

# ZEJŚCIE POD ZIEMIĘ

## Część 2. przykłady realizacji

prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska  
Politechnika Warszawska

Technologie budowy głębokich podziemi są znane i stosowane od lat, jednak stale trwa ich rozwój i wykorzystuje się nowoczesne metody obliczeniowe oraz pojawiają się coraz ciekawsze rozwiązania techniczne. Powstają też śmiałe projekty, które z założenia lokują duże fragmenty obiektów pod poziomem terenu. Warto poznać najbardziej spektakularne z nich.

Najczęściej stosowane obecnie technologie budowy głębokich podziemi wykorzystują:

- ściany szczelinowe;
- iniekcję strumieniową, tzw. *jet-grouting*;
- mikropale;
- kotwy gruntowe – tymczasowe i trwałe;
- specjalne technologie wzmacniania i uszczelniania podłoża;
- nowoczesne technologie betonowania;
- wzmocnienia skarp, np. gwoździowanie.

Krótki opis wybranych technologii przedstawiono w cz. 1. („Builder” 5/2018), a w niniejszym artykule znajdują się dwa przykłady zastosowania z ostatnich lat.

Pierwszy z omówionych przykładów dotyczy zastosowania nowoczesnych metod obliczeniowych w analizie oddziaływania budowy głębokiego wykopu pod osłoną ścian szczelinowych. Innowacyjność rozwiązania polega na wykorzystaniu obliczeń numerycznych w prognozie przemieszczeń podłoża oraz konstrukcji i na tej podstawie doborze adekwatnych metod wzmocnienia fundamentów istniejących obiektów sąsiadujących z głębionym wykopem.

Drugi to pierwsze w świecie zastosowanie metody betonowania podwodnego na tak dużą skalę.

### Budynek Polna Corner w Warszawie

Przedstawiony poniżej przykład pokazuje wykorzystanie nowoczesnych narzędzi obliczeniowych i nowoczesnych technologii przy budowie głęboko posadzonego obiektu biurowego usytuowanego w bezpośrednim sąsiedztwie stacji metra oraz zabytkowych kamienic.

Opisywany obiekt to kompleks biurowo-usługowy z garażem podziemnym usytuowany w Warszawie w rejonie ul. Polnej [20]. Wysokość obiektu jest zróżnicowana od siedmiu do dziewięciu kondygnacji naziemnych. Pod całym zespołem budynków zaprojektowano garaż o trzech kondygnacjach podziemnych, wykonany w obudowie ze ścian szczelinowych, które stano-

wią obudowę wykopu w kolejnych fazach budowy. Całość jest posadowiona na płycie fundamentowej, na głębokości około 11,0 m p.p.t. (rys. 1.). Na podstawie wierceń badawczych i dokumentacji geotechnicznej [21] stwierdzono, że bezpośrednio poniżej powierzchni terenu na całym terenie występują grunty nasypowe o maksymalnej miąższości 2,1 m. Poniżej nasypów nawiercono średnio zagęszczone i zagęszczone piaski drobne o  $I_D=0,60$  i  $I_D=0,70$ . Utwory piaszczyste są przewarstwione morenowymi piaskami gliniastymi, glinami piaszczystymi i glinami oraz zastoiskowymi pyłami piaszczystymi i glinami pylastymi. Grunty te są w stanie twardoplastycznym i półzwałym. Od głębokości 9,70÷12,30 m p.p.t. występują w podłożu budynku półzwałte iły pylaste (iły warwowe) o stopniu plastyczności  $I_L=0,00$ , a poniżej półzwałte gliny piaszczyste i gliny oraz gliny pylaste i lokalnie piaskami średnimi. Jak widać z tego opisu, warunki geotechniczne można uznać za skomplikowane – szczególnie fakt występowania bezpośrednio pod budynkiem w strefie jego posadowienia iłów warwowych. Przekrój geotechniczny w obszarze posadowienia budynku przedstawiono na rys. 2.

Przed uzyskaniem pozwolenia na budowę należało wyznaczyć zasięg oddziaływania nowo budowanego budynku, określić wartości osiadań sąsiednich obiektów i zaproponować system wzmocnienia fundamentów.

W tym celu, wykorzystując metodę elementów skończonych i specjalistyczne oprogramowanie, wykonano modele numeryczne w dwóch przekrojach obliczeniowych. Jeden z nich pokazano na rys. 3. Modele te obejmowały zarówno projektowany budynek, jak i obiekty sąsiednie oraz istniejącą stacją metra.

Założono, że część podziemna będzie budowana klasyczną metodą stropową. Po wykonaniu stropu „0” będą kolejno wykonywane stropy poziomów „-1” i „-2”, z wyjątkiem fragmentu ramp zjazdowych, gdzie zaproponowano rozparcie stalowymi rozporami. Zaprojektowano ściany szczelinowe o grubości 0,80 m. Najbliższe wykopowi ławy fundamentowe zostaną wzmocnione kolumnami wykonanymi w technologii iniekcji strumieniowej, sięgającymi co najmniej 3 m poniżej dna wykopu. Dla tak przyjętych założeń wyznaczono teoretyczne wartości przemieszczeń poziomych ścian wykopu, konstrukcji budynków przyległych i osiadania fundamentów, które porównano z wartościami dopuszczalnymi określonymi w ekspertyzie dotyczącej stanu tech-

Bezpieczne budowanie coraz głębszych części podziemnych budynków lub całych obiektów usytuowanych pod poziomem terenu jest związane z nowymi rozwiązaniami technologicznymi i innowacyjnymi metodami budowy.

nicznego budynków/obiektów sąsiednich. Maksymalne poziome przemieszczenia ściany szczelinowej wyniosły 5,0 mm, tzn. nie przekroczyły wartości dopuszczalnych wynoszących 8 mm. Maksymalne osiadania wzmocnionych ław fundamentowych wyniosły w fazie docelowej budowy wykopu od 0,7 mm do 6,4 mm w zależności od usytuowania ławy w stosunku do wykopu i były nieznacznie (o 0,4 mm) większe od dopuszczalnych 6 mm. Z obliczeń wynikało również, że różnica osiadania między skrajnymi ławami fundamentowymi wynosi około 3 mm.

Na podstawie wykonanej analizy zaproponowano i wykonano system wzmocnienia fundamentów kolumnami wykonywanymi w technologii iniekcji strumieniowej. Pod ławami fundamentowymi przylegającymi bezpośrednio do części podziemnej wznoszonego budynku wykonano kolumny *jet-grouting* o średnicy 80 cm i głębokości 12 m, a na fragmencie najbardziej zagrożonej osiadaniami kamienicy nawet o średnicy 120 cm. Wszystkie pozostałe zewnętrzne ławy wzmocniono kolumnami o głębokości 8,5 m. Pod całym obiektem zrealizowano łącznie 260 kolumn *jet-grouting*. Dzięki temu można było na pewnym fragmencie wykopu zrezygnować z pełnej metody stropowej, która w warunkach tak małego placu budowy stwarza wiele problemów wykonawczych, i zastosować rozpory stalowe oraz duży centralny otwór technologiczny – rys. 4. Podczas całego okresu budowy prowadzono stałe monitorowanie przemieszczeń ścian szczelinowych i osiadań sąsiednich budynków, które przeciętnie wyniosły 4 mm [18]. Nie stwierdzono wartości przekraczających dopuszczalne, określone w ekspertyzach technicznych.

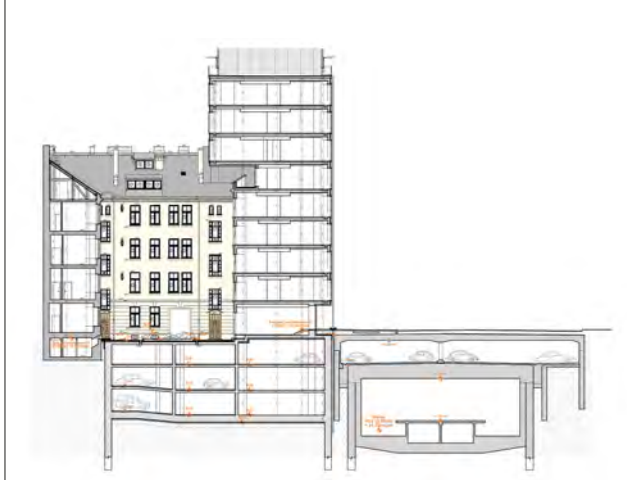
### Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku

Bardzo dobrym przykładem stosowania wymienionych na wstępie technologii jest budowa całej części podziemnej budynku Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku [22]. Ze względu na skomplikowane warunki geotechniczne, a przede wszystkim wysoki poziom wody gruntowej i praktycznie brak możliwości właściwego odwodnienia wykopu, podjęto decyzję o prowadzeniu robót ziemnych częściowo pod wodą. Wykorzystano tutaj technologię betonowania podwodnego, tzw. metodę Contractor stosowaną przy wykonawstwie ścian szczelinowych, oraz mikropale kotwiące betonowy korek i płytę denną – przeciwdziałające wyporowi wody. Całe przedsięwzięcie, tzn. wbudowanie w jednym cyklu około 25 000 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej i wykonanie szczelnego korka, było największą tego typu operacją na świecie. Zakończyła się ona sukcesem, a wynikało to między innymi z faktu, że zarówno projektowanie wykopu, jak i wykonawstwo (w tym podjęcie decyzji o przyjętej metodzie budowy) powierzono jednej firmie, która miała możliwość elastycznego działania w ramach realizacji prac. Obudowę wykopu zaprojektowano jako ścianę szczelinową o grubości 100 cm, której stateczność zapewniały tymczasowe kotwy gruntowe o nośności 1000 kN. Typowy przekrój pokazano na rys. 5. Na stykach kolejnych sekcji ścian zastosowano złącza typu waterstop o symbolu patentowym CWS® (Continuous Water Stop), co miało uszczelnić obudowę wykopu.

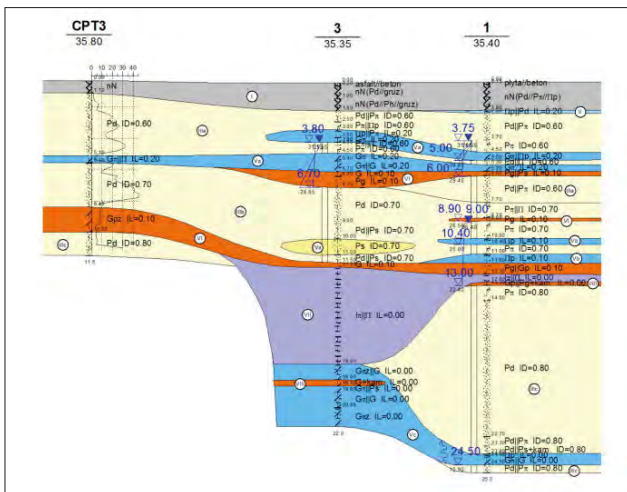
Warunki geotechniczne były typowe dla ujścia dużej nizinnej rzeki, tzn. pod przypowierzchniową warstwą osadów deltowych o miąższości około 9 m budowanych przez torfy i namuły występowały grunty aluwialne – piaski drobne i średnie, a głębiej grunty piaszczysto-żwirowe. Jak wspomniano powyżej, podstawowym problemem geotechnicznym był wysoki poziom wody gruntowej. Zwierciadło wody gruntowej stabilizowało się na głębokości od 0,10 m do 0,25 m p.p.t., czyli prawie 16 m powyżej projektowanego dna wykopu, co powodowało parcie wody na płytę denną o wartości 160 kPa. Wykonanie odwodnienia było niemożliwe, gdyż pompowanie wody gruntowej praktycznie oznaczałoby pompowanie wody z sąsiedniej Motławy.

Prace ziemne prowadzono w następujących fazach [22]:

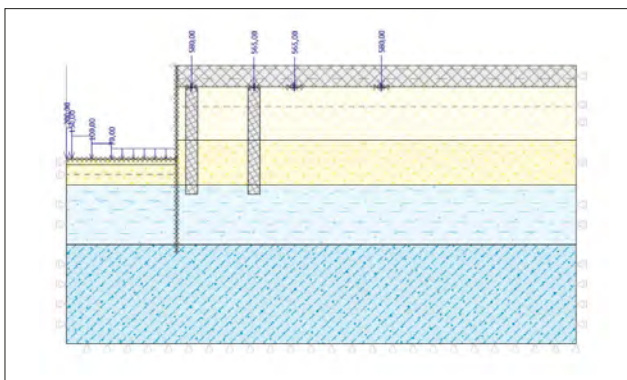
- zabezpieczenie i przełożenie podziemnej infrastruktury technicznej z obszaru przyszłego wykopu,
- wykonanie obwodowych ścian szczelinowych o grubości 100 cm i głębokości 27 m,



Rys. 1. Przekrój analizowanego budynku wraz z częścią podziemną i istniejącą stacją metra [20]



Rys. 2. Przekrój geotechniczny w obszarze posadowienia budynku – z dokumentacji geotechnicznej [21]



Rys. 3. Model numeryczny części podziemnej budynku wraz z ławami fundamentowymi budynków sąsiednich – faza docelowa wykopu, płyta denną obciążona konstrukcją [20]



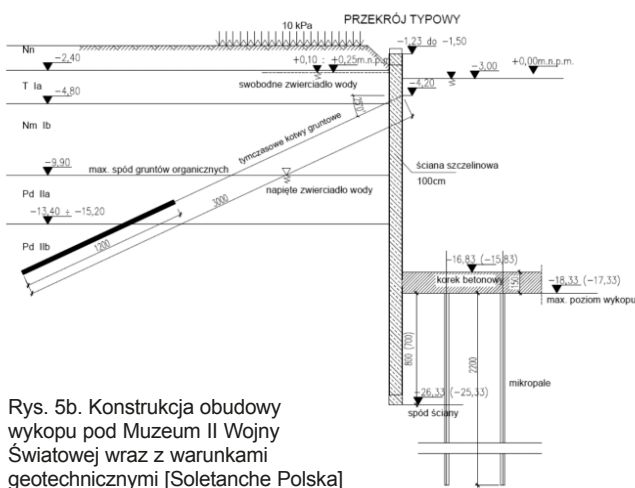
Rys. 4. Widok na sąsiednie budynki oraz wykop z systemem rozparcia fragmentami stropów i rozporami [fot. K. Traczyński]



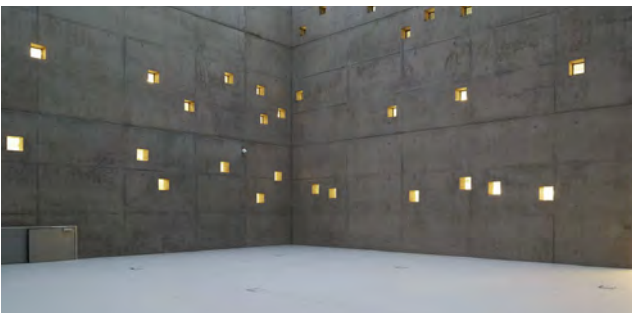


Zdjęcia arch. Warbud SA

Rys. 5a. Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku, którego prawie cała kubatura znajduje się w głębokim wykopie



Rys. 5b. Konstrukcja obudowy wykopu pod Muzeum II Wojny Światowej wraz z warunkami geotechnicznymi [Soletanche Polska]



Zdjęcia arch. Riegler Rewe Architektki

Rys. 6. Muzeum Śląskie w Katowicach znajdujące się pod ziemią, na terenie dawnej kopalni węgla kamiennego – wykorzystywanie istniejącej infrastruktury, np. poprzemysłowej, i adaptowanie jej na cele kultury, sztuki czy edukacji

- głębinie w sposób tradycyjny „na sucho” do głębokości pozwalającej na wykonanie z poziomu dna wykopu kotew gruntowych – głowice na rzędnej 4,2 m p.p.t.,
- głębinie wykopu do rzędnej docelowej dna metodą refulacji przy użyciu pogłębiarek – wykop stopniowo napelniał się wodą w wyniku działania ciśnienia oraz powrotnego wpompowywania wody pochodzącej z odsączonego urobku. Parcie wody zapewniało stateczność ścian szczelinowych i dna wykopu. Łącznie wydobyto około 230 000 m<sup>3</sup> gruntu.

Po wykonaniu pod wodą całego zakresu robót ziemnych z pływających baret i przy pomocy nurków rozpoczęto wiercenie i instalację mikropali. Zastosowano żerdzie samowierzące i stabilizację otworu nie rurowaniem, lecz płuczką cementową, dzięki czemu znacznie skrócono czas drążenia. Ogółem wykonano 914 sztuk mikropali o nośności 2000 kN każdy i głębokości 22 m, nie licząc 15 m pustego przewiertu przez wodę. Prace te poprzedziły badania wstępne i przydatności przeprowadzone na 6 mikropalach badawczych. Potwierdzono doświadczalnie założenia projektowe i uzyskanie nośności właściwej do zrównoważenia wyporu wody i zakotwienia korka betonowego oraz płyty fundamentowej w podłożu.

Kolejny etap prac polegał na wykonaniu korka betonowego o grubości 1,5 m i powierzchni 14 300 m<sup>2</sup>. Wykonano go metodą betonowania podwodnego Contractor z użyciem rur wlewowych oraz pływającego systemu utrzymującego rury w pozycji pionowej (patent „Dobber”). Rury wlewowe przemieszczano od ścian szczelinowych w stronę środka wykopu, betonowanie prowadzono pasami o szerokości 2 m. Mieszankę betonową podawano 6 pompami ustawianymi na brzegu wykopu lub na pływających platformach. Taki sposób zapewniał ciągłość betonowania i jednolitą strukturę betonu. Całość betonowania trwała 7 dni przy pracy 24 godziny na dobę czterech wędzów betoniarzów i około 50 betonowozów.

Po osiągnięciu odpowiedniej wytrzymałości rozpoczęto wypompowywanie wody z wykopu z jednoczesnym monitorowaniem ścian szczelinowych i betonowego korka. Zastosowano ciągły pomiar przemieszczeń tachimetrami zautomatyzowanymi, inklinometrami zainstalowanymi w ścianach, oraz geodezyjną obserwacją reperów założo-



Rys. 7. Podziemne Muzeum Rynku Krakowskiego

## Przestrzeń podziemna w miastach – wyzwania

Prognozy demograficzne mówią, że w 2050 r. blisko 70% populacji naszej planety będzie żyło w miastach, co oznacza powstanie wielu *megacities* z gęstą zabudową wysokimi budynkami o głębokich podziemiach. Na powierzchni terenu po prostu zabraknie miejsca. Wykorzystanie przestrzeni podziemnej w miastach jest w chwili obecnej jednym z poważniejszych wyzwań dla urbanistów, architektów, konstruktorów oraz specjalistów z zakresu budownictwa podziemnego i szeroko pojętej geoinżynierii.



nych na głowicach mikropali i specjalnych wieżach pomiarowych. Dodatkowo prowadzono stały pomiar piezometryczny poziomu wody gruntowej za ścianą szczelinową.

Po wypompowaniu wody, osuszeniu wykopu i przygotowaniu powierzchni wykonano właściwą płytę fundamentową i na dalszych etapach konstrukcję budynku muzeum.

Odrębnym zagadnieniem był projekt i kontrola receptury mieszanki betonowej – ze względu na sposób wbudowywania pod wodą i czas wiązania. Kluczowym punktem było zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości betonu w połączeniu korka ze ścianą szczelinową.

Szczegółowe dane i informacje o opisywanym przykładzie podano w publikacji [22] oraz [23].

## Podsumowanie

Przedstawione dwa są jednymi z wielu przykładów nowoczesnych (lub też unowocześnionych) technologii oraz zaawansowanych metod modelowania, obliczania, projektowania i monitorowania głębokich podziemi lub obiektów głęboko posadowionych.

Należy mieć świadomość, że zaproponowane rozwiązania wynikają z dużego doświadczenia podmiotów odpowiedzialnych za projekt i wykonawstwo, ale też z dobrych praktyk związanych np. z dokładnym rozpoznaniem podłoża, oceną parametrów geotechnicznych, własną analizą modeli obliczeniowych i metod projektowania. W każdym z przypadków zdefiniowano zagrożenia, zidentyfikowano ryzyko, oceniono jego podział i wdrożono system zarządzania. Na koniec podjęto ryzyko realizacji trudnej inwestycji. ■

## Bibliografia

- [18] Grela M., Traczyński K., Wzmocnienie fundamentów w sąsiedztwie głębokich wykopów, materiały seminarium IBDiM Wzmacnianie podłoża i fundamentów 2017, str. 87-98.
- [19] Barański B., Traciewicz Ł., Budowa wielopoziomowego garażu podziemnego w zabytkowych kamienicach Foksal 13 i 15 w Warszawie, materiały seminarium IBDiM Wzmacnianie podłoża i fundamentów 2017, str. 63-78.
- [20] Mitew-Czajewska M., Siemińska-lewandowska A., Opinia dotycząca oddziaływania realizacji inwestycji Polna 40 na budynek Polna 44, MMGEO, Warszawa 2014.
- [21] Traczyński K., Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla potrzeb budowy budynku Polna 40, Zakład Badań Geotechnicznych GEOTEST, Warszawa 2013.
- [22] Tomczak U., Tomczak H., Wykonanie suchego wykopu podczas budowy Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku, „Inżynier Budownictwa” nr 7/8 2016, str. 100-106.
- [23] Materiały techniczne, Soletanche Polska, 2016.



Fot. arch. UM Łódź/NCK

Rys. 8. Elementy EC1 – Nowego Centrum Kulturalnego w Łodzi



Fot. arch. KWIK/Phonies

Rys. 9. Centrum Dialogu Przełomy w Szczecinie

**Streszczenie:** W artykule podano technologie najczęściej wykorzystywane obecnie w budowie głębokich podziemi. Omówiono szczegółowo dwa przykłady. Pierwszy dotyczy budynku biurowego o trzech kondygnacjach podziemnych usytuowanego w sąsiedztwie stacji metra i przedwojennych kamienic. Drugi to realizacja wykopu w warunkach geotechnicznych wysokiego poziomu wody gruntowej przy braku możliwości odwodnienia terenu budowy. W pierwszym przypadku zastosowano ściany szczelinowe, wzmocnienie fundamentów iniekcją strumieniową oraz metodę stropową budowy podziemi. Na etapie projektu budowlanego przeanalizowano oddziaływanie wykopu na sąsiednie obiekty i wyznaczono osiadania ław fundamentowych. W drugim opisaną metodę betonowania podwodnego.

**Słowa kluczowe:** ściany szczelinowe, iniekcja strumieniowa, analiza przemieszczeń, betonowanie podwodne

**Abstract.** Modern solutions arising from the “going underground” of buildings in cities. This article presents the technologies most commonly used today in the construction of deep undergrounds. Two examples have been discussed in detail. The first concerns an office building with three underground floors located in the vicinity of the metro station and pre-war tenement houses. The second example discusses the execution of the deep excavation in geotechnical conditions of high ground water level in the absence of the possibility to perform the dewatering of the construction site. In the first case, diaphragm walls and jet-grouting below the existing foundations were used. The influence of the excavation on neighboring buildings was analyzed and expected settlements of foundations were determined. In the second example the method of underwater concreting is described.

**Keywords:** diaphragm walls, jet-grouting, displacement analysis, underwater concreting



Fot. arch. ASTALDI



Fot. arch. SaintGobain

Rys. 10 a i b. W obszarze budownictwa infrastrukturalnego dobry przykład to ostatnio oddany do eksploatacji podziemny Dworzec Łódź Fabryczna. Wybudowano go w wykopie o głębokości 18 m, a perony kolejowe znajdują się na najniższym poziomie dworca