

*Wojciech Grodecki**, *Cezary Madryas***, *Antoni Tajduś****,
*Andrzej Tokarz*****, *Andrzej Wichur****, *Ryszard Żyliński******

WYBRANE PROBLEMY BUDOWNICTWA PODZIEMNEGO

1. Wstęp

Wiek XX przyniósł gwałtowny rozwój budownictwa podziemnego w świecie, związany z obserwowanym w coraz większym stopniu brakiem terenów na powierzchni do budowy i rozbudowy infrastruktury komunikacyjnej szybko rozwijających się miast [7, 8]. Problemy te są zauważane coraz częściej w naszym kraju, stąd konieczność stałego bilansowania naszych osiągnięć i barier w tej dziedzinie. Osiągnięcia polskiego budownictwa podziemnego znalazły pełne odbicie na konferencjach „Budownictwo podziemne” w poprzednich latach [8, 31]. Przedstawiona praca obejmuje przede wszystkim problemy tego budownictwa, utrudniające jego rozwój.

Zagadnienia te omówiono w pięciu grupach tematycznych, tworzących rozdziały pracy:

- 1) budownictwo podziemne w skałach zwięzłych,
- 2) budowa tuneli w skałach luźnych,
- 3) zagadnienia podziemnej infrastruktury sieciowej miast,
- 4) zagadnienia projektowania geotechnicznego w budownictwie podziemnym,
- 5) relacje między budownictwem podziemnym, geotechniką i geoinżynierią.

Wnioski wynikające z rozważań zawarto w podsumowaniu.

* Politechnika Warszawska, Warszawa

** Politechnika Wroclawska, Wrocław

*** Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

**** Przedsiębiorstwo Budownictwa Górniczego ALPEX Sp. z o.o., Jastrzębie Zdrój

***** Politechnika Śląska, Gliwice

2. Budownictwo podziemne w skałach zwięzłych

Podstawowa część potencjału budownictwa podziemnego w skałach zwięzłych w Polsce skupiona jest na wykonywaniu wyrobisk górniczych związanych z udostępnieniem złóż lub partii złoża znajdującej się w obszarze nadania danej kopalni. W wyniku przedsięwzięć organizacyjnych podjętych w ostatnich latach nastąpiło ograniczenie zapotrzebowania na roboty budownictwa podziemnego górniczego, czego wymownym świadectwem jest stabilizacja wartości wskaźnika natężenia robót przygotowawczo-udostępniających na poziomie rzędu 4,0 m/1000 ton wydobywania węgla kamiennego [14]. Na tej podstawie można oszacować długość wyrobisk niezbędnych do wykonania, dla utrzymania funkcjonalności kopalń — w chwili obecnej wynosi ona (w stosunku rocznym) ok. 450 km wyrobisk korytarzowych, w tym ok. 45 km wyrobisk kamiennych, 338 km wyrobisk kamiennie-węglowych i 67 km wyrobisk węglowych. Obecnie wśród specjalistów dominuje pogląd, że zapotrzebowanie na roboty budownictwa podziemnego górniczego spadło do najniższego technicznie poziomu, co odbija się niekorzystnie na strukturze kopalni (zagadnienie eksploatacji podpoziomowej).

Konsekwencją wspomnianych powyżej procesów jest fakt, że technologie górnicze stosowane w przypadku lokalizacji wyrobisk w skałach zwięzłych w zasadzie od lat pozostają na tym samym stopniu rozwoju. Niestety nie udało się do tej pory dopracować systemów mechanizacji robót udostępniających czy przygotowawczych, które pozwoliłyby na skrócenie czasu poszczególnych operacji technologicznych (skracając także czas wykonania cyklu) i zmniejszenie pracochłonności robót.

Według pracy [33] czasochłonność poszczególnych operacji przy stosowaniu klasycznej technologii drążenia przedstawia się następująco:

- wiercenie otworów strzałowych 25%,
- wykonywanie robót strzałowych 10%,
- wybieranie urobku 40%,
- wykonywanie obudowy tymczasowej 12%,
- zabudowa odrzwi 13%.

Wynika stąd, że najbardziej pracochłonną czynnością jest wybieranie urobku związane z generacją maszyn stosowanych do wybierania. W technologii drążenia wyrobisk do dnia dzisiejszego stosuje się ładowarki zgarniakowe, których wydajność niestety nie odpowiada obecnym standardom. Stosowane ładowarki bocznie sypiące polskiej konstrukcji typu ŁBT z wysięgnikiem teleskopowym są na pewno rozwiązaniem umożliwiającym uzyskanie lepszych postępów ładowania urobku i znacznego skrócenia czasu trwania tej operacji technologicznej.

Kolejnym zadaniem, które stoi przed inżynierami zajmującymi się problematyką drążenia wyrobisk korytarzowych, jest problem skrócenia czasu wiercenia otworów strzałowych. Zdaniem autorów to zadanie jest obecnie podstawowym problemem budownictwa

podziemnego górniczego. Zastosowanie wozów wiertniczych mogłoby znacznie skrócić czas wiercenia, lecz wymaga to nakładów inwestycyjnych, na które niestety nie mogą sobie pozwolić firmy budownictwa górniczego.

W latach 80. XX w. podjęto próby modernizacji maszyn ładujących, łącząc systemy ładowania i wiercenia otworów strzałowych poprzez wymianę organów. Próby te wykazały niestety, że wymiana organów urządzeń trwa tak długo, że czas wymiany nie może zrekompenzować postępów drążenia, które do dziś kształtują się na poziomie 50÷60 m/miesiąc w przypadku wyrobisk kamiennych, 80÷90 m/miesiąc w przypadku wyrobisk kamiennie-węglowych i ok. 180÷200 m/miesiąc w przypadku wyrobisk węglowych drążonych z zastosowaniem kombajnu.

Drążenie wyrobisk górniczych z wykorzystaniem kombajnów wysięgnikowo-głowicowych jest z punktu widzenia technologii najbardziej nowoczesnym rozwiązaniem technologicznym — odpowiadającym wymogom dnia dzisiejszego. W Polsce najbardziej rozpowszechnionym systemem kombajnowym do drążenia wyrobisk korytarzowych są kombajny wysięgnikowo-głowicowe typu AM — od AM-50 do AM-105. Próby stosowania kombajnów typu Paurat i Dosco niestety nie potwierdziły walorów eksploatacyjnych tych maszyn i wyniki ekonomiczno-finansowe ich zastosowania były niezadowalające.

Czy opłacalne zatem jest stosowanie kombajnów? Tak, pod warunkiem, że wybieg wyrobiska i parametry wytrzymałościowe skał pozwalają na dodatnie efekty finansowe.

Rozwój budownictwa podziemnego niegórniczego w skałach zwięzłych napotyka szereg barier, z których najważniejszymi są:

- ograniczenia natury finansowej,
- ograniczenia wynikające ze świadomości decydentów,
- ograniczenia natury prawnej.

Bariery natury finansowej w tej chwili posiadają największe znaczenie. Występujący obecnie powszechnie w naszej gospodarce niedobór środków finansowych powoduje spychanie na dalszy plan perspektywicznych inwestycji proekologicznych (np. tunele), co hamuje rozwój budownictwa podziemnego. W świadomości decydentów uzyskało „prawo obywatelstwa” przekonanie, że w chwili obecnej najważniejsze są te inwestycje, które przynoszą doraźne korzyści, i te inwestycje są przede wszystkim realizowane. Zapomina się niekiedy o tym, że taki tok rozumowania może przynieść szkody w następnych latach.

Do barier w świadomości decydentów można zaliczyć pokutujące od wielu lat przekonanie o braku doświadczenia polskiej kadry technicznej w stosowaniu nowoczesnych technologii budowy obiektów podziemnych oraz przekonanie o wysokich kosztach realizacji takich obiektów. O bezzasadności pierwszego z nich świadczą dotychczasowe dokonania budownictwa podziemnego [8]. Drugie przekonanie ma swoje źródło w bardzo powierzchownej analizie kosztów. Jest oczywiste, że zwykle (nie zawsze) koszty inwestycyjne budowy podziemnej są wyższe — jednak gdy weźmiemy pod uwagę koszty eksploatacji w ciągu całego okresu użytkowania budowli podziemnej oraz jej walory ekologiczne, to bilans ogólny będzie w większości przypadków korzystny dla budownictwa podziemnego

(por. [34]). Jest rzeczą nie do pomyślenia w dzisiejszych czasach, aby projektanci i inwestorzy w rozwiązaniach połączeń komunikacyjnych unikali budowy tuneli, pomimo korzystnych warunków technicznych, ekonomicznych, ekologicznych i użytkowych. Przykładem negatywnym może być Centralna Magistrala Kolejowa w rejonie Jury Krakowsko-Częstochowskiej, gdzie zamiast tunelu o długości 1,2 km wykonano objazd, wydłużając trasę linii kolejowej o ok. 10 km. Obecnie przy projektowaniu i budowie drogi Kraków – Zakopane ogranicza się do minimum długość odcinków tunelowych, mimo że rozwiązania tunelowe są korzystniejsze pod względem eksploatacyjnym i ekologicznym.

Nie od rzeczy będzie także wspomnieć o tym, że na decyzje dotyczące inwestycji budownictwa podziemnego ma również wpływ... polityka. Inwestycje te zwykle są długoterminowe, wykraczające poza kadencję władz politycznych. I to w wielu przypadkach przesądza sprawę, powstrzymując decydentów od podejmowania decyzji inwestycyjnych.

Do barier natury prawnej można zaliczyć natomiast pozbawienie specjalistów budownictwa podziemnego o wykształceniu górniczym (chodzi o wykształcenie nabyte w ramach odpowiednich specjalności związanych z budownictwem podziemnym) możliwości ubiegania się o uprawnienia budowlane. Jest zdumiewające w kraju, w którym wykonano tyle obiektów budownictwa podziemnego rękami specjalistów górników, że ludzie ci nie mogą zdobyć uprawnień budowlanych w specjalności związanej z budownictwem podziemnym. U naszych południowych sąsiadów (Czechy i Słowacja) sytuacja ta wygląda zupełnie inaczej — specjaliści budownictwa podziemnego o wykształceniu górniczym mają pełne możliwości uzyskania uprawnień do projektowania i wykonywania tuneli.

Szczęśliwym trafem ostatnich lat było wykorzystanie kwalifikacji polskich górników do wykonywania obiektów budownictwa podziemnego za granicą. Do dnia dzisiejszego mamy opinię solidnego partnera w budowie obiektów na terenie Algierii, Turcji, b. Jugosławii. I dzisiaj w ekstremalnych warunkach geologiczno-górniczych nasi specjaliści budownictwa podziemnego stanowią kadrę inżyniersko-techniczną o pożądanym kwalifikacjach.

3. Budowa tuneli w skałach luźnych (gruntach)

3.1. Uwagi ogólne

W skałach luźnych (gruntach) możliwe jest zastosowanie odkrywkowych, tarczowych i klasycznych górniczych metod drażenia, przy czym klasyczne metody górnicze mają w tym przypadku bardzo ograniczony zakres stosowania ze względu na małą szybkość drażenia, wysoki koszt wykonania oraz stosunkowo duże osiadanie powierzchni przy niewielkim zagłębieniu budowanego tunelu — metody te nie będą w dalszej części omawiane.

3.2. Metody odkrywkowe

Metody te polegają na wykonaniu wykopu z powierzchni terenu z jednoczesnym zapewnieniem stateczności jego pionowych skarp, wykonaniu konstrukcji — obudowy tunelu w tak powstałym wykopie, a następnie jego zasypaniu, z dobrym zagęszczeniem zasypki.

Zapewnienie stateczności ścian wykopu może być zrealizowane za pomocą tzw. ścianki berlińskiej, ścian szczelinowych — betonowanych na miejscu lub prefabrykowanych, ściemek szczelnych, ścian w postaci pali itp. We wszystkich wymienionych przypadkach ściany wykopu, z uwagi na jego głębokość, są rozpierane lub kotwione.

Najpopularniejsze wśród metod odkrywkowych, najczęściej stosowane w warunkach miejskich są: metoda berlińska, której pierwsze zastosowanie miało miejsce w Berlinie w latach 30. XX wieku podczas budowy metra, i metoda ścian szczelinowych, początkowo zwana metodą metra mediolańskiego, bowiem na dużą skalę była po raz pierwszy zastosowana właśnie w Mediolanie. Metoda ścian szczelinowych, w której rolę czynnika stabilizującego pionowe ściany gruntowe spełnia zawieszina ilowa (bentonitowa), w swej odmianie stropowej (oparcie stropu na wcześniej wykonanych ścianach, zasypianie stropu i urabianie gruntu z pozostałej części przekroju przyszłego tunelu pod stropem) jest obecnie najchętniej stosowana w miastach [16, 17, 27]. Pozwala ona na ograniczenie zakłóceń w ruchu na powierzchni terenu i przywracanie najszybciej pierwotnego lub projektowanego jego zagospodarowania.

3.3. Metody tarczowe

Początki metody tarczowej sięgają lat 20. XIX wieku i wynalezienia przez M.J. Brunela tarczy jako przesuwnej obudowy tymczasowej, zastępującej nieruchomą, drewnianą obudowę tymczasową, stosowaną w klasycznych górniczych metodach budowy tuneli. Tak rozumiana tarcza, zapewniająca bezpieczeństwo robót, przesuwana jest za pomocą dźwigników hydraulicznych w miarę postępu robót ziemnych. Urabianie gruntu odbywa się ręcznie, zaś stateczność przodka zapewnia jego zabudowa wraz z odpowiednim rozparciem. Stąd niekiedy w literaturze technicznej tarcze takie nazywa się ręcznymi. Montaż obudowy za pomocą erectora odbywa się pod osłoną płaszcza tarczy.

Jeśli grunt w przodku jest samostateczny, jego urabianie może odbywać się np. za pomocą przystosowanych gabarytowo koparek lub głowic do punktowego skrawania gruntu. W takim przypadku mówi się o tarczach częściowo zmechanizowanych, pozwalających na większy postęp robót w porównaniu z tarczami ręcznymi.

Zarówno w tarczach ręcznych, jak i częściowo zmechanizowanych, tzw. otwartych, tj. ze swobodnym dostępem do przodka, grunt musi być albo suchy, albo konieczne jest wcześniejsze obniżenie zwierciadła wody gruntowej poniżej spągu drążonego tunelu.

Bardziej rozwiniętymi tarczami są tarcze zmechanizowane — zautomatyzowane. Wspólną ich cechą jest urabianie gruntu pełnym przekrojem za pomocą obrotowej głowicy skrawającej. Tarcze te noszą angielską nazwę TBM (*Tunnel Boring Machines*). W warunkach gruntów stabilnych, niezawodnionych stosowane są TBM otwarte, natomiast w przypadku gruntów zawodnionych lub niestabilnych, w rozumieniu braku samostateczności przodka, stosowane są TBM z komorą roboczą i znajdującą się w niej głowicą urabiającą oddzieloną od wnętrza tarczy ścianką ciśnieniową. Jest to przykład TBM zamkniętej.

W tym przypadku rozróżnia się dwa rodzaje TBM:

- 1) zawieszinowa (*slurry type*),
- 2) wyrównanych ciśnień gruntowych EPB (*Earth Pressure Balance*).

W pierwszym rodzaju TBM rolę czynnika zapewniającego stateczność przodka (nie dopuszczającego do obwałowań, a co za tym idzie — do niekontrolowanych osiadań gruntu nad budowanym tunelem) spełnia, podobnie jak w metodzie ścian szczelinowych, zawiesina bentonitowa. By móc zrównoważyć parcie gruntu i wody gruntowej zawiesina jest poddawana odpowiedniemu ciśnieniu przez poduszkę sprężonego powietrza. Urobek zmieszany z zawiesiną bentonitową jest wypompowywany z komory roboczej i systemem rurociągów doprowadzany do zakładu separacji, urządzonego na powierzchni terenu. Separacja urobku od zawiesiny odbywa się na sitach wibracyjnych i w wirówkach, po czym zawiesina jest przekazywana do zakładu jej regeneracji. Tu po zbadaniu jej założonych właściwości albo powraca bezpośrednio do komory roboczej TBM systemem rurociągów, albo po zregenerowaniu — m.in. odpiaszczeniu i dodaniu świeżej zawiesiny — powraca w to samo miejsce. Ciśnienie powietrza — poduszkę powietrzną w komorze roboczej (w miejscu między ścianką ciśnieniową a kontaktową) — wywiera zespół sprężarek ustawionych najczęściej również na powierzchni terenu.

W tarczy wyrównanych ciśnień gruntowych EPB rolę czynnika zapewniającego stateczność przodka spełnia urobiony przez głowicę grunt, który w całości wypełnia komorę roboczą. W miarę postępu robót grunt usuwany jest z komory za pomocą szczelnie obudowanego przenośnika ślimakowego. Zachodzi delikatna równowaga pomiędzy przesuwem tarczy a ilością urobku odebranego z komory roboczej przez przenośnik.

Pierwsze tego typu tarcze natrafiały na trudności w pracy w gruntach pozbawionych spójności, bowiem znaczne opory ruchu TBM, wymagane momenty obrotowe głowicy skrajającej i przenośnika ślimakowego powodowały zaklinowywanie się tarcz lub konieczne było znaczne zwiększenie mocy silników elektrycznych, a więc wydatkowanie dużych ilości energii. Stąd udoskonalenie pierwszych typów EPB, mające na celu poprawienie cech urabianego gruntu w kierunku zmniejszenia powodowanych przezeń oporów. Tak powstała TBM — tarcza plastyfikatorowa. Jej istotną cechą jest nadanie urabianemu gruntowi plastyczności i wodonierzepuszczalności poprzez wprowadzenie tzw. plastyfikatora. Jego skład zależy od rodzaju urabianego gruntu i może opierać się na mieszaninie wody, gliny i bentonitu bądź na wodnych roztworach żywic syntetycznych. Plastyfikator wstrzykiwany jest bezpośrednio przed głowicę urabiającą, do komory wypełnionej urobionym gruntem i do przenośnika ślimakowego.

W celu zapewnienia stateczności przodka i niedopuszczenia do infiltracji wody gruntowej do tunelu podczas pracy tego typu tarczy muszą być prowadzone stałe pomiary kontrolne najważniejszych wielkości. Analiza wyników tych pomiarów pozwala na właściwe sterowanie tarczą i jej głównymi urządzeniami.

Przeprowadza się pomiary:

- parcia gruntu i wody gruntowej w przodku — do tej wartości dostosowuje się parametry urabiania gruntu, jego usuwania z komory roboczej itp.;
- nacisku głowicy urabiającej oraz jej prędkości obrotowej — służą one bezpośrednio sterowaniu tarczą, tj. jej postępem;
- ciśnienia gruntu z plastyfikatorem w komorze roboczej, a także ciśnienia samego plastyfikatora — daje to podstawę do regulacji obrotów przenośnika ślimakowego.

Ponadto dokonuje się pomiarów kontrolnych następujących wielkości:

- prędkości przesuwu tarczy,
- prędkości obrotowej przenośnika ślimakowego,
- prędkości obrotowej zasobnika z obrotowym zaworem kulistym, poprzez który urobek usuwany jest z przenośnika ślimakowego na środki transportowe,
- ilości wstrzykiwanego plastyfikatora do komory roboczej w jednostce czasu itp.

Sporadycznie sprawdza się też konsystencję usuwanego urobku, jego stopnia zmieszania z plastyfikatorem oraz innych parametrów geotechnicznych, decydujących o zachowaniu stateczności przodka.

TBM wyrównanych ciśnień gruntowych z plastyfikatorem znajduje zastosowanie we wszystkich rodzajach gruntów, w szczególności dobrze sprawdza się w najtrudniejszych warunkach, np. w zawodnionych piaskach i żwirach. Właściwy dobór plastyfikatora pozwala na powstrzymanie hydrostatycznego parcia wody gruntowej odpowiadającego 100 m słupa wody.

W porównaniu z innymi typami TBM pochod EPB wywołuje najmniejsze osiadania terenu.

4. Zagadnienia podziemnej infrastruktury sieciowej miast

Pierwsze sieci podziemnych przewodów w polskich miastach metropolitalnych zaczęto budować na przełomie XIX i XX wieku. W większości są to systemy wielokrotnie modernizowane i przebudowywane w celu dostosowania ich do potrzeb wynikających z cywilizacyjnego rozwoju społeczeństwa. Stąd też wybudowane zostały w różnych okresach, z bardzo wielu materiałów o bardzo zróżnicowanych cechach (kamienia, cegły, betonu, polimerobetonu, kamionki, żeliwa, PEHD, PVC, GRP), co powoduje ogromne komplikacje z utrzymaniem wymaganego stanu konstrukcji tych systemów. Uszkodzenia konstrukcji przewodów skutkują wieloma negatywnymi następstwami dla środowiska otaczającego sieć.

Położenie sieci pod nawierzchniami ulic na głębokościach od 2 do 10 m, a w szczególności przewodów kanalizacji grawitacyjnej, powoduje ogromne trudności lub wręcz uniemożliwia zmianę położenia przewodów w przypadku potrzeby budowy innych obiektów podziemnych. Te cechy są podstawową przyczyną ograniczającą budowanie np. podziemnych przejść dla pieszych czy płytkich tuneli komunikacji samochodowych. Stały się natomiast bodźcem dla dynamicznego rozwoju bezwykopowych technologii i technik odnawiania i badania stanu technicznego konstrukcji przewodów [9, 11].

Szczególnie duży ciężar spoczywa na opracowaniu strategii przystosowania sieci kanalizacyjnych dla potrzeb miasta przyszłości [12, 13]. Kolektory tej struktury, w odróżnieniu od innych przewodów, mają często bardzo duże wymiary przekroju poprzecznego — nieraz zbliżone do wymiarów tuneli komunikacyjnych (np. kolektor „Odra” we Wrocławiu). Jest to zatem system, gdy weźmie się pod uwagę studzienki rewizyjne, przepompow-

nie, zbiorniki retencyjne i inne urządzenia, zajmujący w polskich miastach (w których nie ma rozwiniętej sieci metro) największą część podziemnego zainwestowania. Stąd też, dla przystosowania naszych miast do intensyfikacji budownictwa podziemnego, konieczne jest w pierwszej kolejności podjęcie prac badawczych w kierunku udoskonalenia procesu eksploatacji, modernizacji i ewentualnej przebudowy sieci kanalizacyjnych. Bez takich działań zrównoważony rozwój aglomeracji miejskich nie będzie możliwy.

Wychodząc naprzeciw tym potrzebom, można postawić następujące cele badań:

- określenie działań doraźnych umożliwiających poprawę niezawodności funkcjonowania sieci;
- określenie prognoz dotyczących stanu technicznego obiektów najbardziej zagrożonych w celu optymalnego planowania środków na odnowę systemów i poprawę ich niezawodności w dłuższej perspektywie czasowej;
- optymalny dla zadanych warunków brzegowych dobór:
 - technologii odnawiania sieci,
 - rozwiązań materiałowych,
 - zakresów i form przebudowy lub modernizacji sieci (w tym tworzenie systemów zintegrowanych, np. tuneli zbiorczych) w celu przystosowania jej do nowych programów zagospodarowania przestrzeni podziemnej.

Tematyka opisanego kierunku badań ściśle wiąże się z priorytetami przedstawionymi w opracowaniach:

- *Propozycja obszaru badawczego nr 3.5 do krajowego programu ramowego, Polskiej Platformy Technologicznej Budownictwa, a w szczególności, z kierunkiem nowe koncepcje, systemy, technologie i procesy optymalizujące „life cycle cost” dla budynków i infrastruktury,*
- *The Cities Below the Cities* — propozycji Europejskiej Platformy Technologicznej Budownictwa do 7 PR, a w szczególności z następującymi kierunkami tego dokumentu:
 - *zgromadzenie pełnej wiedzy o wszystkich aspektach funkcjonowania podziemnych wyposażzeń (w tym sieci) i stworzenie na tej podstawie systemów inteligentnych,*
 - *opracowanie zasad i systemu permanentnego monitorowania podziemnych wyposażzeń (w tym sieci) dla stworzenia bazy danych umożliwiających prognozowanie napraw konstrukcji bez przerywania pracy urządzeń i tworzenia utrudnień w funkcjonowaniu miast.*

Program *The Cities Below The Cities* ściśle wiąże się z podniesieniem jakości transportu dóbr i ludzi w ramach projektu *Trans European Road Network* (TREN). Zgodnie z tym projektem przewidziano do 2030 roku budowę w miastach 2100 km tuneli komunikacyjnych, liczne parkingi podziemne, podziemne koleje (metro) i wynikającą stąd konieczność budowy, przebudowy i modernizacji ogromnej ilości infrastruktury sieciowej.

O skali problemu w zakresie przystosowania infrastruktury sieciowej do tych zamieżeń może świadczyć statystyka dotycząca budowy pierwszego odcinka metro w Warszawie o długości 21 km. Realizacja tego zadania będzie wymagała przebudowy:

- 17 km sieci kanalizacyjnych,
- 17 km sieci wodociągowych,
- 15,8 km sieci gazowych,
- 6,3 km sieci ciepłowniczych.

Jak wynika z przedstawionej analizy problemu, przystosowanie polskich miast do europejskich oczekiwań w zakresie standardów życia wymaga ogromnej, zdecydowanie większej niż w wielu krajach Europy Zachodniej, intensyfikacji badań naukowych. Opisywany kierunek poszukiwań bez wątpienia wychodzi naprzeciw tym potrzebom i dotyczy jednego z najważniejszych elementów podziemnego wyposażenia miast — infrastruktury sieciowej.

5. Zagadnienia projektowania geotechnicznego w budownictwie podziemnym

Zgodnie z normą [19] geotechnika jest to „interdyscyplinarna dziedzina nauki i techniki dotycząca zachowania się i badań podłoża gruntowego oraz materiałów gruntowych do celów projektowania, wykonawstwa i kontroli budowli ziemnych i podziemnych, fundamentów konstrukcji budowlanych, nawierzchni drogowych, linii kolejowych, lotnisk itp.”. Przez podłoże gruntowe z kolei rozumie się [19] „grunt rodzimy, antropogeniczny lub skałę, istniejące na miejscu budowy przed wykonaniem prac budowlanych w strefie, której właściwości mają wpływ na projektowanie, wykonanie i eksploatację budowli”.

Wynika stąd, że geotechnika swoim zakresem obejmuje „zachowanie się i badania” skał i górotworu wokół budowli podziemnych (w szczególności tuneli).

Zgodnie z istniejącym w kraju porządkiem prawnym prace projektowe w budownictwie podziemnym (a mówiąc bardziej precyzyjnie — prace przy projektowaniu drogowych obiektów inżynierskich) obejmują:

- lokalizację obiektów inżynierskich,
- opracowanie dokumentacji geologicznej,
- opracowanie dokumentacji geotechnicznej,
- projektowanie budowli podziemnych,
- projektowanie obudowy budowli podziemnych.

Lokalizacja obiektów inżynierskich powinna spełniać wymagania rozporządzenia [26] i dokonywana jest przez uprawnionego projektanta odpowiedniej specjalności budowlanej.

Dokumentacja geologiczna obejmuje dokumentację geologiczno-inżynierską i dokumentację hydrogeologiczną.

Dokumentację geologiczno-inżynierską sporządza się dla [29]:

- określenia warunków geologicznych dla potrzeb zagospodarowania przestrzennego,
- ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych,
- magazynowania i składowania substancji oraz odpadów.

Rozporządzenie [22] nakłada obowiązek opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla obiektów zaliczonych do trzeciej kategorii geotechnicznej oraz w złożonych warunkach gruntowych do drugiej kategorii.

Dla budownictwa podziemnego największe znaczenie ma ustalenie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych i warunki geologiczne dla magazynowania i składowania substancji oraz odpadów.

Dokumentację hydrogeologiczną sporządza się m.in. w celu [29] określenia warunków hydrogeologicznych w związku z:

- projektowaniem odwodnień budowlanych otworami wiertniczymi,
- projektowaniem inwestycji mogących zanieczyścić wody podziemne,
- magazynowaniem i składowaniem na powierzchni lub w górotworze substancji oraz odpadów.

Zakres dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej jest określony rozporządzeniem [23]. Dokumentacja geologiczna i geologiczno-inżynierska jest sporządzana przez uprawnionego geologa.

Dokumentacja geotechniczna jest to [18] „dokumentacja powstała na podstawie zespołu czynności badawczych, wykonywanych w celu określenia rodzaju, właściwości, cech wytrzymałościowych i odkształcalności gruntów, ich zmienności, poziomu wody gruntowej oraz stateczności wykopów i nasypów”. Badania geotechniczne obejmują [18] „roboty terenowe niewywołujące negatywnych zmian środowiska naturalnego, jak małośrednicowe wiercenia geotechniczne, sondowania statyczne i dynamiczne, badania presjometrem i dylatometrem, geofizyczne (bez użycia materiałów wybuchowych), odkrywki fundamentów, wykopy badawcze oraz laboratoryjne określanie cech fizycznych, mechanicznych i chemicznych gruntów i wód gruntowych itp.”.

Badania geotechniczne są poprzedzone opracowaniem „programu badań geotechnicznych” [18], który uzależnia zakres badań od „kategorii geotechnicznej”, określanej jako [18] „kategoria zagrożenia bezpieczeństwa obiektu wynikająca ze stopnia skomplikowania projektowanej konstrukcji, jej fundamentów i oddziaływań oraz warunków geotechnicznych, mająca wpływ na zaprogramowanie rodzaju i zakresu badań geotechnicznych, obliczeń projektowych i kontroli konstrukcji”.

Rozróżnia się następujące stopnie złożoności warunków gruntowych [18, 22]:

- proste,
- złożone,
- skomplikowane.

W oparciu o określenie stopnia złożoności warunków geotechnicznych zdefiniowano kategorie geotechniczne, przy czym tunele zostały przyporządkowane do II i/lub III kategorii geotechnicznej [18]:

- kategoria II obejmuje konstrukcje i fundamenty niepodlegające szczególnemu zagrożeniu, w prostych lub złożonych warunkach gruntowych przy mało skomplikowanych przypadkach obciążenia; konstrukcje te są przeważnie projektowane i wykonywane z zastosowaniem powszechnie stosowanych metod, m.in. tunele w twardych niespękanych skałach, nie wymagające pełnej szczelności lub spełnienia innych specjalnych warunków;
- kategoria III obejmuje obiekty bardzo duże czy rzadko występujące, wrażliwe na osiadania, konstrukcje w skomplikowanych warunkach gruntowych lub konstrukcje obciążone nadzwyczajnym ryzykiem nawet w prostych lub złożonych warunkach, obiekty na terenie działania czynnych procesów geologicznych, czynnych szkód górniczych, konstrukcje zagrażające środowisku, m.in. tunele w skałach miękkich i spękanych, obciążone wodami naporowymi lub wymagające szczelności.

Zawartość dokumentacji geotechnicznej szczegółowo określa norma [18]. Wynikową częścią dokumentacji geotechnicznej jest „geotechniczna ocena warunków posadowienia”, która wchodzi w skład opracowywanego w dalszej fazie projektowej projektu budowlanego. Zakres tej oceny jest określony rozporządzeniem [22] oraz normą [18].

Zgodnie z rozporządzeniem [22] ustalanie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych obejmuje:

- fundamentowanie obiektów budowlanych,
- określanie nośności i stateczności podłoża gruntowego,
- ustalanie i weryfikację wzajemnego oddziaływania obiektu budowlanego i podłoża gruntowego w różnych fazach budowy i eksploatacji,
- ocenę stateczności skarp, wykopów i nasypów oraz ich zabezpieczania,
- wybór metody wzmocnienia podłoża gruntowego,
- ocenę oddziaływania wód gruntowych na budowlę,
- ocenę gruntów stosowanych w robotach ziemnych,
- wybór metody podtrzymywania skarp, wykonywanie barier uszczelniających.

Geotechniczne warunki posadawiania obiektów budowlanych ustala się w celu uzyskania danych [22]:

- dotyczących budowy i parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego współpracującego z projektowanym obiektem i w strefie oddziaływania projektowanych robót,
- umożliwiających rozpoznanie zagrożeń mogących wystąpić w trakcie robót budowlanych lub w ich wyniku,
- wymaganych do bezpiecznego i racjonalnego zaprojektowania i wykonania obiektu budowlanego.

Zgodnie z normą [18] geotechniczna ocena warunków posadowienia definiowana jest jako „integralna część projektu budowlanego służąca do właściwego i bezpiecznego zaprojektowania obiektu na podstawie przeprowadzonego rozpoznania podłoża”. W dalszej części norma [18] precyzuje, że ocena ta „obejmuje określenie kategorii geotechnicznej budowli lub jej fragmentów, zestawienie informacji i danych liczbowych właściwości gruntów oraz wartości charakterystycznych i obliczeniowych parametrów geotechnicznych gruntów w podłożu i bezpośrednim otoczeniu obiektu; zawiera zalecenia konstrukcyjne dotyczące: wykonawstwa robót ziemnych i fundamentowych, prognozy współdziałania konstrukcji z podłożem, zachowania się podłoża w czasie budowy i eksploatacji — w odniesieniu do konkretnego obiektu, a także dane dotyczące koniecznej ochrony gruntów i wód przed zanieczyszczeniem; jest ustalana na podstawie wszystkich dostępnych danych geologicznych i geotechnicznych”. Geotechniczna prognoza zjawisk w podłożu jest określana jako [18] „wstępnie przewidywana ocena współpracy obiektu budowlanego z podłożem, uwzględniająca zmiany w podłożu jakie mogą powstać wskutek wykonywania obiektu”. Najczęściej obejmuje ona następujące elementy i zjawiska [18]: „odkształcenie współpracującego układu konstrukcja — podłoże, zmiany warunków wodnych, skurcz i pęcznienie, powierzchniowe ruchy mas ziemnych (osuwiska, zsuwy, pełzanie itp.), osiadanie zapadowe, zmiany termiczne w gruncie, szkody górnicze, skutki technologiczne robót (wpływ wibracji, konsolidacji itp.)”.

Specjaliści budownictwa podziemnego bez trudu rozpoznają w tym miejscu pewne elementy, które znajdują zastosowanie w przypadku budowli podziemnej (w szczególności tunelu): ocena stateczności odsłoniętych ścian budowli podziemnych, ocena stateczności nieobudowanej zabierki oraz projekt obudowy technologicznej (wstępnej lub tymczasowej) budowli podziemnej, określenie obciążeń, dobór i ocena możliwości zastosowania obudowy ostatecznej budowli podziemnej, a w uzasadnionych przypadkach — projekt obudowy ostatecznej budowli podziemnej.

Ustalanie geotechnicznych warunków posadawiania obiektu budowlanego powinno być dokonane przez „osobę upoważnioną, na podstawie odrębnych przepisów” [22]. Do chwili obecnej brak jest odpowiednich uregulowań prawnych. Krok w tym kierunku stanowi wprowadzenie decyzją z dnia 10.12.2002 r. Ministerstwa Pracy i Polityki Społecznej do rejestru zawodów — zawodu „inżynier geotechnik”. Zgodnie z tym zapisem jest to „inżynier budownictwa, zajmujący się projektowaniem geotechnicznym oraz specjalistycznymi badaniami gruntu w laboratorium i w terenie, w ramach ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych i wykonawstwa robót specjalistycznych w budownictwie, ochronie środowiska, transporcie oraz górnictwie odkrywkowym i kopalnianym”. Cel wykonywania tego zawodu decyzja ta określa następująco: „zapewnienie bezpieczeństwa obiektów budowlanych w zakresie projektowania, wykonawstwa fundamentów, robót ziemnych i podziemnych oraz specjalistycznych robót geotechnicznych”. Jest rzeczą dziwną, że inżynier geotechnik jest zdefiniowany jako inżynier budownictwa — zapomina się o geotechnikach posiadających wykształcenie geologiczne i górnicze.

Należy oczekiwać pewnych zmian w uregulowaniach prawnych geotechniki w związku z wprowadzaniem systemu norm europejskich [3, 28]. W skład tego systemu wchodzi

m.in. EN 1997 Eurokod 7 — *Projektowanie geotechniczne*, obejmujący trzy normy [4, 5, 6] oraz normy z grupy *Wykonawstwo specjalistycznych robót geotechnicznych (Execution of special geotechnical works)*, obejmujące pale wiercone, kotwy gruntowe, ściany szczelinowe, ścianki szczelne, pale przemieszczeniowe, iniekcje, *Jet grouting*, prefabrykowane pale betonowe, mikropale oraz grunt zbrojony. Zwraca uwagę brak normy dotyczącej tunelarstwa.

Projektowanie budowli podziemnych wychodzi poza zakres projektowania geotechnicznego. Krajowy system projektowania tych budowli opiera się na warunkach technicznych ustanowionych odpowiednimi rozporządzeniami właściwych ministrów [21, 24, 25, 26]. Zgodnie z ostatnią nowelizacją rozporządzenia [20] „uprawnienia budowlane w specjalności mostowej stanowią podstawę do projektowania lub kierowania robotami budowlanymi: mostów, wiaduktów, estakad, kładek, tuneli, przejść podziemnych, przepustów, konstrukcji oporowych wraz z nieskomplikowanymi odcinkami dróg stanowiącymi bezpośrednio dojazdy do tych budowli”.

6. Budownictwo podziemne, geotechnika i geoinżynieria

Od pewnego czasu intensywnie rozwija się interdyscyplinarna gałąź nauki i badań wykorzystująca wiedzę z dziedziny mechaniki gruntów, mechaniki skał, geologii inżynierskiej i budownictwa podziemnego, a także dziedzin pokrewnych, tj. budownictwa naziemnego (ogólnego, drogowego, inżynierii lądowej itp.), górnictwa podziemnego, odkrywkowego, inżynierii i ochrony środowiska, dla której najlepszą nazwą jest „geoinżynieria”. Wielu autorów używa dla tej nauki starej nazwy *geotechnical engineering* (między innymi [15]). W Polsce w środowisku osób zajmujących się budownictwem zwłaszcza naziemnym, panuje przekonanie, że ten kierunek naukowy dobrze opisuje nazwa geotechnika, która pojawiła się w latach 1920 i 1930. W szeregu zagranicznych publikacjach spotyka się nazwę *geoengineering* (geoinżynieria, np. [30]). W Słowacji używa się nazwy „geonika”, którą definiuje się jako naukę zajmującą się rozwiązywaniem zagadnień związanych z przestrzenią podziemną. Nazwa ta zatem nie obejmuje całego obszaru geoinżynierii. Jednakże należy zdawać sobie sprawę z faktu, że pod tymi różnymi nazwami nie wszyscy rozumieją zbiór obejmujący dokładnie te same dziedziny nauki. Z wielu prac dotyczących tych zagadnień (np. [1, 2, 32]) wynika, że dla geotechniki (rozumianej jako *geotechnical engineering*) podstawową nauką jest tylko mechanika gruntów. Klasyczna mechanika gruntów zajmuje się głównie zagadnieniami trójfazowych ośrodków rozdrobnionych, w praktyce prawie zupełnie pomijając zagadnienia związane z ośrodkiem skalnym. Tymczasem na świecie, a także w Polsce, wiele prac i różnego typu budowli wykonuje się na powierzchni lub wewnątrz ośrodka skalnego (np. sztolnie w Świnnej Porębie, zapora i tunel hydrotechniczny w Niedzicy, projektowane: tunel pod Lubniem, tunel w Lalikach, tunel pod wzgórzem św. Bronisławy itp.). A przecież zagadnieniami związanymi z projektowaniem i wykonywaniem budowli ziemnych i podziemnych w ośrodku skalnym zajmuje się inżynieria skalna (*rock engineering*). Nauką podstawową inżynierii skalnej jest mechanika skał (*rock mechanics*).

W Polsce inżynieria skalna utożsamiana jest głównie z górnictwem podziemnym i odkrywkowym, a nie z budownictwem. Wynika to po części z obowiązujących w Polsce norm, w których skały zaliczane są do gruntów budowlanych. Tymczasem skały są ośrodkami o całkowicie odmiennych właściwościach niż trójfazowe ośrodki gruntowe.

Osoby zajmujące się inżynierią skalną są odpowiedzialne za dobór materiałów do różnego typu konstrukcji, budowę kopalń, tuneli, fundamentów, zapór, stabilizację osuwisk itp. Innymi słowy, ich zawodem jest projektowanie, nadzorowanie wykonania oraz prowadzenie obserwacji po wykonaniu budowli wykonywanych w lub na skale. Wydaje się, że zaproponowane słowo „geoinżynieria” najlepiej odpowiada zakresowi nauki, którą się zajmujemy.

Geoinżynieria jest pojęciem szerszym od geotechniki, wykorzystuje ona bowiem wiedzę zarówno z zakresu mechaniki gruntów, jak i mechaniki skał, geologii inżynierskiej i innych pokrewnych dyscyplin, do projektowania i wykonywania budowli naziemnych i podziemnych, w przemyśle wydobywczym oraz inżynierii i ochronie środowiska. Spełnia ona podstawową rolę w projektach budowlanych, ponieważ wszystkie konstrukcje są budowane na lub wewnątrz Ziemi. Przy takim ujęciu geoinżynieria obejmuje zarówno geotechnikę jak i inżynierię skalną.

W praktyce geoinżynieria obejmuje szereg różnych zawodów, których zainteresowania łączą się z Ziemią, tj.: inżynierów tunelowania, inżynierów górnictwa, inżynierów geotechników, inżynierów skalnych, geologów inżynierskich, hydrogeologów, geofizyków, geochemików itp.

Aby uporządkować dotychczasowe nazwy różnych specjalności naukowych i zawodowych, proponuje się, aby nazwa „geomechanika” zawierała w sobie zarówno mechanikę gruntów, jak i mechanikę skał. Należy jednak podkreślić, że geomechanika jest nauką, a geoinżynieria zawodem.

Geoinżynier rozwiązuje problemy związane z [15]:

- fundamentowaniem;
- wzmocnianiem gruntów i skał;
- budownictwem komunikacyjnym (nawierzchnie drogowe, nasypy, wykopy, tunele, lotniska);
- powierzchniowymi konstrukcjami ziemnymi (zapory ziemne, tamy, nasypy);
- górnictwem odkrywkowym (głębokie wykopy, zwały, zagadnienia stateczności i deformacji podłoża);
- budownictwem podziemnym górnictwem (szyby, szybiki, komory, przekopy, wyrobiska korytarzowe, przecinki ścianowe);
- budownictwem podziemnym niegórnictwem (tunele, komory, sztolnie, przejścia podziemne, garaże podziemne);
- inżynierią środowiska (podziemne i naziemne składowiska odpadów).

Z geoinżynierią są związane takie nauki, jak: mechanika ośrodków ciągłych, mechanika ośrodków nieciągłych, wytrzymałość materiałów, mechanika skał, mechanika gruntów, fundamentowanie, geologia i geologia inżynierska, hydromechanika, hydrogeologia, geofi-

zyka, geochemia, metody numeryczne (metoda elementów skończonych, metoda elementów brzegowych, metoda różnic skończonych, metody hybrydowe), wiertnictwo, wiedza o materiałach budowlanych i geosyntetykach, zarządzanie ryzykiem, prawo geologiczne i budowlane.

Współczesna geoinżynieria swój początek zawdzięcza klasycznej geotechnice. Jej specjaliści łącznie ze specjalistami z inżynierii skalnej na przestrzeni ostatnich około 80 lat brali udział w realizacji wielu budowli, np.: tuneli drogowych i kolejowych, budowy metra w wielu dużych miastach, podziemnych parkingów, komór dla celów sportowych, podziemnych restauracji i sklepów, podziemnych magazynów na gaz, ropę naftową i produkty ropopochodne, elektrowni podziemnych, podziemnych obiektów strategicznych (w tym schronów), podziemnych magazynów na produkty żywnościowe, podziemnych składowisk odpadów, adaptacji starych wyrobisk kopalń lub naturalnych jaskiń dla potrzeb utylitarnych. Można przewidywać, że w najbliższych dziesięcioleciach geoinżynierię czekają nowe wyzwania związane ze zmianami demograficznymi i klimatycznymi. Geoinżynieria zaczyna się rozwijać w nowych, dawniej nie znanych obszarach [15]. Tworzy się współczesna geoinżynieria środowiska, powstaje geoinżynieria związana z regionami, w których występują bardzo niskie temperatury (wieczne zmarzliny, lód, wpływ mrozu), a także geoinżynieria związana z wysokimi temperaturami (składowanie odpadów nuklearnych, produkcja węgłowodorów w warunkach naturalnych); pojawiają się nowe zastosowania geoinżynierii w górnictwie (lokowanie odpadów, budowa tam z odpadów, budowa i rozbiórka hałd oraz coraz częstsze ich przekształcanie w tereny użytkowe), a także nowe problemy geoinżynierskie związane z pozyskiwaniem ropy naftowej, gazu oraz, co w Polsce ostatnio się rozwija, z pozyskiwaniem metanu.

Rozwiązanie nadchodzących problemów będzie łatwiejsze, bowiem w ostatnim okresie nastąpił szybki rozwój w dziedzinach:

- numerycznego modelowania zagadnień geoinżynierskich (rozwój metod numerycznych dla górotworu: traktowanego jako ośrodek ciągły, tj. metoda elementów skończonych MES, metoda elementów brzegowych MEB, metoda różnic skończonych MRS oraz traktowanego jako ośrodek nieciągły, tj. metoda elementów odrębnych, teoria bloków, metoda symulacji bloków);
- pomiarów *in situ* (zwłaszcza w oprzyrządowaniu);
- badań nad nowymi materiałami wykorzystywanymi w geoinżynierii, np. geosyntetyki, materiały z odpadów lub metodami wzmacniania gruntów i skał.

Z powyższych rozważań wynika, że w najbliższych dziesięcioleciach rola geoinżynierii będzie rosła. Z tego powodu trzeba nie tylko rozwijać badania w tym zakresie, ale także kształcić odpowiednio przygotowanych geoinżynierów, którzy sprostają tym wyzwaniom. Należy mieć świadomość, że niewłaściwie przygotowane kadry, źle wykonane projekty oraz budowle podziemne i naziemne mogą prowadzić do katastrof o trudnych do przewidzenia skutkach.

7. Podsumowanie

Szybki wzrost liczby ludności świata i jego urbanizacja są czynnikami sprzyjającymi dynamicznemu rozwojowi budownictwa podziemnego. Doświadczenia światowe w dziedzinie zagospodarowywania przestrzeni podziemnej pokazują, że podziemna lokalizacja obiektów komunikacyjnych i infrastrukturalnych, wykonywanych według najnowszych technologii, nie tylko daje możliwość rozwiązywania trudnych problemów technicznych, ale także praktycznie bezkonfliktowego rozwiązywania problemów społeczno-cywilizacyjnych w sposób przyjazny dla środowiska naturalnego.

Budownictwo podziemne w Polsce stanowi jak dotąd margines realizowanych inwestycji komunikacyjnych, komunalnych i przemysłowych. Główną barierą hamującą jego rozwój jest powszechne przekonanie o braku doświadczenia polskiej kadry technicznej w stosowaniu nowoczesnych technologii budowy takich obiektów oraz przekonanie o wysokich kosztach realizacji obiektów podziemnych — podstawowe bariery w tym zakresie scharakteryzowano w pracy.

Dzięki połączonemu wysiłkowi wielu specjalistów obserwuje się już pierwsze próby przełamania tych barier, co będzie sprzyjać odrobieniu zaległości w przyjaznym człowiekowi zagospodarowywaniu podziemi.

LITERATURA

- [1] *Braja M. Das*: Fundamentals of Geotechnical Engineering. Australia – New York, Brooks/Cole 1999
- [2] *Braja M. Das*: Principles of Geotechnical Engineering. 5th ed., Australia – New York, Brooks/Cole 2001
- [3] *Cichy W.*: Projektowanie geotechniczne w świetle przepisów norm światowych i europejskich. *Geoinżynieria i Tunelowanie*, t. 1, nr 1, 2004, 36–41
- [4] EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne – Przepisy ogólne (Geotechnical design – Part 1. General rules)
- [5] EN 1997-2 Projektowanie geotechniczne – Badania laboratoryjne (Geotechnical design – Part 2. Design assisted by laboratory testing)
- [6] EN 1997-3 Projektowanie geotechniczne z zastosowaniem badań polowych (Geotechnical design – Part 3. Design assisted by field testing)
- [7] *Grodecki W.*: Budownictwo podziemne jednym z czynników zapewnienia zrównoważonego rozwoju. „50. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Krynica 2004”, Warszawa – Krynica 12–17 września 2004 roku, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 163–174
- [8] *Grodecki W., Madryas C., Wichur A., Żyliński R.*: Budownictwo podziemne w Polsce u progu XXI wieku. *Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria*, t. 27, z. 3–4, 2003, 183–214
- [9] *Kolonko A., Madryas C.*: Modernization of underground pipes in towns in Poland. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 11, nr 2, 1996, 215–220
- [10] *Madryas C.*: Functional and qualitative aspects of the development of underground space in towns. *Proceedings of an International Conference. As Francaise Trav. en Souter „Underground Crossings for Europe”*. Lille (France) 16–18 Octobre 1990. Rotterdam: A.A. Balkema 1990, 343–346
- [11] *Madryas C.*: Mikrotunelowanie w infrastrukturze sieciowej miast. „50. Jubileuszowa Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB”, Warszawa – Krynica 12–17 września 2004, t. 1, część problemowa – Mosty i tunele. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 207–216
- [12] *Madryas C.*: Problemy odnowy podziemnej infrastruktury sieciowej w miastach. IV Konferencja naukowo-techniczna „Inżynieryjne problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych”, PAN Oddział w Krakowie, Kraków 21–23 maja 1998, Komisja Budownictwa, PZITB Oddział w Krakowie, t. 2. Referaty, 321–328

- [13] *Madryas C.*: Some problems of the underground grids rebuilding. The Third International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Buildings „New developments of underground space use”, Shanghai 1–6 September 1988 Proceeding Undergr. Space Cent., Tongji Univ., Civ. Def. Agency Shanghai, Shanghai: Tongji Univ. Press 1988, 275–279
- [14] Materiały analityczne Państwowej Agencji Restrukturyzacji Przemysłu. Informacje dotyczące zakresu drążenia wyrobisk chodnikowych. Katowice, PARP 2005 (praca niepublikowana)
- [15] *Morgenstern N.R.*: Common Ground. An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, vol. 1, 1–20, Melbourne, Australia, November 2000
- [16] *Paszczka H., Pękacki W., Słomski T.*: Metro w Warszawie. Stan budowy I linii i perspektywa dalszej rozbudowy. Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria, t. 27, z. 3–4, 2003, 467–499
- [17] *Puścikowski W.*: Konstrukcje i metody budowy tunelu drogowego na Wisłostradzie w Warszawie. „50. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Krynica 2004”, Warszawa – Krynica 12–17 września 2004, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 281–305
- [18] PN-B-02479:1998 Geotechnika – Dokumentowanie geotechniczne – Zasady ogólne
- [19] PN-B-02481:1998 Geotechnika – Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar
- [20] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 30 grudnia 1994 r. w sprawie samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie (Dz. U. z 1995 r. Nr 8, poz. 38 z późn. zm.)
- [21] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 20 grudnia 1996 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej i ich usytuowanie (Dz.U. z 1997 r. Nr 21, poz. 111)
- [22] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 września 1998 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz. U. z 1998 r. Nr 126, poz. 839)
- [23] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz.U. z 2001 r. Nr 153, poz. 1779)
- [24] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz.U. z 1998 r. Nr 151, poz. 987)
- [25] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z 1999 r. Nr 43, poz. 430)
- [26] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. z 2000 r. Nr 63, poz. 735)
- [27] *Ryż K.*: Realizacja tuneli płytkich w trudnych uwarunkowaniach komunikacyjnych. Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria, t. 27, z. 3–4, 2003, 525–532
- [28] *Sanecki L.*: Zasady w projektowaniu geotechnicznym stosowane w Polsce na tle procedur normalizacji europejskiej. „Geotechnika i budownictwo specjalne”, Zakopane 14–19 marca 2004, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, t. 1, 499–507
- [29] Ustawa z dnia 27 lipca 2001 r. o zmianie ustawy – Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. z 2001 r. Nr 110, poz. 1190)
- [30] *Sterling R. L., Godard J.P.*: Geoengineering Considerations in the Optimum Use of Underground Space. An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia, November 2000, vol. 1, 708–720
- [31] *Wichur A., Żyliński R.*: Underground construction in Poland – achievements and perspectives of development. „Budownictwo podziemne 2000 – Underground Construction 2000”, Kraków 25–27 września 2000, AGH, UWND AGH, 612–623
- [32] *Wilun Z.*: Zarys geotechniki. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1976
- [33] *Żyliński R., Grzybowski W.*: Koszty wykonania a technologia drążenia wyrobisk korytarzowych. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, t. X, nr 3, 2004, 9–13
- [34] *Żyliński R.*: Koszty budowy i eksploatacji obiektów podziemnych. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, t. IV, nr 1, 1998, 18–25