



Budowle podziemnej przestrzeni miast

tekst: **prof. dr hab. inż. CEZARY MADRYAS**, Instytut Inżynierii Łądowej, Wydział Budownictwa Łądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

Rozwój infrastruktury technicznej jest także konieczny wobec perspektywy tworzenia się społeczeństwa o bardzo dużym udziale ludzi starszych; wynika również z potrzeby zagospodarowania zwiększającej się ilości wolnego czasu mieszkańców miast, co jest następstwem głównie technicznych udogodnień cywilizacyjnych (informatyzacja, łączność bezprzewodowa itp.). Stąd też obecne oczekiwania społeczne są takie, aby modernizowane fragmenty miast oraz ich rozbudowa przebiegała z większym niż dotąd uwzględnieniem komfortu zamieszkania, przystosowując nowo powstającą infrastrukturę miejską do potrzeb społecznych, duchowych i kulturowych wynikających ze współczesnego stylu życia i aktualnej skali wartości. Tworzenie przestrzeni zurbanizowanej o wymienionych cechach zostało już w kraju częściowo podjęte, ciągle jednak realizowane jest w niewystarczającym stopniu. Powstające projekty modernizacji i rozbudowy miast muszą charakteryzować się lepszym niż dotąd wykorzystaniem przestrzeni miejskiej także przez intensywniejszy rozwój budownictwa podziemnego oraz wyższy stopień integracji systemu infrastruktury, który może być podzielony na trzy podsystemy.

Do pierwszego podsystemu proponuje się zakwalifikować wszystkie urządzenia związane z komunikacyjną obsługą miasta, do drugiego – wszystkie urządzenia związane z gospodarką energetyczną, wodną, ściekową, usuwaniem i utylizacją odpadków. Trzeci podsystem stanowią będą urządzenia łączności i informacji, które przy założeniu potrzeby kontroli, także w odniesieniu do pozostałych urządzeń infrastruktury, tworzą podstawę systemu zarządzania urbanistycznego (*urban management system*).

Jeśli przedstawione cele mają być osiągnięte, konieczny jest pakiet preferencyjnych dla rozwoju budownictwa miejskiego przepisów administracyjnych, mających odbicie w zasadach kredytowania, subsydiowania, prowizji itp. dla rozwiązań najlepszych. Najważniejsze jednak jest wypracowanie koncepcji roz-

styl życia i pracy mieszkańców współczesnych miast oraz ich oczekiwania i wymagania powodują, że wzrasta popyt na wysokiej jakości usługi, szybką i wygodną komunikację, miejsca parkingowe, a także na szerszą niż dotąd obsługę podziemną infrastrukturą sieciową, tzn. zapewnienie łączności, dostaw wody i energii oraz odprowadzania ścieków. Coraz bardziej ujawnia się zapotrzebowanie na miasta 24-godzinne, czyli takie, w których pewne obszary funkcjonują całą dobę. Jest zatem oczywiste, że dostosowywana do takich celów infrastruktura techniczna musi być zdolna nie tylko do spełnienia podstawowych wymagań egzystencji ludzkiej, jak to ma miejsce obecnie, ale musi także zapewniać wysoki komfort i bezpieczeństwo, co jest możliwe tylko wtedy, jeżeli będzie kierowana przez rozwinięte systemy informacyjno-kontrolne.

wiązań technicznych, które stanowiłyby podstawę do tworzenia spójnych opracowań szczegółowych, spełniających opisane wymogi. Podstawowym założeniem takich opracowań musi być kreowanie znacznie bardziej pojemnej przestrzeni zurbanizowanej, co nie jest możliwe bez intensyfikacji zainwestowania w przestrzeń podziemną miast. Wielofunkcyjna, intensywnie zagospodarowana przestrzeń podziemna pozwala na uwolnienie od niektórych funkcji przestrzeni naziemnej, która może być w takim rozwiązaniu wykorzystana do innych celów (przede wszystkim mieszkaniowych), a także częściowo odnowiona ekologicznie.

Uwaga planistów musi więc bardziej niż dotąd skupić się na szerszym wykorzystaniu przestrzeni podziemnej jako kierunku dla poprawy transportu miejskiego, zwiększeniu pojemności centrów przez przeniesienie do podziemi wielu funkcji handlowych i usługowych, a także modernizacji i rozbudowy struktur sieciowych z uwzględnieniem zwiększenia ich wydolności i niezawodności funkcjonowania.

Prace w tym kierunku są związane z początkami cywilizacji, a współcześnie ich celowość potwierdzają działania w krajach wysoko rozwiniętych, gdzie zainteresowanie przestrzenią podziemną trwa już od wielu lat [1, 2, 6, 8, 14, 16, 17]. Najbar-

Wielofunkcyjna, intensywnie zagospodarowana przestrzeń podziemna pozwala na uwolnienie od niektórych funkcji przestrzeni naziemnej, która może być w takim rozwiązaniu wykorzystana do innych celów (przede wszystkim mieszkaniowych), a także częściowo odnowiona ekologicznie.

Tab. 1. Strefy funkcjonalnego wykorzystania przestrzeni podziemnej

[m]	Tereny miejskie (<i>urban areas</i>)			Tereny podmiejskie (<i>suburban areas</i>)
	Pod zabudową mieszkaniową	Pod ulicami	Pod terenami użyteczności publicznej	
-5	mieszkania (piwnice), baseny, pasaż handlowe, galerie dla przewodów infrastruktury, parkingi	przejścia dla pieszych (lobby metro), sieci infrastruktury (w tym tunele wieloprzewodowe), płytkie tunele komunikacyjne itd.), pasaż handlowe, parkingi	parkingi, przejścia dla pieszych (lobby metro), sieci infrastruktury (np. c.o.), obiekty rekreacyjne (baseny, hale koncertowe itp.)	warsztaty, laboratoria, sieci infrastruktury, magazyny
-10	parkingi, urządzenia techniczne (stacje pomp, podstacje elektroenergetyczne itd.)	parkingi, metro (perony, odcinki drogowe), głębokie tunele komunikacyjne, sieci infrastruktury (w tym tunele wieloprzewodowe), podziemne ciek (skanalizowane), zbiorniki retencyjne	parkingi, metro (perony, odcinki drogowe), głębokie tunele komunikacyjne, sieci infrastruktury (np. c.o.), obiekty rekreacyjne (baseny, hale koncertowe itp.), podziemne ciek (skanalizowane)	warsztaty, laboratoria, sieci infrastruktury, magazyny
-30	warsztaty, laboratoria ze stałą temperaturą, głębokie tunele komunikacyjne	parkingi, metro (perony, odcinki drogowe), głębokie tunele komunikacyjne, sieci infrastruktury (w tym tunele wieloprzewodowe), zbiorniki retencyjne	głębokie tunele komunikacyjne, wyposażenie techniczne (wysokonapięciowe podstacje energetyczne, oczyszczalnie ścieków, stacje pomp itp.), zbiorniki retencyjne	siłownie energetyczne, podziemne laboratoria, magazyny cieczy i żywności itp.
-100		wyposażenie techniczne (wysokonapięciowe podstacje energetyczne, oczyszczalnie ścieków), zbiorniki gazów i cieczy (w tym retencyjne)	wyposażenie techniczne (wysokonapięciowe podstacje energetyczne, oczyszczalnie ścieków), zbiorniki gazów i cieczy (w tym retencyjne)	siłownie energetyczne, zbiorniki paliw płynnych (ropopochodnych), zbiorniki gazu naturalnego i gazu ciekłego

dziej wymownym potwierdzeniem tego faktu są powstałe struktury podziemne określane mianem *underground city*, m.in. w takich miastach, jak Montreal, Tokio czy Pekin [10].

2. Segregacja przestrzeni podziemnej w miastach

Przeprowadzone własne studia głównie zagranicznych rozwiązań technicznych i ich powiązań funkcjonalno-lokalizacyjnych pozwoliły wyłonić prawidłowości dające podstawę do sformułowania uogólnionych zasad segregacji przestrzeni podziemnej dla poszczególnych funkcji. Zbiorcze zestawienie wyników tej analizy zilustrowano w tabeli 1.

Wyróżniono dwa typy terenu: miejski i podmiejski. W obrębie terenu miejskiego wydzielono trzy rodzaje zabudowy: zabudowę kubaturową, ulice oraz inne niezabudowane tereny użyteczności publicznej poza ulicami (place, zieleńce itp.). Jak widać, największe nasycenie budowlami

podziemnymi występuje pod ulicami na małej głębokości do -10 m. Wynika to przede wszystkim z historii rozwoju technologii stosowanych w budownictwie, które w przeszłości uniemożliwiały realizację na szeroką skalę obiektów podziemnych metodami bezwypokopowymi na większych głębokościach. Cechą charakterystyczną dla tej strefy jest także łatwość łączenia funkcjonalności budowli podziemnych z budowlami na powierzchni terenu (głównie budynków z przyłączami do sieci). Możliwe jest tu

również projektowanie rozwiązań z częściowym wykorzystaniem naturalnego oświetlenia. Głębokość ta jest także najlepiej akceptowana przez mieszkańców miast, z natury rzeczy nieprzyzwyczajonych do dłuższego przebywania w przestrzeni podziemnej. Konstrukcja górnego stropu płytkich budowli stanowi zazwyczaj bezpośrednie podłoże dla nawierzchni terenu (analogia do pomostu w budownictwie mostowym). Jeżeli jest to budowla zlokalizowana pod terenem zabudowanym, na konstrukcji tej wzno-

Strefy na większych głębokościach zabudowywane są przede wszystkim na terenach pozamiejskich, gdzie, zgodnie z tendencjami światowymi, lokalizuje się podziemne laboratoria, magazyny i urządzenia techniczne, np. zbiorniki gazów. W perspektywie, jak wynika ze studiów literaturowych, strefa ta będzie również szerzej wykorzystywana na terenach miejskich.

szone są obiekty nadziemne (budynki mieszkalne, użyteczności publicznej itp.).

Strefy na większych głębokościach zabudowywane są przede wszystkim na terenach pozamiejskich, gdzie, zgodnie z tendencjami światowymi, lokalizuje się podziemne laboratoria, magazyny i urządzenia techniczne, np. zbiorniki gazów. W perspektywie, jak wynika ze studiów literaturowych, strefa ta będzie również szerzej wykorzystywana na terenach miejskich.

Opisane w tabeli 1 funkcje realizowane są przez budowle, których układy mogą tworzyć struktury sieciowe. W strukturach tych węzły W utożsamiane są z obiektami o skupionym, z przestrzennego punktu widzenia, charakterze (stacje metra, komory techniczne tuneli wieloprzewodowych, studzienki rewizyjne i inne), a linie L – z tunelami i przewodami. Z punktu widzenia systematyki inżynierskiej mamy zatem podziemne systemy współpracujących ze sobą budowli (transportowe i zaopatrzeniowe) oraz zbiór rozproszonych budowli, niepowiązanych ze sobą funkcjonalnie (magazyny, hale sportowe, laboratoria, zbiorniki itd.). Należy tu podkreślić, że systemy sieciowe (wodociągowe, kanalizacyjne, energetyczne, łączności czy metro) stanowią uporządkowane struktury przestrzenne i nie mogą być lokalizowane w dowolnych miejscach.

3. Sposoby wykorzystania przestrzeni podziemnej w miastach polskich

W świetle opisanych w tabeli 1 funkcji ciekawa jest analiza współczesnego wykorzystania przestrzeni podziemnych w miastach polskich. Problem jest o tyle złożony, że w kraju jak dotąd nie prowadzi się badań w celu sformułowania zasad kompleksowego i wielofunkcyjnego wykorzystania przestrzeni podziemnej. Zazwyczaj analizy dotyczą wybranych typów budowli, metod ich projektowania oraz wykonawstwa, nie omawiając współzależności między nimi, nie mówiąc już o współzależności wyposażenia podziemnego miasta z jego zainwestowaniem naziemnym. Taki stan nauki i prac inżynierskich jest spójny z rzeczywistą sytuacją w zakresie wykorzystania przestrzeni podziemnej, której zainwestowanie w kraju ogranicza się w dużej mierze do wyeksploatowanych sieci ułożonych bezpośrednio w gruncie, nielicznych przejść podziemnych dla pieszych oraz

W kraju jak dotąd nie prowadzi się badań w celu sformułowania zasad kompleksowego i wielofunkcyjnego wykorzystania przestrzeni podziemnej. Zazwyczaj analizy dotyczą wybranych typów budowli, metod ich projektowania oraz wykonawstwa, nie omawiając współzależności między nimi, nie mówiąc już o współzależności wyposażenia podziemnego miasta z jego zainwestowaniem naziemnym.

rzadziej tuneli komunikacyjnych i incydentalnie tuneli wieloprzewodowych. Rzeczywistość lepiej wygląda w odniesieniu do garaży podziemnych.

Sytuacja zapewne byłaby inna, gdyby ukończono rozpoczętą w latach 50. XX w. budowę głębokiego metra w Warszawie. Przerwanie tej inwestycji w 1957 r. niewątpliwie przyczyniło się do opóźnień, jakie istnieją w zakresie miejskiego budownictwa podziemnego w Polsce w stosunku do krajów wysoko rozwiniętych. Do budowy metra, według koncepcji trasy z okresu międzywojennego, powrócono dopiero w latach 80.

Zapoczątkowany pod koniec lat 70. rozwój indywidualnej motoryzacji nie przyniósł również oczekiwanego postępu w miejskim budownictwie podziemnym. W dalszym ciągu nie budowano podziemnych garaży ani parkingów, a nieliczne tunele dla samochodów nie zmieniły rzeczywistości. Ze względu na kryzys ekonomiczny sytuacja nie uległa zmianie także w latach 80. Spopularyzowane w tym okresie budownictwo plombowe, z uwagi na ograniczone środki, było realizowane bez wykorzystania podziemnych kondygnacji do celów usługowych i parkowania. Zabudowane w ten sposób tereny w centrach miast bezpowrotnie wykluczyły wykorzystanie płytkiej przestrzeni podziemnej w tych miejscach również w przyszłości, co jest niepowetowaną stratą. W tym obszarze sytuacja uległa nieco zmianie dopiero w latach 90. XX w., od kiedy w większości projektowanych budynków ich kondygnacje podziemne są przeznaczone do parkowania samochodów.

Do dzisiaj nienowocześnie realizowana jest zabudowa nowych terenów i ich wyposażenia w podziemne urządzenia inżynierskie. Budownictwo podziemne

na tych obszarach ogranicza się do sieci zaopatrzeniowych, które nie są układane w tunelach wieloprzewodowych, lecz bezpośrednio w gruncie, co obniża niezawodność ich funkcjonowania, oraz zazwyczaj jednokondygnacyjnych garaży dla lokatorów osiedli mieszkaniowych, wznoszonych przez deweloperów.

Reasumując, należy stwierdzić, że przestrzeń podziemna w polskich miastach wykorzystywana jest incydentalnie (z wyjątkiem infrastruktury sieciowej). W żadnym razie nie może być tu mowy o zintegrowanych systemach wielofunkcyjnych. Pewną osnową dla takich systemów jest jak dotąd wyłącznie warszawskie metro, ale i tu stan zainwestowania jest skromny w stosunku do innych europejskich miast (np. Pragi, Monachium czy Budapesztu, nie mówiąc o wspomnianych już pozaeuropejskich metropoliach, jak Montreal lub Tokio). Bezsprzecznie jest wiele powodów takiego stanu, spośród których najważniejszym jest brak preferencji dla tego typu budownictwa, implikujący małe zainteresowanie tą problematyką w środowiskach naukowych i inżynierskich. To z kolei skutkuje małą liczbą polskich specjalistów (jest to ciągle niszowy obszar edukacji), a co za tym idzie, obawą przed zainwestowaniem podziemnym wynikającą z braku wiedzy.

Niewątpliwie zmiana sytuacji sprzyja rozwój technologii i ich dostępność (niestety, większość z nich pochodzi spoza granic kraju), stwarzając szerokie możliwości zainwestowania ciągle wolnej przestrzeni w naszych miastach. Istnieją nawet dobre przykłady aplikacji tych technologii w Polsce, w wyniku czego powstało i powstaje kilka interesujących budowli podziemnych, z których wybrane opisano w rozdziale 4.

4. Studium przypadków

4.1. Tunele drogowe

4.1.1. Tunel tramwajowy w Krakowie

Tunel tramwajowy w Krakowie jest najdłuższą tego typu budowlą w Polsce i liczy 1420 m, a wraz z rampami 1539 m. Powstał w ramach realizacji zadania *Krakowski szybki tramwaj* i łączy rondo Mogiłskie z przyległościami ul. Pawiej i Dworca Głównego PKP [15]. Praktycznie po warszawskim metrze i linii kolei średnicowej PKP, również w Warszawie, jest to trzecia w Polsce miejska budowla podziemna przeznaczona dla taboru szynowego. Czwartym tunelem jest, oddany do eksploatacji w 2012 r., tunel o długości 1067,2 m na trasie szybkiego tramwaju w Poznaniu.

Temat budowy krakowskiego tunelu ciągnął się z długimi przerwami przez 34 lata; ostatecznie otwarcie obiektu miało miejsce w grudniu 2008 r. Na trasie tunelu zlokalizowano dwa przystanki: Dworzec Główny i Politechnika. Pierwszy z przystanków znajduje się pod dworcem PKP Kraków Główny, co powoduje, że wraz z Regionalnym Dworcem Autobusowym stanowi nowoczesny, zintegrowany kompleks przesiadkowy. Drugi z przystanków składa się z części podziemnej i nadziemnej zlokalizowanej wzdłuż ul. Pawiej. Nad torami ułożonymi w tunelu umieszczono galerię, z której schodzi się na perony oraz przejście podziemne pod ul. Pawią. Torowiska w tunelu mają niezależne perony, co wynika z faktu, że tabor tramwajowy nie posiada drzwi po lewej stronie. Tunel jest budowlą o konstrukcji żelbetowej, wykonaną na całej długości w wykopie otwartym. Mimo to należy go uznać za dobre rozwiązanie inżynierskie z bardzo estetycznie wykonanymi przystankami (ryc. 1) oraz funkcjonalnościami zbliżającymi przedsięwzięcie do zgodnych ze współczesnymi trendami w urbanistyce przestrzeni podziemnej miast struktur wielofunkcyjnych.

4.1.2. Tunel drogowy w Gdańsku

Dotychczas wybudowane nieliczne tunele drogowe w Polsce to płytkie budowle o niedużych długościach, wykonane w wykopach. Sytuacja uległa zmianie w 2013 r., kiedy to rozpoczęto drążenie tunelu drogowego pod Martwą Wisłą w ramach zadania IV *Odcinek węzeł Marynarki Polskiej – węzeł Ku Ujściu*, realizowanego w ramach przedsięwzięcia *Połączenie Portu Lotniczego*

z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego. Projekt, którego całkowity koszt wynosi 1,42 mld zł, współfinansowany jest przez Unię Europejską na poziomie 1,154 mld zł ze środków Funduszu Spójności (Program Infrastruktura i Środowisko) [19]. Całkowita długość tunelu wynosi 1377,5 m, z czego 1072,5 m jest wykonywana przy użyciu TBM, a 305,0 m w wykopie otwartym. Tunel będzie składał się z dwóch osobno drążonych tuneli z dwujezdniowymi drogami, oddalonych od siebie o 25,0 m i połączonych siedmioma przejściami ewakuacyjnymi w odległościach ok. 170 m. Stąd też całkowita długość tuneli drążonych wynosi 2145 m. Do realizacji tego zadania wykonano maszynę drążącą typu Mixshield o średnicy 12,56 m, długości 91 m i masie 2200 t [7]. Maszyna została wykonana w Niemczech, skąd w częściach, drogą lądową i morską, przetransportowano ją na miejsce budowy. Po zmontowaniu w całość maszynę połączono z zakładem separacji, do którego transportowany jest urobek w celu odseparowania od płuczki bentonitowej.

Każdy z tuneli składa się z 538 pierścieni, zbudowanych z siedmiu tubingów (sześć podstawowych i jeden zworni-



Ryc. 1. Przystanek tramwajowy Politechnika [22]

kowy). Masa pojedynczego pierścienia wynosi ok. 100 t. Drążenie tuneli rozpoczyna się w szybach startowych o głębokości 21 m, których konstrukcję stanowią ściany szczelinowe o grubości 1,20 m, ekrany Soilcrete z palami kotwiącymi dla uszczelnienia dna oraz specjalne konstrukcje rozparć [18]. Z konstrukcyjnego punktu widzenia najtrudniejszym wyzwaniem było zaprojektowanie rozparć ścian na okres montażu TBM. W tym czasie szyby były rozparte stropem żelbetowym i płytą denną, tworząc niejako

Tunel w Gdańsku jest największą (pod względem wymiarów przekroju poprzecznego) tego typu budowlą w Polsce i jedną z największych w Europie. Po raz pierwszy w kraju zastosowano też TBM do budowy tunelu drogowego.



Ryc. 2. Widok szybu docelowego i czoła (noża) maszyny drążącej, fot. D. Ganew



Ryc. 3. Widok TBM podczas jej opuszczania do szybu startowego, fot. D. Ganew

W Polsce pierwszą uchwałę o budowie metra w Warszawie podjęto już w 1925 r., a zatem siedem lat po odzyskaniu niepodległości, co bez wątpienia świadczy o odwadze i umiejętności perspektywicznego myślenia ówczesnych decydentów i inżynierów.

konstrukcję ramową o rozpiętości 16 m. W polu przejścia maszyny przez ścianę szczelinową (tzw. oknie) przewidziano zbrojenie betonu włóknami szklanymi. Docelowo w szybach startowych i odbiorczych będzie zainstalowane wyposażenie techniczne. Nadkład gruntu nad tunelem waha się w granicach od 8 do 21,5 m, a w najniższym punkcie niwelety tunel znajduje się 34,25 m poniżej zwierciadła Martwej Wisły. Budowa tunelu przebiega przez grunty sypkie i spoiste o słabej nośności (piaski, namuły, torfy) przy wysokim poziomie wody gruntowej [4]. Opisany tunel jest największą (pod względem wymiarów przekroju poprzecznego) tego typu budowlą w Polsce i jedną z największych w Europie. Po raz pierwszy w kraju zastosowano też TBM do budowy tunelu drogowego. Budowany jest przez firmę spoza Polski, jednak przy decydującym udziale polskich inżynierów i z polskim nadzorem naukowym. Na rycinie 2 pokazano szyb docelowy i czoło maszyny drążącej podczas uroczystości zakończenia budowy pierwszego tunelu.

4.3. Metro

Nazwa metro pochodzi od nazwy pierwszej linii podziemnej kolei w Paryżu, którą nazwano Métropolitain i oddano do eksploatacji w 1900 r. Metro jest uważane za najefektywniejszy środek komunikacji zbiorowej w miastach. Jednak ze względu na wysoki stopień użycia zaawansowanych technologii oraz wysoki koszt inwestycyjny, posiadaniem metra może poszczycić się nieco ponad 100 miast w najwyżej rozwiniętych krajach świata.

W Polsce pierwszą uchwałę o budowie metra w Warszawie podjęto już w 1925 r., a zatem siedem lat po odzyskaniu niepodległości, co bez wątpienia świadczy o odwadze i umiejętności perspektywicznego myślenia ówczesnych decydentów i inżynierów. Budowę metra (głębokiego) od strony Pragi podjęto po przerwie spowodowanej II wojną światową, na początku lat 50. XX w. Jednak w 1957 r. roboty budowlane zostały ostatecznie przerwane. Prace projektowe przy I linii, oddanej do eksploatacji w 2008 r., rozpoczęto dopiero w połowie lat 70., a jej realizację w roku 1983. Linia ta, o długości 23,1 km, składa się z odcinków szlakowych oraz 21 stacji i łączy południowe i północne dzielnice lewobrzeżnej Warszawy z centrum miasta. Codziennie z metra korzysta ok. 500 tys. pasażerów. Tunele metra zostały częściowo wykonane w wykopach otwartych (końcowe odcinki linii), a częściowo metodą tarczową, z użyciem starego, wręcz zabytkowego typu tarczy. Wszystkie stacje wykonano w wykopach otwartych.

Obecnie budowany jest centralny odcinek II linii warszawskiego metra. Jest to trudne przedsięwzięcie techniczne, gdyż cała trasa zlokalizowana jest w ścisłym centrum miasta. Linia przebiega pod dnem Wisły, zabytkową fabryką Norblina, przechodzi 3 m poniżej tuneli I linii metra oraz mocno zdegradowanymi budynkami pomiędzy ulicami Targową, Sprzeczną i Zamoyskiego. Przedsięwzięcie składa się m.in. z siedmiu stacji posadowionych na głębokości od 13 do 23 m i budowanych w wykopach otwartych, sześciu wentyla-

torni oraz tuneli o łącznej długości ponad 9 km [21]. Mimo drobnych niepowodzeń, jak awaria tunelu na Wisłostradzie i pęknięcia kilku budynków, tunele zostały wybudowane w ciągu 18 miesięcy, co daje średnią prędkość drążenia na poziomie 80 m na tydzień. Uzyskanie tak satysfakcjonującego wyniku było możliwe dzięki użyciu czterech nowoczesnych maszyn TBM EPB. II linia warszawskiego metra jest budowana – w przeciwieństwie do linii I – urządzeniami odpowiadającymi najwyższemu światowemu standardom, co dobrze wróży realizacji podobnych przedsięwzięć w innych miastach. Wiadomo, że o podziemnej kolei myśli się w Krakowie czy Wrocławiu. Widok TBM podczas jej opuszczania do szybu startowego przedstawiono na rycinie 3, a widok wnętrza gotowego tunelu na rycinie 4.

4.4. Budowle wielofunkcyjne

Wielofunkcyjne struktury podziemne powstają zazwyczaj na osnowie metra lub, rzadziej, jako budowle o charakterze skupionym. W pierwszym przypadku są skutkiem integracji stacji metra z podziemnymi przejściami dla pieszych, przechodzącymi często w podziemne ulice, łączące obiekty o różnych funkcjach (domy handlowe, banki, kina itp.). Są to z reguły struktury wielopoziomowe, nieraz węzły, w których przecinają się niekoniernie połączone konstrukcyjnie i funkcjonalnie budowle podziemne. Przykładem takiego rozwiązania w kraju może być rondo na skrzyżowaniu ul. Marszałkowskiej i Al. Jerozolimskich w Warszawie, pod którym poza przejściem podziemnym dla pieszych przebiegają (poniżej tego przejścia) kolektor kanalizacyjny i linia kolejowa, a w pobliżu zlokalizowana jest stacja metra. Budowla ta powstała, z wyjątkiem stacji metra, kilkadziesiąt lat temu, co bez wątpienia było znaczącym osiągnięciem inżynierskim.

Podobną historię ma zmodernizowane w ostatnich latach rondo im gen. Jerzego Ziętki w Katowicach. Budowla powstała w 1965 r., a w jej podziemiach zaplanowano m.in. sklepy, bar, kwaciarnie i toalety. Jeden z tuneli prowadzi do tzw. Spodka. Obiekt w całości wykonany był w wykopie otwartym, ale mimo to stanowił bardzo nowoczesny element podziemnej infrastruktury miasta. Przebudowa ronda została przeprowadzona w latach 2000–2006. Obecnie ma ono trzy poziomy, w tym jeden podziemny, wzbo-

gacony o nowy tunel dla samochodów. Jest to tunel dwunawowy, o długości naw 657 m i 650 m, szerokości jezdni w obu nawach równej 11 m i użytkowej wysokości 6,4 m. Umożliwiło to uruchomienie sześciu pasów ruchu. Konstrukcję nośną tunelu stanowi płyta stropowa o grubości 1,2 m, oparta na ścianach szczelinowych o grubości 0,8 m [20]. Połowę budowli przekryto efektywną kopułą. Obiekt pełni również funkcję wystawienniczą, gastronomiczną i centrum przesiadkowego dla ruchu tramwajowego i autobusowego. Widok ronda w nocy przedstawiono na rycinie 5.

4.5. Mikrotunele

W Polsce w zdecydowanej większości przypadków mikrotunelowanie wykorzystywane jest do bezwykopowej realizacji infrastruktury sieciowej, w tym przede wszystkim przewodów kanalizacyjnych. Pierwszy mikrotunel wykonano na przełomie 1997 i 1998 r. w Toruniu. Zrealizowano tam kolektor kanalizacyjny o średnicy DN 1600 i długości $L = 973$ m, z rur wykonanych z materiału kompozytowego GRP (*Glass Reinforced Plastic*).

Pod względem wymiarów przewodu najbardziej spektakularnymi przedsięwzięciami były realizacje kolektorów ogólnospławnych pod al. Prymasa Tyśiąclecia w Warszawie i hałą widowiskową w Katowicach – kolektor Wełnowiecki II oraz w trakcie budowy systemu dosyłowego kanalizacji do Oczyszczalni Ścieków „Czajka” w Warszawie.

W pierwszym przypadku tunel został zbudowany z rur GRP o średnicy DN 2400, sztywności obwodowej $SN = 32000$ N/m², długości pojedynczych rur $l = 3,0$ m i grubość ich ścianki $s = 76$ mm. Budowlę wykonano na głębokość od 9 do 11 m p.p.t. Mikrotunel został podzielony na pięć odcinków, z których najdłuższy, zbudowany z zastosowaniem trzech pośrednich stacji siłowników, miał 470,5 m długości. Na wszystkich odcinkach w celu zmniejszenia tarcia przewodu o grunt iniektowano lubrykat bentonitowy. Spowodowało to, że maksymalne siły przeciskające nie przekroczyły 65 kN. W tamtych czasach (lata 2000–2003), ze względu na duży wymiar średnicy rur oraz materiał, z którego były wykonane, realizacja ta była postrzegana jako innowacyjne osiągnięcie techniczne w skali światowej [9].

W drugim przypadku zostały użyte rury betonowe. Część trasy kolektora prze-



Ryc. 4. Widok wnętrza tunelu II linii warszawskiego metra, fot. D. Ganew

biegała pod hałą widowiskową Spodek. Przedsięwzięcie przewidywało wykonanie dwóch odcinków przewodu o długościach 86 m i 296 m z rur o średnicy DN 2400 oraz czterech odcinków o długościach 362 m, 90,5 m, 331,5 m i 245,5 m z rur o średnicy DN 1600. Najtrudniejszym etapem prac była realizacja odcinka o długości 362 m, ułożonego na głębokości ok. 8,0 m p.p.t., w złożonych warunkach gruntowych, zmieniających się od gruntów piaszczystych przez żwir, gliny, rumosz gliniasty do frakcji kamienistych z przewagą otoczków i masy tłuczniowej pochodzenia nasypowego. Powodowało to, że postęp wiercenia był zmienny i wahał się w granicach od 18 do 33 m na dobę. Oba przypadki zostały szczegółowo opisane w literaturze tematu [9].

Trzeci przypadek należy analizować w kontekście całego projektu, tzn. wybudowania układu przesyłowego ścieków z lewobrzeżnej Warszawy do Oczyszczalni Ścieków „Czajka”, w skład którego wchodzi kilku zasadniczych elementów [12]:

- kolektory ogólnospławne o średnicy wewnętrznej 2800 mm, wybudowane na terenie dzielnicy Białołęka w prawobrzeżnej części Warszawy wraz z kolektorami przepięć rezerwowych o średnicy 1400 mm, przewidzianych dla transportu ścieków do pompowni Żerań i Nowodwory,
- kolektor ogólnospławny o średnicy 2160 mm, który jest przedłużeniem

syfonu, włączonym do układu opisanych powyżej kolektorów o średnicy 2800 mm,

- tunel zbiorczy o średnicy wewnętrznej 4500 mm, ułożony pod rzeką Wisłą dla przeprowadzenia syfonu wykonanego z dwóch przewodów kanalizacyjnych o średnicy 1600 mm,
 - pompownia „Farysa”, będąca żelbetową, monolityczną studnią opuszczaną o średnicy ok. 10 m i głębokości 10 m,
 - budynek krat o rzucie prostokąta, o bokach 25 m i 40 m, posadowiony na głębokości ok. 6 m,
 - zagłębiona poniżej terenu komora startowa o średnicy wewnętrznej 20 m i głębokości 43 m, zaprojektowana w technologii ścian szczelinowych o grubości 1,0 m (płyta fundamentowa komory została posadowiona na rzędnej 27 m w stosunku do 0 poziomu Wisły; komora ta była komorą startową dla realizacji tunelu),
 - komora wyjściowa o różnicowanej głębokości (6,1 m, 7,65 m i 8,75 m) na planie prostokąta o bokach 9,10 m i 36,70 m.
- Było to przedsięwzięcie o niespotykanej dotąd w Polsce skali, a nawet unikatowych cechach wśród podobnych rozwiązań na świecie. Bez wątplenia na uwagę zasługują wszystkie wyżej wymienione elementy inwestycji. W niniejszym artykule ograniczono się do przedstawienia najważniejszych informacji o kolektorach o średnicy wewnętrznej 2800 mm, wy-



Ryc. 5. Widok ronda w Katowicach nocą [20]

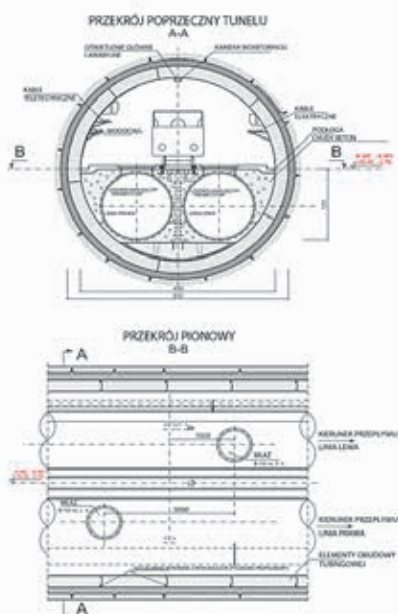


Ryc. 6. Komora robocza mikrotunelu zlokalizowana w pasie rozdziału jezdni [12]

konanych z zastosowaniem technologii mikrotunelowania oraz tunelu pod Wisłą.

Jak już napisano powyżej, jednym z elementów zadania była realizacja kolektora o średnicy wewnętrznej 2800 mm i długości 6000 m, zlokalizowanego w intensywnie zabudowanej dzielnicy Białołęka. Było to zadanie wyjątkowe, gdyż nigdy dotąd nie budowano w Polsce mikrotunelu o tak dużej średnicy. Do wykonania tunelu użyto rur z kompozytu GRP wyprodukowanych w Dąbrowie Górniczej, na specjalnie dla tego projektu wykonanej linii technologicznej. Do drążenia mikrotunelu użyto dwóch maszyn: AVN 2000 i AVN 2400, o zewnętrznej średnicy noża 3065 mm i sile nacisku 1800 t. Zaprojektowano długie odcinki pomiędzy komorami roboczymi (do 930 m długości), co znacznie zmniejszyło uciążliwości dla otoczenia wynikające z wykonywania dużej liczby komór. Na rycinie 6 przedstawiono jedną z komór wybudowaną podczas realizacji kolektora.

Głównym celem realizacji tunelu pod Wisłą było umieszczenie w nim przewodów kanalizacyjnych, syfonów, dla przerzutu



Ryc. 7. Schemat tunelu wieloprzewodowego pod Wisłą z rozmieszczonymi przewodami syfonu [12]

ścieków z lewobrzeżnej na prawobrzeżną część Warszawy w kierunku Oczyszczalni Ścieków „Czajka”. Całość systemu składa się z następujących elementów:

- zlokalizowanej na terenie lewobrzeżnej Warszawy komory wejściowej,
- tunelu wieloprzewodowego o średnicy wewnętrznej 4500 mm, ułożonego pod Wisłą,
- dwóch przewodów kanalizacyjnych o średnicy 1600 mm, ułożonych wewnątrz tunelu wieloprzewodowego,
- zlokalizowanej na terenie prawobrzeżnej części Warszawy komory wyjściowej, z umieszczonymi w niej komorami zasuw – rozprężną i połączeniową.

Tunel o średnicy wewnętrznej 4,5 m i długości 1305 m zaprojektowano jako żelbetowy. Został wykonany z tubingów przy pomocy pierwszy raz użytej w Polsce tarczy typu TBM. Schemat tunelu przedstawiono na rycinie 7.

Warto podkreślić, że opisane przedsięwzięcie zostało nagrodzone przez Międzynarodowe Stowarzyszenie Technologii Bezwykopowych (International Society of Trenchless Technology, ISTT) jako najlepszy na świecie projekt 2010 r. w kategorii instalacji bezwykopowych. Nagroda została wręczona w Berlinie w 2011 r., podczas dorocznej międzynarodowej konferencji tej organizacji (29th International No-Dig).

4.6. Budowę specjalnego przeznaczenia

4.6.1. Tunel wentylacyjny dla I linii warszawskiego metra

Technologia mikrotunelowania znajduje także w kraju zastosowania niekonwencjonalne, tzn. w metodzie pipe roofing. Pierwsze aplikacje tej metody w Polsce dotyczą jej horyzontalnego typu i miały miejsce w latach 90. XX w. przy budowie kilku tuneli komunikacyjnych wykonywanych techniką przeciskania elementów żelbetowych. Przykładami mogą tu być realizacje w latach 1997–2000 „sztucznych stropów” z mikrotuneli podczas budowy przejść podziemnych dla pieszych i tuneli drogowych [3].

Niewątpliwym osiągnięciem technicznym w budownictwie podziemnym było zastosowanie w 1998 r. metody pipe roofing do wykonania obudowy wstępnej tunelu wentylacyjnego dla obsługi metra w Warszawie. Tunel wykonano pod pięciopiętrowym budynkiem o konstrukcji szkieletowej, opartej na stopach funda-

mentowych, a zatem bardzo wrażliwej na osiadania. Dodatkowe utrudnienie wynikało z konieczności zakończenia tunelu na styku ze ścianą już wykonanego tunelu metra, co wykluczyło możliwość odbioru zmechanizowanej głowicy drążącej w szybie końcowym.

Przekrój tunelu ma wysokość 10 m, szerokość 5 m i długość 25 m. Obudowę wstępną zbudowano z 21 mikrotuneli o średnicy 800 i 1200 mm, tworzących sklepienie łukowe, przechodzące w odcinki proste w przyspągowych częściach przekroju. Projektowaną geometrią tunelu zapewniono, wprowadzając z dużą dokładnością pierwszy (pilotujący) mikrotunel o średnicy 1200 mm, który służył do naprowadzania poprzez prowadnice zamków następných mikrotuneli o średnicach 800 mm. Ze względu na nieprzewidziane występowanie otoczków i głązów o dużej twardości, których nie można było rozkruszyć zastosowaną głowicą (do urobku twardej gliny), średnice niektórych przewiertów zwiększono do 1200 mm. Stosowano wtedy specjalne urządzenie urabiające do gruntu zwartego i pozwalające na wydobycie głązów w całości. W trakcie prac mikrotunelowych dla zmniejszenia tarcia użyto lubrykatu w postaci zawiesiny bentonitowej. W końcowej fazie prac do lubrykatu dodawano cement w proporcji 1:5, co pozwoliło na wypełnienie pustek, jakie powstawały w wyniku różnicy pomiędzy średnicą noża i rur mikrotunelowych oraz kawern po otoczkach. Na rycinie 8 pokazano schemat omówionego przedsięwzięcia, a na rycinie 9 jego realizację [5].

Opisana konstrukcja pipe roofing została wykonana przez polską firmę budowlaną i niewątpliwie w tamtym czasie należała do znaczących osiągnięć technicznych. Potwierdza to zainteresowanie tym rozwiązaniem nawet po wielu latach, co miało miejsce podczas obrad kongresy ITA (International Tunnelling Association), który odbył się w Waszyngtonie w 2011 r., a zatem 13 lat później [11]. W kraju budowlana ta nie została należycie doceniona.

4.7. Zbiorniki retencyjne

Ewakuacja wód opadowych w miastach polskich stała się problemem podstawowym. Wynika to ze zmian klimatycznych, na które w dużej mierze nie mamy wpływu, gdyż jest to zjawisko globalne, oraz ze zmian charakterystyk zlewni, które to zmiany powstały w kraju

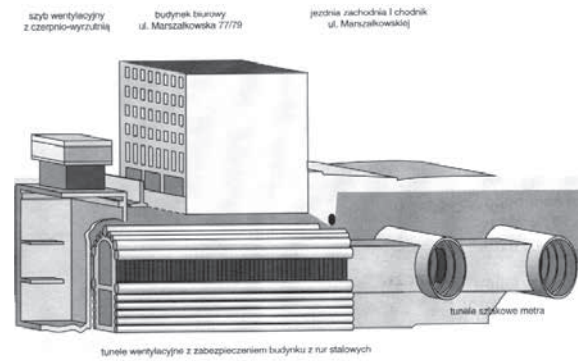
w wyniku często błędnej, nieprzemysłanej jej zabudowy. Od czasu pamiętnej powodzi w 1997 r., która miała zdarzać się raz na 500 lat, corocznie zalewane są fragmenty naszego kraju, w tym miasta. Należy tu podkreślić, że powódzie w miastach często związane są nie tylko z wylewaniem rzek, ale także z krótkotrwałymi opadami o bardzo dużej intensywności. Rozwiązanie problemu nie jest łatwe i wiąże się z dużymi kosztami. Nie analizując w niniejszej pracy szerokiego spektrum rozważań na ten trudny i często kontrowersyjny temat, skoncentrowano się na problemie podziemnych zbiorników retencyjnych. Budowle te od dawna są znane i aplikowane jako jeden ze sposobów ochrony miast lub ich fragmentów przed podtopieniami. Mogą to być rozwiązania o znacznych wymiarach, stanowiące systemy urządzeń podziemnych wybudowanych dla przetrzymania wód opadowych lub wylewających się z rzek. Do największych systemów retencyjnych zalicza się TARP (Tunnel and Reservoir Plan) w Chicago [24] i system Hirano River Flood w Osace [23].

TARP jest największym tego typu projektem XX w. Projekt rozpoczęto w 1975 r. w celu zapobieżenia częstym powodziom i problemom melioracyjnym, które dotyczyły Chicago i jego okolice. Faza I projektu obejmowała budowę tuneli, szybów, oczyszczalni wód i pompowni. W jej wyniku wyeliminowano prawie 85% zanieczyszczeń. Systemy wybudowane w tej fazie obejmują cztery tunele (Mainstream, Des Plaines, Calumet i O'Hare) o łącznej długości 176,1 km, w zakresie średnic od 2,4 do 10,8 m. Prawie wszystkie tunele zostały wykonane w utworach wapiennych, co wymagało użycia ponad 30 urządzeń TBM. Faza II składała się z budowy trzech głównych zbiorników (O'Hare, Thornton i McCook) o łącznej pojemności 69,05 mln m³. Zbiorniki stanowią element projektu melioracji okolic Chicago, ale przede wszystkim zostały zbudowane w celu zapewnienia ochrony przed powodzią, czyli do retencjonowania wód opadowych przekazywanych z tuneli. Budowę zbiornika O'Hare o pojemności 1,29 mln m³ rozpoczęto w 1990 r. i zakończono w 1998 r. Budowa zbiornika Thornton została ukończona w 2012 r. Zbiornik ma pojemność 29,9 mln m³. Zbiornik McCook, wykonywany jest w dwóch etapach i zapewni retencjonowanie do 38 mln m³ wody. Pierwszy

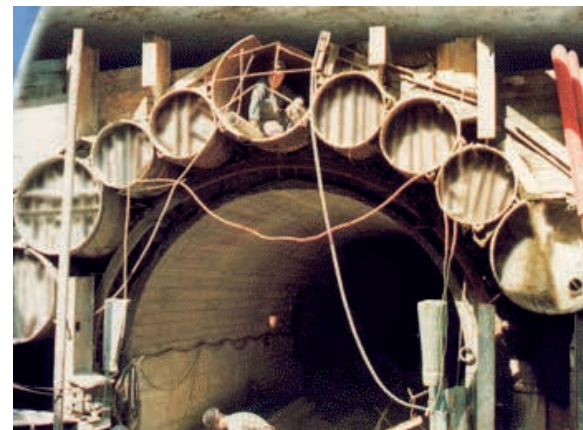
etap budowy ma się zakończyć w 2015 r., natomiast termin zakończenia drugiego etapu nie został jeszcze ustalony. Do 2008 r. całkowity koszt projektu TARP osiągnął poziom 3,5 mld USD. Przedsięwzięcie to w 1986 r. zdobyło nagrodę dla najwybitniejszego projektu inżynierii lądowej i wodnej na świecie. TARP doprowadził do znaczącej poprawy jakości wody w jeziorze Michigan i zdecydowanie ograniczył zagrożenie powodziowe [24].

Hirano River Flood to przede wszystkim tunel (o średnicy ok. 10 m) przeznaczony do retencjonowania wody opadowej. Tunel jest strategicznym elementem ochrony przed powodzią południowo-wschodniej części miasta Osaka. Realizacja projektu rozpoczęła się w 1981 r., a zakończyła w 2005 r. [23]. Kontynuacją projektu są obecnie działania polegające na tym, że nowe przewody infrastruktury sieciowej w dużej mierze są układane w tunelach wieloprzewodowych wykonywanych przy użyciu TBM na znacznych głębokościach (od 19,5 do 27,0 m), pod zabudową, istniejącymi przewodami i innymi elementami infrastruktury. Schemat takiego rozwiązania pokazano na rycinie 10. Eliminuje to kolizje z istniejącymi budowlami, a także ogranicza potrzebę rozkopywania ulic, co minimalizuje przerwy w ruchu drogowym i umożliwia – na co w Japonii kładziony jest bardzo duży nacisk – niezawodne działanie pojazdów używanych przez służby specjalne w razie katastrof i innych zagrożeń (np. pojazdy bojowe straży pożarnej, samochody pogotowia ratunkowego, policji, wojska itp.). Oryginalnym elementem projektu i jednym z jego podstawowych zadań jest retencjonowanie wód opadowych, które gromadzone są w dolnej części tuneli. Dotąd ukończono pięć odcinków takich tuneli o łącznej długości 11,2 km.

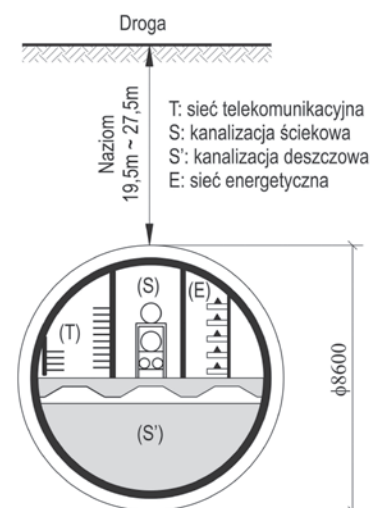
Jest oczywiste, że w kraju nie można oczekiwać budowy systemów podobnych do opisanych powyżej ze względu na wielkość naszych miast i ich budżety. Należy natomiast zastanowić się, czy wobec coraz częstszej aplikacji technologii tarczowej nie powinniśmy zacząć myśleć o budowie lokalnych, głębokich tuneli przy użyciu tego narzędzia. Obecnie budujemy wyłącznie płytkie tunele retencyjne, najczęściej wykonywane z zestawów rur, jak to pokazano na rycinie 11. Należy tu podkreślić, że ich aplikacja w warunkach miejskich ze względu na istniejące zainwestowanie jest często trudna lub niemożliwa, wobec



Ryc. 8. Schemat tunelu wentylacyjnego w Warszawie [5]



Ryc. 9. Widok konstrukcji pipe roofing w trakcie realizacji tunelu wentylacyjnego [5]



Ryc. 10. Tunel wieloprzewodowy z funkcją umożliwiającą retencjonowanie wód [23]

czego zbiorniki głębokie mogą stanowić wygodną alternatywę.

5. Podsumowanie

Jak widać, co potwierdza przeprowadzone studium literatury tematu, opóźnienia w miejskim budownictwie podziemnym w Polsce są kilkudziesięcioletnie. Szczególnie dotyczy to wielofunkcyjnych



Ryc. 11. Przykładowy zbiornik retencyjny do zabudowy w wykopie otwartym [13]

systemów zintegrowanych. Ograniczonym optymizmem napawa fakt, że w ostatnich dwóch dekadach zaczęto stosować w naszym kraju nowoczesne technologie, a wybudowane przy ich użyciu obiekty, m.in. opisane w rozdziale 4, odpowiadają standardom światowym.

Dla zapewnienia wysokiej wydajności miastom polskim należałoby jednak rozwijać i modernizować wszystkie z wymienionych w tabeli 1 funkcji lokalizowanych w przestrzeni podziemnej. Warunki techniczno-ekonomiczne w kraju wymagają ustalenia hierarchii ważności przedsięwzięć i kolejności ich wykonywania. W pierwszym etapie działania muszą obejmować podziemną infrastrukturę sieciową. Stworzenie prawidłowych wzorców eksploatacji, modernizacji i rozbudowy tego systemu jest konieczne, gdyż stanowi on obecnie podstawowy, a zarazem najbardziej wykorzystywany i awaryjny element wyposażenia miast. Również wyposażenia dodatkowe (zbiorniki retencyjne, oczyszczalnie ścieków, podstacje elektroenergetyczne, pompownie i inne) powinny być – wszędzie tam, gdzie to możliwe – lokalizowane w podziemiach miast.

Rozwiązanie problemów komunikacji zbiorowej, a także ochrony środowiska w miastach liczących ponad 500 tys. mieszkańców wymaga częściowego wyeliminowania ruchu prywatnych samochodów. Jak wykazały doświadczenia europejskich krajów wysoko rozwiniętych, najefektywniejszym sposobem rozwiązania tego problemu jest budowa szybkiej kolei podziemnej (metro). Rozwój kolejnych linii metra stymuluje również wielofunkcyjne wykorzystanie podziemi, szczególnie w sąsiedztwie stacji. Powstają, niejako w naturalny sposób, zintegrowane ze stacjami pasażerów handlowe, dające czę-

sto początek podziemnym ulicom, i przejścia dla pieszych z rozbudowaną sferą usług. Taki model rozwoju należy założyć również w warunkach polskich.

Budowle podziemne o przeznaczeniu handlowo-usługowym trzeba także projektować jako samodzielne jednostki, szczególnie w pobliżu obiektów użyteczności publicznej (dworce, kina, hale sportowe itp.). W następnym etapie, jeżeli w mieście będą rozwijane systemy podziemnego transportu, mogą one być z nimi integrowane, tworząc w konsekwencji wielofunkcyjne zagospodarowania przestrzeni podziemnej.

Literatura

- [1] Broth E.: *Unconventional use of the sub-surface illustrated by examples from Nordic countries*. Tunnel Australia 1987, Conference ITA/AITES. Melbourne, Victoria 1987.
- [2] Claes G.: *Integration des tunnels (Routiers et metro) dans les complexes souterrains*. International Symposium AITES/ITA. Warszawa 1983.
- [3] Furtak K., Kędracki M.: *Podstawy budowy tuneli*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2005.
- [4] Gwizdała K., Buca B., Pawłowski J.: *Rozpoznanie geotechniczne z uwzględnieniem doświadczeń z drążenia tunelu drogowego pod Martwą Wisłą*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 2, s. 78–80.
- [5] Gryglewicz K., Pisz R.: *Szyb wentylacyjny dla linii metra warszawskiego*. „Technologie Bezwykopowe” 1998, nr 2, s. 33–35.
- [6] Hou X., Shu Y.: *The model of underground space of the city*. The Third International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Buildings. Tongji University Press. Shanghai 1988.
- [7] Kołakowski T., Kosecki W., Leusz R., Grunt M., Piwiński J., Mazurkiewicz B.: *Konstrukcja przeprawy tunelowej pod Martwą Wisłą w Gdańsku*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2013, nr 4, s. 76–80.
- [8] Kuczyński J., Madryas C.: *A contribution to urban areas underground armour design methodology*. Underground Structures in Urban Areas, Tunnel-City'85, ITA/AITES, Contributions. Praha, Novinar, 1985.
- [9] Madryas C., Kolonko A., Szot A., Wysocki L.: *Mikrotunelowanie*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006, s. 287.
- [10] Madryas C.: *Beton w infrastrukturze podziemnej miast przyszłości*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2007, nr 4, s. 28–35.

- [11] Madryas C., Meier G., Skomorowski L., Wallmann U.: *Applications of GRP pipes for pipe roofing technology. Case study and future perspectives*. NASTT's 2011 No-Dig Show [dokument elektroniczny]. Conference proceedings, Washington, March 27–31, 2011. North American Society for Trenchless Technology, 2011, s. 1–8.
- [12] Madryas C., Wysokowski A., Gaertig M., Skomorowski L.: *Innovative tunneling and microtunnelling technologies of record parameters used in the construction of the sewage transfer system connected to the Czajka sewage treatment plant in Warsaw*. International No-Dig 2011 [dokument elektroniczny]. 29th International Conference and Exhibition, Berlin, 2–5 May 2011. International Society for Trenchless Technology, German Society for Trenchless Technology, pp. 1–12.
- [13] Materiały informacyjne firmy Hobas.
- [14] Nishi J., Kamo F., Ozawa K.: *National use of urban underground space for surface and sub-surface activities*. The Third International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Buildings. Tongji University Press. Shanghai 1988.
- [15] Ryż A., Ryż K.: *Krakowski szybki tramwaj*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2009, nr 1, s. 14–23.
- [16] Saari K., Roinisto J.: *Underground Construction in Finland*. International Congress on Large Underground Openings. Firenze 1986.
- [17] Scalise J.W.: *Earth Integrated Architecture*. The Architecture Foundation, College of Arizona State University. Tempe 1975.
- [18] Topolnicki M., Buca R.: *Realizacja i monitoring komory startowej i wyjściowej maszyny TBM*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 2, s. 71–77.
- [19] *Trasa Słowackiego – zadanie IV*. Materiały informacyjne Gdańskich Inwestycji Komunalnych (www.gik.gda.pl).
- [20] wikipedia.org/wiki/Rondo_gen.-Jerzego-Zientka-w-Katowicach
- [21] Witczyński M., Barbanti M., Grossa T., Janaszek B.: *Ponad 9 km tuneli centralnego odcinka II linii metra*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2013, nr 4, s. 70–75.
- [22] www.sztuka-architektury.pl
- [23] www.city.osaka.lg.jp
- [24] www.auca.org./monyh/project0999.html

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na 60. jubileuszowej Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2014, 14–19 września 2014 r.