją numerację i wg niej są instalowane. Każdy segment wyposażony jest w uszczelki, pręty prowadzące, otwory na dyble i śruby oraz wnękę dla erektora. W konstrukcji obudowy segmentowej stosuje się beton klasy C40/50, zbrojenie B500 (klasa B lub C). Coraz częściej (na świecie od ponad 25 lat [20]) klasyczne zbrojenie zastępuje się stalowym zbrojeniem rozproszonym SFRC [11, 12] – w Polsce po raz pierwszy na budowie tunelu pod Świną.

5. Oddziaływanie prac tarczą na powierzchnię terenu

Jednym z głównych oddziaływań prac związanych z drążeniem tuneli z zastosowaniem tarcz zmechanizowanych są deformacje powstające na powierzchni terenu, które zagrażają infrastrukturze naziemnej a w skrajnych przypadkach mogą prowadzić do katastrofy budowlanej [5, 6, 17]. Dlatego dąży się do minimalizacji ingerencji w naturalny układ naprężeń w ośrodku gruntowym poprzez działania technologiczne (poprawa systemu podparcia przodka tarczy, wyprzedzające reagowanie na zmiany parcia gruntu przed tarczą, właściwe sterowanie pochodu tarczy) oraz działania prewencyjne koncentrujące się na prognozie przemieszczeń podłoża i osiadania powierzchni terenu nad tunelem drążonym tarczą w aspekcie warunków geologicznych i geotechnicznych na trasie tunelu. Powstająca niecka w przekroju poprzecznym ma kształt krzywej Gaussa, jej równanie i wykres pokazano na rys. 11 [6, 8]. Oprócz niecki poprzecznej powstaje niecka wzdłuż drążonego tunelu na którą składają się osiadania nad głowicą i ogonem tarczy oraz obudową tunelu – krótkoterminowe oraz długoterminowe wynikające ze zjawisk reologicznych w gruncie.



Rys. 11. Wykres niecki osiadania powstającej nad tunelem drążonym tarczą [6].

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) [5, 7]. W każdej z tych metod pojawia się element prawidłowej oceny warunków geologicznych, wartości parametrów geotechnicznych [1, 9, 19] oraz czynnik technologiczny wynikający z typu maszyny TBM zastosowanej w konkretnym realizowanym przypadku [15]. Na etapie projektu budowlanego i opracowania opinii środowiskowej prognoza głębokości i zasięgu niecki osiadania jest istotnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa obiektów położonych bezpośrednio nad drążonym tunelem i strefie oddziaływania robót tunelowych [22]. Uzupełnieniem tych dokumentów 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.

6. Podsumowanie

Omówione w artykule wybrane aspekty budowy tunelu tarczą zmechanizowaną układają się w łańcuch faktów i zdarzeń gwarantujący bezpieczeństwo robót. Uwzględnia się je w analizie ryzyka [14], budując macierz ryzyka i definiując ilość możliwych do wystąpienia zagrożeń wraz z ich wagą. Za najistotniejsze elementy zapewnienia bezpieczeństwa prac można uznać:

- właściwe rozpoznanie warunków geologicznych, co pozwoli na dobór odpowiedniego typu maszyny i jej zaprojektowanie, uniknięcie nieoczekiwanych zmian gruntów/skał w przekroju głowicy skrawającej, odpowiednią prognozę wartości momentu obrotowego głowicy, zużycia narzędzi skrawających, zaplanowanie ich wymiany i przestojów (interwencji), które na ogół wiążą się z większymi osiadaniem na powierzchni terenu,
- rozpoznanie możliwości wystąpienia zabytków archeologicznych, pozostałości wojennych,
- badania geotechniczne i ocenę parametrów mechanicznych i fizycznych niezbędnych w projektowaniu, ocenę wartości parcia gruntu i wody na głowicę – dobór ciśnienia w komorze roboczej, siły w dźwignikach hydraulicznych, zapewnienie stateczności przodka,
- w przypadku wysokiego poziomu wody gruntowej uszczelnienie strefy wyjścia maszyny z komory startowej iniekcją strumieniową (jet-grouting), uszczelnienie okularu i właściwe zaprojektowanie komory odbiorczej,
- stałą kontrolę uszczelnienia ogona tarczy (szczotek), niedopuszczenie do napływu wody, gruntu, iniektu do wnętrza maszyny co może skutkować dodatkowymi osiadaniem na powierzchni terenu,
- właściwe zaprojektowanie i stałą kontrolę jakości uszczelek i łączników zapewniających szczelność obudowy tunelu,
- kontrolę jakości wykonania segmentów obudowy, badania mieszanki betonowej,
- stały monitoring osiadania powierzchni terenu, poletka doświadczalne aby ocenić skuteczność i jakość prowadzenia maszyny,
- posiadanie profesjonalnej ekipy prowadzącej TBM – od ich doświadczenia zależy wiele elementów pracy tarczy i oddziaływania na otoczenie,
- i wiele innych, które trudno tu wszystkie wymienić z uwagi na specyfikę metody.

Jak napisano na wstępie wiele realizacji z ostatnich lat, długich, głębokich, budowanych w trudnych warunkach geotechnicznych tuneli świadczy o skuteczności metody tarczowej i gwarancji bezpieczeństwa robót tunelowych. A jednak czasami zdarzają się katastrofy, czego przykładem budowa linii nr 6 metra w Sao Paulo, gdzie 1 lutego br. doszło do awarii podczas drążenia tuneli tarczami EPB.

Literatura

1. Bogusz W., Godlewski T., Siemińska-Lewandowska A. Parameters used for prediction of settlement trough due to TBM tunnelling, *Archives of Civil Engineering*, vol. 67, nr 4, 2021, s. 351–367.
2. Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A., O rozwoju budownictwa podziemnego w XX i XXI wieku, *Inżynieria i Budownictwo*, vol. 74, nr 7/8, 2018, s. 383–389.
3. Grodecki W. *Technologia tarcz zmechanizowanych. Część I. Materiały seminarium na prawach rękopisu. Metro Warszawskie. Warszawa 2006.*
4. Guglielmetti V. *et al*, *Mechanized Tunnelling in Urban Areas. Design Methodology and Construction Control.* Taylor & Francis/Balkema 2008.
5. Kuszyk R., Siemińska-Lewandowska A., Subsidence trough asymmetry calculations in twin tube TBM tunnelling, *Archives of Civil Engineering*, 2021, vol. 67, nr 2, s. 675–689.
6. 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.*
7. Siemińska-Lewandowska Anna, Kuszyk Rafał : The study of subsiding trough expansion over twin tube TBM metro tunnel, *Archives of Civil Engineering*, 2018, vol. 64, nr 4, s. 119–133.
8. Siemińska-Lewandowska A., Kuszyk R. „Wpływ drażenia tuneli tarczą zmechanizowaną TBM na osiadania powierzchni terenu oraz budynki.” WPPK 2013.
9. Siemińska-Lewandowska A., Grodecki W. Rozpoznanie geotechniczne a budowa tuneli za pomocą tarcz zmechanizowanych, WPPK 2017.
10. Siemińska-Lewandowska A., Budowa tuneli w aglomeracjach miejskich, *Przegląd Budowlany*, 2017, vol. 88, nr 11, s. 6–10
11. *Guidance for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments – Vol. 1 Design Aspects*, ITAtech Report N° 7/ April 2016.
12. *Guideline For Good Practice of Fibre Reinforced Precast Segments – Vol 2. Production Aspects*, ITAtech Report N° 9/ March 2018.
13. *Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining*, Working Group No. 2, International Tunnelling Association, *Tunnelling and Underground Space Technology 2000*, Vol. 15, No. 3, s. 303–331.
14. *Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2, Tunnelling and Underground Space Technology 2004*, No 19 s. 217–237.
15. *Recommendation for selecting and evaluating tunnel boring machines*, *Tunnel 1997*, No 5, s. 20–35.
16. *Recommendation for Design and Operation of Shield Machines*, *Tunnel 2000*, No 6, s. 54–75.
17. *Settlements induced by tunneling in Soft Ground*, ITA/AITES Report 2006, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, No 22 s. 119–149.
18. *Standards / Manuals of Mechanized Tunnelling*, WG 14 – Mechanized Tunnelling, March 2007.
19. *Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects*, ITA Working Group 2 – Research, ITA Report may 2015, www.ita-aites.org.
20. *Twenty Years of FRC Tunnel Segments Practice: Lessons Learnt and Proposed design Principles*, ITA WG2 Report N° 16/2016
21. www.herrenknecht.de
22. *Wymagania techniczne dla inwestycji projektowanych i realizowanych, mogących oddziaływać na obiekty metra*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2014.

Tunnel construction with tunnel boring machines – safety at work

Key words: tunnel, TBM, slurry TBM, EPB, subsidence basin, monitoring