

# Budowa tuneli w aglomeracjach miejskich

Prof. dr hab. inż. Anna Lewandowska, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Wykorzystanie miejskiej przestrzeni podziemnej na potrzeby infrastruktury komunikacyjnej jest koniecznością, wobec której stają obecnie większe polskie miasta, takie jak Warszawa, Wrocław, Trójmiasto, Kraków, Łódź czy aglomeracja śląska. Na świecie od ponad stu lat buduje się tunele metra, z których najstarsze to tunele w Londynie (1863) i Budapeszcie (1896). Wiek XX to dynamiczny rozwój komunikacji samochodowej i narastający problem „zakorkowania” miast intensywnym ruchem drogowym. Stąd idea budowy podziemnych arterii drogowych (tunele o trzech, a nawet czterech pasach ruchu, czasami wielopoziomowe) służących sprowadzeniu samochodów pod ziemię, uwolnieniu powierzchni terenu z wykorzystaniem jej na cele rekreacji czy zrównoważonego rozwoju. Budowa tuneli drogowych w aglomeracjach miejskich jest również jednym z elementów poprawy płynności i przepustowości tras szybkiego ruchu. Natomiast tunele kolejowe służą ruchowi tranzytowemu, który odbywa się pod ziemią, bez zakłócania wrażliwej tkanki miasta.

Szerzej o konieczności wykorzystania przestrzeni podziemnej w miastach można przeczytać na stronie [www.ita-aites.org/itacus](http://www.ita-aites.org/itacus) [1].

W miastach położonych nad dużymi rzekami częstym rozwiązaniem jest budowa tras szybkiego ruchu w tunelach biegnących wzdłuż rzeki. Najbliższym nam przykładem jest tunel Wistostrady w Warszawie; z miast europejskich – tranzytowe arterie drogowie – w Paryżu, Wiedniu czy w Niemczech (Düsseldorf, Kolonia). Równie

często zamiast przepraw mostowych buduje się tunele drogowe (lub metra czy kolejowe) pod rzekami. Przykładów tego typu rozwiązań na całym świecie są tysiące – u nas w Polsce – tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku (pierwszy tunel drogowy pod rzeką), tunele metra w Warszawie i planowana przeprawa w Świnoujściu. W zależności od warunków geologicznych i geotechnicznych, położenia i ukształtowania niwelety trasy oraz istniejącej na powierzchni terenu zabudowy tunele w miastach buduje się w głębokich wykopach z wykorzystaniem metod odkrywkowych, drąży tarczami zmechanizowanymi lub wykonuje w sposób konwencjonalny (Nowa Metoda Austriacka, metoda sekwencyjna). Wybór metody zależy od wielu czynników technicznych, ekonomicznych, a także uwzględnia się aspekty socjologiczne i społeczne.

## 2. Metody budowy tuneli w miastach

Ze względu na fakt, że w większości polskich miast warunki geotechniczne odpowiadają geologicznie formacjom czwarto- i trzeciorzędowym z wysokim poziomem wód gruntowych, tunele w aglomeracjach miejskich na ogół buduje się w gruntach, a nie w skałach (być może z wyjątkiem Krakowa).

Do najbardziej rozpowszechnionych i najczęściej stosowanych metod budowy tuneli w gruntach należą wspomniane powyżej:

- metody odkrywkowe, tzn.:
  - klasyczna metoda metra mediolańskiego – w Polsce przyjęły się odpowiednio nazwy – „metoda stropowa” i „metoda ścian szczelinowych”,
  - metoda berlińska,
- metody tarczowe – drążenie tarczą zmechanizowaną tzw. TBM (*Tunnel Boring Machines*). Do najczęściej stosowanych typów tarcz należą:
- tarcza zawieszinowa – SS (*Slurry Shield*),
  - tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych – EPB (*Earth Pressure Balance*).

Klasyczna metoda metra mediolańskiego (stropowa) została szczegółowo opisana w publikacji [2], a polega ona na:

- wykonaniu konstrukcji ścian szczelinowych z powierzchni terenu lub z dna wstępnego wykopu, stanowiących najczęściej ściany przyszłego tunelu,
- wybraniu gruntu z pomiędzy tych ścian do poziomu nieco poniżej przyszłego stropu tunelu,
- wykonaniu na odpowiednio przygotowanym podłożu, na gruncie, konstrukcji stropu tunelu,
- zasypaniu stropu tunelu z dobrym zagęszczeniem za-



**Rys. 1.** Wykorzystanie przestrzeni podziemnej w mieście wg wizji z 1925 r. [1]



**Rys. 2.** Zagospodarowanie części podziemnej miasta dla celów komunikacji i infrastruktury technicznej – prognoza na rok 2030 [1]

syпки i zagospodarowaniu powierzchni terenu zgodnie z projektem, w tym przywróceniu np. funkcji komunikacyjnej,

- wybraniu gruntu spod stropu tunelu do poziomu około 30–50 cm poniżej przyszłej płyty dennej,
- wykonaniu płyty dennej.

W przypadku budowy tą metodą stacji metra o wielu kondygnacjach podziemnych wybieraniu gruntu spod stropu może towarzyszyć albo wykonywanie kolejnych stropów niższych kondygnacji, albo kotwienie lub rozpięcie ścian szczelinowych

Metodą berlińską, zastosowaną w latach 30. ubiegłego wieku na budowie metra w Berlinie, buduje się całą konstrukcję tunelu w otwartym, głębokim wykopie. Konstrukcję oporową zabezpieczającą pionowe ściany wykopu pełni tzw. ścianka berlińska. Składa się ona z wprowadzonych do gruntu słupów stalowych (dwuteowych, ceowych) w rozstawie na ogół nie przekraczającym 2,5 m, licząc wzdłuż osi przyszłego tunelu. W kolejnej fazie pogłębia się wykop pomiędzy nimi i sukcesywnie zakłada tzw. opinkę (poszycie) – drewnianą, niekiedy żelbetową lub stalową. Aby pod wpływem poziomego parcia gruntu nie dochodziło do nadmiernych deformacji ścianek (pali) – rozpięta się je lub kotwi. Dopiero po osiągnięciu planowego poziomu dna wykopu następuje wykonanie konstrukcji tunelu a następnie jego zasypanie. Dokładny opis metody można znaleźć w [2].

W metodach odkrywkowych najwięcej problemów stwarza wysoki poziom wód gruntowych, stabilizujących się powyżej dna wykopu w gruntach przepuszczalnych – pozbawionych spójności. Opanowanie wody gruntowej jest możliwe przez obniżenie poziomu wód gruntowych przez ich pompowanie ze studni depresyjnych. Przy większych zagłębieniach budowlą wymagana depresja może być bardzo znaczna, co wydłuży czas kosztownego pompowania oraz, co jest równie ważne, może powodować osiadanie sąsiadujących z budową obiektów, znajdujących się w zasięgu leja depresyjnego. W przypadku budowy głębokiego wykopu w obudowie ze ścian szczelinowych wydłuża się je tak, by zostały zakotwione w gruntach nieprzepuszczalnych lub wykonuje się szczelną przegrodę przeciwfiltracyjną, która zapobiegnie wpływaniu wód gruntowych do dna wykopu. Przegrodę tę wykonuje się za pomocą technologii iniekcji wysokociśnieniowej tzw. jet grouting w gruntach o mniejszej przepuszczalności lub iniekcji niskociśnieniowej w gruntach bardziej przepuszczalnych.

Jak widać, stosowanie odkrywkowych metod budowy tuneli wymaga długotrwałego zajęcia powierzchni terenu – dłuższego w przypadku metody berlińskiej i znacznie krótszego przy stosowaniu ścian szczelinowych i metody stropowej. Dlatego trudno sobie wyobrazić, by w obecnym stanie zagęszczonego ruchu samochodowego w dużych miastach możliwe było wyłączenie z niego głównych arterii, czy choćby znaczne ograniczenie ich przepustowości. Między innymi i z tego powodu tunele międzystacyjne metra oraz tranzytowe tunele drogo-

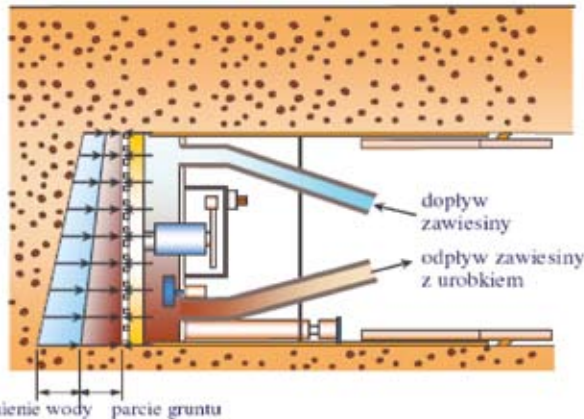
we czy kolejowe nie powinny być budowane metodami odkrywkowymi. Nie jest też możliwe zastosowanie do budowy tych tuneli metod klasycznych ze względu na ich powolność i wysokie koszty. W tej sytuacji racjonalnym sposobem budowy tuneli na terenach aglomeracji miejskich jest zastosowanie tarcz zmechanizowanych – TBM. Można założyć, że za ich pomocą można będzie budować, ostrożnie licząc, od 250 do co najmniej 300 m tunelu miesięcznie. Pomijając szczegółową klasyfikację wszystkich rodzajów tarcz zmechanizowanych zamieszczoną w [3], jak wspomniano powyżej, najczęściej stosuje się dwa rodzaje TBM. Są to:

- tarcza zawieszinowa – SS nazywana również *Mixshield*,
- tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych – EPB.

Obie te tarcze pozwalają na drażnienie tuneli poniżej poziomu wody gruntowej. Zasadą działania tarczy zawieszinowej jest zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej na przodku przeciwnie skierowanym ciśnieniem zawiesziny bentonitowej. Mechanizm tego zrównoważenia pokazano na rysunku 3. Polega on na tym, że zawieszina będąca pod ciśnieniem infiltruje w pory urabianego gruntu na pewną głębokość, wypełnia je blaszkami ilu-bentonitu, zmniejszając przepuszczalność gruntu, nadając mu spójność i poprawiając tym samym jego samostateczność. Jednocześnie osadzając cząstki ilu na powierzchni przodka wytwarza na nim cienką błonkę, przez którą wywiera stabilizujące ciśnienie na przodek, zrównoważące wcześniej wspomniane zewnętrzne parcie gruntu i ciśnienie wody gruntowej.

Omawiana tarcza podzielona jest szczelną przegrodą zwaną ścianką ciśnieniową na dwie części. Część przednia stanowi komorę roboczą. Tu odbywa się urabianie gruntu pełnym przekrojem za pomocą obrotowej głowicy skrawającej. Zazwyczaj głowica, w zależności od rodzaju urabianego gruntu, oporów, jaki on stawia, średnicy wyrobiska itd. wykonuje do 3 pełnych obrotów na minutę. Komora robocza wypełniona jest zawiesziną bentonitową o właściwościach tiksotropowych. Wymagane ciśnienie zawiesziny uzyskuje się za pośrednictwem poduszki sprężonego powietrza, którą wytwarza się w części komory roboczej, zawartej pomiędzy ścianką ciśnieniową i ścianką kontaktową, widoczną na rysunku 4.

Zawieszina bentonitowa doprowadzona do komory roboczej i grunt urobiony przez głowicę skrawającą mieszają się i w postaci pulpy są pompowane i systemem rurociągów odprowadzane na powierzchnię terenu do zakładu separacji urobku i regeneracji zawiesziny. Tu wspomniana pulpa dostaje się na sita wibracyjne, a następnie jej część do wirówek, gdzie następuje oddzielenie kosztownej zawiesziny bentonitowej od urobionego gruntu. Tu też dokonuje się badania właściwości odzyskanej zawiesziny i, w zależności od potrzeb, regeneruje się ją przez dodanie odpowiedniej ilości nowej zawiesziny i ponownie systemem przewodów doprowadza do komory roboczej w tarczy.

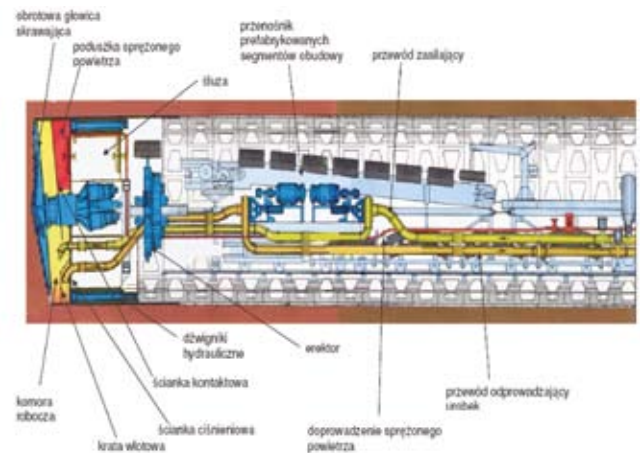


**Rys. 3.** Zasada zapewnienia stateczności przodka w tarczy zawieszinowej (SS) [4]

Jeżeli w gruncie występują głaziki o wymiarach większych niż możliwość ich odpompowania na powierzchnię, w komorze roboczej instaluje się kruszarkę, która odpowiednio je rozdrabnia. Jeżeli z badań geologicznych wynika, że na trasie tunelu mogą wystąpić duże głazy narzutowe, czego należy się spodziewać w niektórych gruntach morenowych, należy uzbroić głowicę tarczy w odpowiednie noże-frezy, zdolne urabiać skałę.

Śluza zainstalowana w ścianie ciśnieniowej pozwala na przedostawanie się do komory roboczej, np. gdy zachodzi konieczność wymiany zużytych noży lub usunięcie przeszkód, których nie może pokonać głowica urabiająca. Przechodzenie – prześluzowywanie się personelu do komory roboczej poprzedzone jest równoczesnym odpompowywaniem z niej zawiesiny i sukcesywne jej zastępowanie sprężonym powietrzem.

Na rysunku 4 przedstawiono przekrój wzdłużny przez tarczę zawieszinową wraz z pokazaniem usytuowania wyżej wspomnianej śluzy, dźwigników hydraulicznych do przesuwania tarczy, erektora-podajnika do montażu prefabrykowanych segmentów obudowy tunelu, a także fragmenty urządzeń pomocniczych, zainstalowanych na tzw. pociągu. Na specjalnych jego „wagonach” znaj-



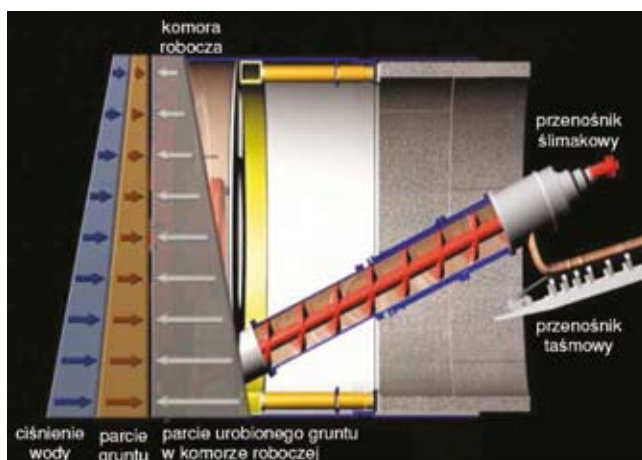
**Rys. 4.** Tarcza zawieszinowa – przekrój wzdłużny [4]

dują się rurociągi wraz z pompami i ich silnikami, przenośniki do transportu segmentów, instalacje (mieszalniki, pompy) do wykonywania iniekcji wypełniających puste przestrzenie za obudowa tunelu itp. Długość takiego pociągu często przekracza 100 m.

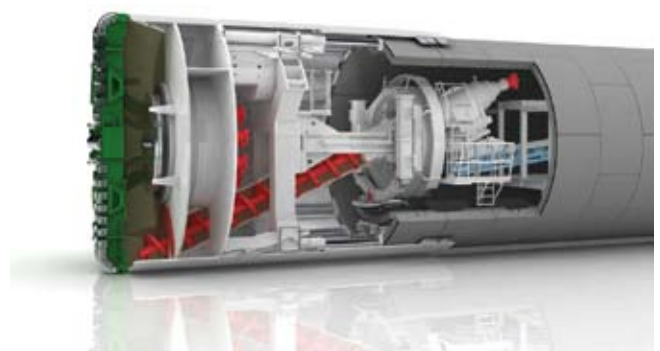
W tarczach typu EPB stateczność przodka zapewnia grunt urobiony przez głowicę skrawającą, wypełniający komorę roboczą. Jest ona oddzielona od reszty tarczy i tunelu masywną ścianą. W niej osadzony jest przenośnik ślimakowy z cylindryczną, szczelną obudową. Za pomocą tego przenośnika urobiony grunt usuwany jest z komory roboczej i zrzucany na kołowe lub szynowe środki transportowe albo też na przenośnik taśmowy i w ten sposób jest ewakuowany z tunelu.

Podczas pracy tarczy EPB parcie gruntu w komorze roboczej jest utrzymywane na wymaganym poziomie przez automatycznie kontrolowane warunki drażenia, tj.:

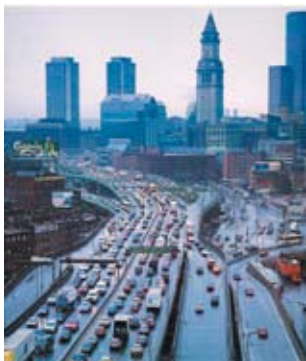
- szybkości posuwania się tarczy oraz sił nacisku dźwigników hydraulicznych,
- prędkości obrotowej i momentu obrotowego głowicy urabiającej,
- prędkości obrotowej i momentu obrotowego przenośnika ślimakowego.



**Rys. 5.** Zasada zapewnienia stateczności przodka w tarczy wyrównanych ciśnień gruntowych (EPB) [4]



**Rys. 6.** Tarcza EPB – przekrój wzdłużny [4]



**Rys. 7.** Widok na centrum Bostonu – rok 1991 [1]



**Rys. 8.** Projekt zagospodarowania przestrzeni nad tunelem – Boston [1]



**Rys. 9.** Muzeum Sztuki w Dusseldorfie [6]



**Rys. 10.** Trasa M-30 w Madrycie przed budową tunelu drogowego o średnicy 15,5 m [1]



**Rys. 11.** Po wybudowaniu tunelu trasy M-30 w Madrycie [1]

W celu zapewnienia stateczności przodka najważniejsze jest zachowanie równowagi pomiędzy ilością gruntu urobionego i usuniętego z komory roboczej. Zasadę zapewnienia stateczności przodka w tarczy EPB ilustruje rysunek 5, natomiast schematyczny przekrój wzdłużny pokazano na rysunku 6. By móc dobrać wartość parcia urobionego gruntu w komorze roboczej w stosunku do założonego w projekcie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej, w komorze roboczej instaluje się czujnik do pomiaru parcia urobku. Drażąc tunel za pomocą tarcz wyrównanych ciśnień gruntowych, ko-

nieczne jest stosowanie tzw. dodatków. Są one wstrzykiwane przez specjalne dysze umieszczone w głowicy skrawającej, w ścianie ciśnieniowej od strony komory roboczej, w przenośniku ślimakowym, a niekiedy też dookoła przedniej części powłoki tarczy. Dodatki te noszą nazwę plastyfikatorów, bowiem uplastyczniają urobiony grunt, zmniejszając jego tarcie wewnętrzne. Ponadto na skutek mieszania gruntu z plastyfikatorem przez głowicę urabiającą i ewentualnie dodatkowo zamontowane mieszadła dochodzi do homogenizacji urobku i jego uszczelnienia. W konsekwencji uzyskuje się zmniejszenie potrzebnego momentu obrotowego głowicy urabiającej. Dobrze zmieszany grunt z plastyfikatorem powoduje równomierne przedostawanie się go do przenośnika ślimakowego. Uszczelniony i uplastyczniony urobek ułatwia pracę tego przenośnika dzięki zmniejszeniu tarcia w jego wąskiej, cylindrycznej obudowie, co znacząco wpływa z kolei na zmniejszenie momentu obrotowego przenośnika. Dodatkowym efektem jest wytworzenie się w nim szczelnego korka gruntowego, przez który nie może się przedostać woda gruntowa, mogąca jeszcze przesączać się do komory roboczej. Wstrzykiwanie plastyfikatora wokół powłoki tarczy zmniejsza tarcie pomiędzy nią a gruntem, co pozwala na zmniejszenie siły nacisku w dźwignikach hydraulicznych przesuwających tarczę.

Zastosowanie tarcz zmechanizowanych wymaga bardzo dobrego rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych, a także właściwości geotechnicznych gruntów na trasie budowanego tunelu. Wybór właściwego rodzaju tarczy jest zadaniem skomplikowanym, przy którym należy się kierować kryteriami technicznymi i ekonomicznymi. Do tych pierwszych należą:

- warunki gruntowe, a w tym:
  - rodzaje gruntów i ich granulometria,
  - parametry geotechniczne,
  - poziomy i ciśnienia wód gruntowych oraz współczynniki filtracji,
  - ewentualna obecność głazów narzutowych i innych przeszkód w gruncie,
  - obecność, położenie i stan techniczny urządzeń podziemnych na trasie przyszłego tunelu;
- warunki na powierzchni terenu:
  - zabudowa nad i obok tunelu, rodzaj jej posiadania, wrażliwość na osiadania,
  - dostępność odpowiedniej powierzchni placu budowy; w przypadku tarcz zawieszonych – większej w stosunku do wymagań tarcz EPB ze względu na konieczność instalacji zakładu separacji urobku i regeneracji zawiesziny,
  - dostępność miejsca do składowania urobku i jego ewentualnej utylizacji, w przypadku stosowania dodatków uznanych za szkodliwe dla środowiska.

Ponadto przy wyborze tarcz zmechanizowanych należy mieć na uwadze takie szczegółowe kryteria, jak:

- podatność tarczy na zaciskanie przez otaczający grunt zwłaszcza, jeżeli ma on zdolność do pęcznienia,
- wpływ przekroju poprzecznego i długości drążone-

go tunelu. Przy dużych średnicach – potrzebny jest bardzo duży moment obrotowy głowicy skrawającej, zwłaszcza w tarczach EPB, zaś w przypadku tarcz zawieszinowych – konieczna jest duża moc zainstalowana w silnikach pomp do tłoczenia zawiesziny i urobku z uwagi na odległość od przodka do zakładu segregacji urobku i regeneracji zawiesziny,

- wpływ danego rodzaju tarczy na wartość osiadań powierzchni terenu – w zasadzie przy wyborze tarczy zawieszinowej osiadania mogą być mniejsze niż przy tarczy EPB,
- wpływ na czas unieruchomienia tarczy w sytuacji konieczności wymiany noży lub natrafienia na przeszkody do usunięcia przed czołem tarczy. Ten czas jest krótszy w przypadku tarcz zawieszinowych w stosunku do tarcz EPB,
- szybkość urabiania, czyli postęp drążenia. Powszechnie uważa się, że jest on większy dla tarcz EPB niż dla tarcz zawieszinowych,
- czystość w budowanym tunelu – znacznie łatwiejsza do utrzymania w tunelach drążonych tarczą zawieszinową niż EPB itd.

### 3. Podsumowanie

Prowadzenie tras komunikacyjnych w aglomeracjach miejskich w tunelach jest standardem ogólnosiwiatowym. Oprócz korzyści wynikających z wyeliminowania ruchu samochodowego czy tramwajowego z obszaru zwartej zabudowy miejskiej obecnie dąży się do zrównoważonego rozwoju urbanistycznego miast. Pozyskiwane dzięki budowie tuneli tereny wykorzystuje się na lokalizację muzeów, terenów zielonych, cele rekreacji. Najlepszym przykładem jest budowa tzw. Big Dig w Bostonie – jednej z najdroższych inwestycji infrastrukturalnych

w Stanach Zjednoczonych. Centralną drogą ekspresową, biegnącą przez ściśle centrum miasta całkowicie schowano pod ziemią. Na rysunkach 7 i 8 widać sytuację przed budową i po jej zakończeniu.

Projektowanie i budowę rozpoczęto w latach 90. XX wieku. W wyniku wielu komplikacji i trudności zarówno technicznych (tunele budowano metodami odkrywkowymi), jak i ekonomicznych cała arteria została oddana do eksploatacji w 2007 r. Koszt, początkowo oceniany na około 3 mld dolarów w 2007, zamknął się kwotą 14,5 miliarda.

Podobny przykład, ale w mniejszej skali to budowa tunelu w Dusseldorfie, gdzie nad nim usytuowano muzeum sztuki KIT (rys. 9) lub chociażby warszawskie Centrum Nauki Kopernik nad tunelem Wistostrady, który planuje się wydłużyć w kierunku południowym. W Madrycie wydrążono tarczą o średnicy 15.5 m tunel drogowy na trasie autostrady M-30 biegnącej wzdłuż rzeki, a na powierzchni terenu stworzono park (rys. 10 i 11).

Reasumując – mimo dużych kosztów bezpośrednich budowy tunelu w stosunku do rozwiązania nadziemnego (most, wiadukt, estakada) lub w poziomie terenu, w perspektywie wielu lat użytkowania bilans korzyści społecznych i ekonomicznych jest dodatni.

#### BIBLIOGRAFIA:

- [1] [www.ita-aites.org/itacus](http://www.ita-aites.org/itacus)
- [2] Siemińska-Lewandowska A., Głębokie Wykopy Projektowanie i wykonawstwo, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010
- [3] Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A., Budowa tuneli metra w gruntach i skałach, Transport Miejski i Regionalny, 7/2015, str. 17–25
- [4] [www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de)
- [5] Grodecki W., Siemińska-Lewandowska A., Rozpoznanie geotechniczne a budowa tuneli za pomocą tarcz zmechanizowanych, Materiały konferencyjne Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji WPPK, 2017
- [6] <http://www.kunst-im-tunnel.de/>

## III ogólnopolski konkurs Mostów Drewnianych



Studenckie Koło Naukowe „Konstruktor” zaprasza studentów uczelni technicznych z całej Polski na trzecią edycję Ogólnopolskiego Konkursu Mostów Drewnianych, który odbędzie się na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej 22–24 listopada 2017 r.

Współorganizatorem konkursu jest Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Białymstoku.

Zadanie konkursowe polega na zaprojektowaniu i realizacji modelu mostu drewnianego o łącznej długości 3,50 m, z nie więcej niż 0,27 m<sup>3</sup> drewna. Główne kryteria konkursowe to przeniesione obciążenie, ugięcie, cena użytych do budowy materiałów (drewno oraz łączniki mechaniczne) oraz oszacowanie nośności mostu. Przewidujemy udział 8 zespołów z całego kraju, w pięcioosobowych składach. Konkurs Mostów Drewnianych ma wymiar zarówno naukowy, jak i rekreacyjny. Modele realizowane w skali makro świetnie obrazują mechanikę konstrukcji oraz weryfikują przyjęte rozwiązania konstrukcyjne. Oprócz głównego wydarzenia przewidziano również konferencję dotyczącą różnych sfer budownictwa.

Szczegółowe informacje oraz regulamin konkursu można znaleźć na wydarzeniu na facebooku pod hasłem „III Ogólnopolski Konkurs Mostów Drewnianych”