

# Zabezpieczenie głębokich wykopów w sąsiedztwie obiektów zabytkowych na budowie Muzeum Śląskiego w Katowicach

tekst i zdjęcia: mgr inż. **ROBERT SOŁTYSIK**, Soley Sp. z o.o., mgr inż. **JAKUB SIERANT**, Titan Polska Sp. z o.o.

Artykuł przedstawia zagadnienia związane z projektowaniem i wykonawstwem robót geotechnicznych służących zabezpieczeniu głębokiego wykopu wraz z przylegającymi do niego modernizowanymi obiektami zabytkowymi. W tekście starano się w możliwie kompleksowy sposób przekazać złożoność i wielowątkowość procesu aktywnego projektowania oraz obserwacji stopnia współgrania projektu i wykonawstwa przez rozbudowany, wieloaspektowy system monitoringu.



Ryc. 1. Panorama budowy

## 1. Informacje ogólne o inwestycji

Nowa siedziba Muzeum Śląskiego będzie pierwszym obiektem wyznaczającym w Katowicach tzw. oś kultury, współtworzonej przez budowane obecnie Centrum Kongresowe i nową siedzibę Narodowej Orkiestry Symfonicznej Polskiego Radia.

### Informacje o inwestycji:

Inwestor: Muzeum Śląskie w Katowicach  
Architekt: Riegler-Riewe, Graz, Austria  
Projekt Konstrukcji: Pracownia Inżynierska Statyk, Katowice  
Generalny wykonawca: Budimex SA  
Wykonawca zabezpieczeń geotechnicznych: Soley Sp. z o.o., Balice k. Krakowa  
Projekt zabezpieczeń geotechnicznych: Soley Sp. z o.o., Balice k. Krakowa, Titan Polska Sp. z o.o., Kraków  
Wartość inwestycji: 324 mln zł

Obiekty nowego gmachu Muzeum Śląskiego zostały zlokalizowane przy ul. Kopalnianej 6 w Katowicach, na terenie Zakładu Głównego zlikwidowanej KWK Katowice.

Koncepcja przyjętego do realizacji projektu zakłada minimalną ingerencję w istniejący teren oraz ścisły związek i wkomponowanie w nową strukturę pozostałych urządzeń i budynków dawnej kopalni. Zamierzenie architektoniczne zrealizowano przez:

- ulokowanie obiektu głównego – przestrzeni ekspozycyjnych, konferencyjnych, technicznych wraz z parkingiem – pod powierzchnią terenu,
- adaptację historycznych obiektów dawnej kopalni do celów wystawieni-nych, administracyjnych, gastronomicznych i widokowych.

Gmach główny wraz z trzykondygnacyjnym parkingiem podziemnym został

przewidziany do wykonania w wykopie otwartym o głębokości dochodzącej do 17 m i powierzchni blisko 2 ha. Zagospodarowanie terenu i połączenie użytkowe nowego gmachu podziemnego z budynkami historycznymi sprawiło, że głęboki wykop przebiegał bezpośrednio przy trzech adaptowanych do nowych funkcji obiektach, objętych ochroną konserwatorską:

- budynku maszyny wyciągowej szybu Warszawa (obiekt MS-8), adaptowanego do celów gastronomicznych,
- wieży wyciągowej szybu Warszawa (obiekt MS-79), adaptowanego do funkcji widokowych przez dobudowanie windy panoramicznej i tarasu widokowego,
- magazynu odzieżowego (obiekt MS-15), adaptowanego do celów wystawieni-nych Centrum Scenografii Polskiej.

## 2. Główne założenia techniczne do projektu zabezpieczeń geotechnicznych

Zrealizowanie opisanego wyżej zamierzenia architektonicznego wymagało rozwiązania wielu problemów inżynierskich natury geotechnicznej i konstrukcyjnej, zogniskowanych wokół czterech zasadniczych zagadnień:

1. Zabezpieczenie głębokiego, szeroko-przestrzennego wykopu o zróżnicowanej geometrii.
2. Zabezpieczenie obiektów zabytkowych zlokalizowanych bezpośrednio przy krawędzi planowanego głębokiego wykopu.
3. Wykonanie zabezpieczeń geotechnicznych umożliwiających budowę w istniejącym budynku MS-8 dodatkowej kondygnacji podziemnej, szybu windowego

**TITAN POLSKA**

INNY WYMIAR TEGO, CO  
FUNDAMENTALNE



**TITAN POLSKA sp. z o.o.**

ul. Miłkowskiego 3/801

30-349 Kraków

tel.: +48 12 636 61 62

fax: +48 12 267 05 25

e-mail: [biuro@titan.com.pl](mailto:biuro@titan.com.pl)

[www.titan.com.pl](http://www.titan.com.pl)

i skomunikowanie go przez tunel pod ścianą szczytową z budynkiem gmachu głównego.

4. Wzmocnienie posadowienia wieży wyciągowej dawnego szybu Warszawa, niezbędnego dla jej adaptacji do funkcji obiektu widokowego.

Przy projektowaniu rozwiązań należało wziąć dodatkowo pod uwagę zależności i okoliczności towarzyszące, wynikające ze skali budowy i uwarunkowań harmonogramowych, np. równoczesne prowadzenie robót związanych z podchwytywaniem (wzmacnianiem) budynku, robót modernizacyjnych w jego wnętrzu i zabezpieczenia przylegającego bezpośrednio wykopu.

### 3. Warunki geotechniczne i hydrogeologiczne

Warunki geotechniczne i hydrogeologiczne w podłożu zostały określone przez firmę Progeo Sp. z o.o. z Katowic. Wyniki przedstawiono w wielu opracowaniach: dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, hydrogeologicznej oraz dokumentacji geotechnicznej wraz z dodatkami.

Generalnie w podłożu projektowanej inwestycji stwierdzono występowanie utworów czwartorzędowych różnej genezy (głównie antropogeniczne i wodnolodowcowe) i o różnym wykształceniu litologicznym oraz utworów karbońskich wykształconych jako iłowce, piaskowce, ich zwierzeliny oraz przewarstwienia węgla. Dokładny podział na warstwy geotechniczne według „Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej określającej warunki geologiczno-inżynierskie oraz tło geologiczne dla potrzeb projektowych Nowego Muzeum Śląskiego” (Progeo, Katowice 2006) przedstawiono poniżej.

Warstwa Ia – nasypy zbudowane z bardzo różnorodnych składników, takich jak kamienie, gruz budowlany, miążwogłowy, żużel itp. Powstały w sposób niekontrolowany. Badania sondą DPSH wykazały, że warstwa ta ma zróżnicowany stopień zagęszczenia, w granicach  $ID = 0,41-0,78$ , czyli są one średniozagęszczone i zagęszczone. Średni stopień zagęszczenia wynosi  $ID = 0,58$ . Warstwa Ia występuje niemal na całym dokumentowanym obszarze i ma miąższość maksymalną 5,0–8,5 m w północno-zachodniej części obszaru.

Warstwa Ib – nasypy budowlane, takie jak asfalt i kostka brukowa z podścielającymi ją podsypkami, piwnice itp. Warstwa występuje tylko lokalnie.

Warstwa IIa zbudowana jest z piasków średnich i grubych, zawierających zmienną domieszkę ziaren żwirowych. Są to grunty średniozagęszczone o  $ID = 0,57$ .

Warstwa IIb1 zbudowana z gruntów spoistych grupy C, litologiczne są to gliny piaszczyste, miejscami piaski gliniaste o konsystencji twardoplastycznej i środkami stopni plastyczności  $IL = 0,10$ . Warstwa występuje niemal wyłącznie w południowej części przedmiotowego terenu.

Warstwa IIb2 zbudowana jest z gruntów plastycznych oraz pyłów przewarstwionych glinami o średnim stopniu plastyczności  $IL = 0,36$ , zaliczonych do grupy B.

Warstwa IIIa – zwierzeliny piaskowców o charakterze gruntów sypkich – piasków o różnym uziarnieniu, głównie średnich i grubych z domieszką rumoszu piaskowców bądź rumoszu piaskowców wypełnionych piaskami. Grunty te są zagęszczone o średnim stopniu zagęszczenia  $ID = 0,70$ .

Warstwa IIIa1 – zwierzeliny piaskowców o charakterze gruntów spoistych (grupa B) – piasków gliniastych i glin piaszczystych z okruchami piaskowców. Grunty o konsystencji półzwałowej o  $IL < 0$ .

Warstwa IIIa2 – zwierzeliny piaskowców w postaci gruntów spoistych (grupa B) litologicznie jak warstwa IIIa1, lecz o konsystencji twardoplastycznej i średniej wartości spoistych  $IL = 0,08$ .

Warstwa IIIa3 – to grunty spoiste jak warstwy IIIa1, lecz o konsystencji plastycznej i średnim stopniu plastyczności  $IL = 0,32$ .

Warstwa IIIb1 – zwierzeliny iłowców – grunty spoiste grupy B wykształcone jako gliny, gliny zwięzłe i zwięzłe, miejscami gliny piaszczyste. Grunty te są półzwałowe ( $IL < 0$ ).

Warstwa IIIb2 – zwierzeliny iłowców o litologii jak w przypadku warstwy IIIb1, lecz o konsystencji twardoplastycznej i średnim stopniu plastyczności  $IL = 0,07$ .

Warstwa Va – piaskowce, najczęściej średnioziarniste. Są to skały na ogół mocno spękanne o zróżnicowanej wytrzymałości. Badania wytrzymałości na ściskanie wykazały wartości  $Re$  w granicach 32,51–46,45 MPa, przy czym niektóre iłowce mają większą wytrzymałość ( $Re = 74,75$  MPa). Piaskowce są głównym elementem rozpoznanej części górotworu karbońskiego w południowej części terenu.

Warstwa Vb – iłowce zalegające głównie w północnej części dokumentowanego obszaru. Iłowce w zasypie wierceń są strefami miękkimi, spękanymi. Z badań

wytrzymałości na ściskanie otrzymano wartości  $R_c$  w granicach 4,46–8,12 MPa.

Pod względem hydrogeologicznym zbadane w czasie rozpoznania warunki wodne należy ocenić jako korzystne. Na obszarze inwestycji nie stwierdzono występowania ciągłych poziomów wodonośnych. W kilku otworach napotkano na niewielkie sączenia, a dwóch punktach badawczych natrafiono na podpowierzchniowe wody zawieszane (na głębokościach 1,7 i 2,8 m p.p.t.).

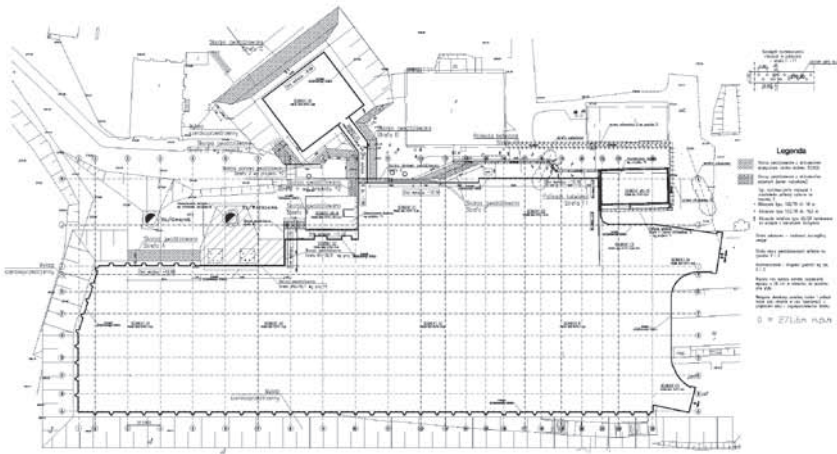
Pod kątem tektonicznym obszar charakteryzował się sporą złożonością. W obszarze inwestycji znalazł się jeden duży uskok przecinający ścianę wykopu. W trakcie prowadzenia robót stwierdzono ponadto szereg drobniejszych niezgodności i zaburzeń tektonicznych, z którymi zawsze wiążą się zakłócenia (najczęściej pogorszenie) oczekiwanych parametrów wytrzymałościowych.

Szczególną wagę przywiązano do cech i właściwości ośrodka gruntowego, wynikających z jego pogórnicy historii. Objawiały się one występowaniem quasi-ciągłych zaburzeń tektonicznych, obecnością pustek poeksploatacyjnych, stref spękań i rozluźnień. Obszar objęty był w przeszłości płytką eksploatacją, która pozostawiła po sobie ślady w postaci starych zrobów i poszczelinowania masywu, co nierzadko zaburzało porządek robót przez gwałtowną inicjację procesów geodynamicznych, np. relaksacji lub zwiększone nawodnienie stref wykopu.

### 4. Projekt zabezpieczeń geotechnicznych

#### 4.1. Przyjęty model ośrodka gruntowego

Podsumowując warunki geotechniczne na obszarze inwestycji, należy je określić jako bardzo skomplikowane. Napotkano na dużą zmienność litologiczną i głębokościową utworów o bardzo zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych i odkształceniowych. Warunki na całym obszarze ośrodka zaangażowanego tektonicznie i mikrotektonicznie zostały zaburzone w wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej. Wszystko to wprowadzało dość silną zmienną o niemalże losowym charakterze, powodując, że górotwór wymykał się przyjętym w tradycyjnej geotechnice regułom i modelom opisu. Gromadzenie i weryfikację danych wyjściowych do projektu oparto zatem w znacznej mierze na metodzie obserwacyjnej z bardzo dużym



Ryc. 2. Plan sytuacyjny zabezpieczeń geotechnicznych

wykorzystaniem kryteriów opisu według teorii Hoeka–Brown. W połączeniu z wiedzą geologiczno-inżynierską na temat procesów i zjawisk geodynamicznych pozwoliło to na dobre prognozowanie realnych właściwości i sposobu zachowania się górotworu.

#### 4.2. Przyjęty model projektu

Biorąc pod uwagę rodzaj i zakres prac niezbędnych do wykonania robót oraz uwarunkowania geotechniczne, ustalono, że jedyną metodą, która może zapewnić odpowiednią jakość techniczną rozwiązań, wymagany poziom bezpieczeństwa, właściwe tempo robót oraz zakładany efekt ekonomiczny jest metoda projektu aktywnego. Jedynie ciągła weryfikacja (przez monitoring) skuteczności wprowadzanych rozwiązań i ich natychmiastowe dostrajanie do faktycznie napotykanym warunków geotechnicznych dawały szansę na bezpieczne osiągnięcie zamierzonego celu.

#### 4.3. Zabezpieczenie ścian (skarp) wykopów

Analizując uwarunkowania geotechniczne i logistyczne prowadzenia robót w głębokim wykopie, w tym kwestie zapewnienia dostępu do wykopu oraz prowadzenia dróg technologicznych, na podstawie projektu konstrukcyjnego oraz po ustaleniu z generalnym wykonawcą przyjęto założenia podstawowe. Ustalono, że skarpy na odcinkach newralgicznych zostaną zabezpieczone w sposób konstrukcyjny, natomiast w miejscach prowadzenia ruchu technologicznego oraz tam, gdzie możliwy jest szerszy rozkop, skarpy zostaną wykonane przez generalnego wykonawcę w tzw. pochyleniu bezpiecznym.

Skarpy te wyłączono z omawianego projektu zabezpieczeń. Skarpy bez wzmocnień konstrukcyjnych, o zmniejszonym nachyleniu zlokalizowano w:

- segmentach A1, A2, A3, B od strony południowej wzdłuż al. Roździeńskiego,
- segmencie A1 od strony zachodniej, częściowo do osi 3 od strony północnej,
- segmencie D1 i D2 od strony zachodniej,
- segmencie D1 od strony wschodniej.

Pozostałe ściany wykopu przewidziano do zabezpieczenia przez gwoździowanie, przy czym przyjęto nachylenie wszystkich skarp  $75^\circ$  lub  $90^\circ$ . Głębokość wykopów oraz warunki geologiczno-inżynierskie w obrębie projektowanych wykopów wymagały przeanalizowania zachowania skarp zarówno pod kątem stateczności ogólnej, jak i niekorzystnych zjawisk przypowierzchniowych, mających wpływ na realizację prac.

Skarpy w zależności od geometrii (głębokości), warunków geotechnicznych i obciążeń naziomu podzielono na siedem stref oznaczony literami A–G. Lokalizacja stref przedstawiona została na rycinie 2.

Ze względu na tymczasowy charakter projektowanych skarp wykopu przyjęto, że wskaźnik stateczności nie powinien być mniejszy niż 1,30. Do zasadniczych obliczeń stateczności skarp wykopu wykorzystano program metody równowagi granicznej, czyli tzw. metodę pasków GGU-STABILITY v. 9.28 wraz z modulem GGU-NAIL do analizy konstrukcji gwoździowanych. W celu określenia warunków stateczności omawianych skarp oraz rodzaju i przybliżonego zakresu niezbędnych zabiegów wzmocniających przeprowadzono modelowanie stateczności. Skarpy wykopu podzielono na

siedem stref różniących się warunkami geotechnicznymi, głębokością i obciążeniami działającymi na naziom. Parametry geotechniczne poszczególnych warstw przyjęto na podstawie „Dodatku do dokumentacji geologiczno-inżynierskiej...”, przy czym dla utworów skalistych parametry geotechniczne ustalono na podstawie klasyfikacji jakości górotworu Hoeka–Brown, wykorzystując program RocLab. Analizy stateczności oraz modelowania zabezpieczeń przeprowadzono przy pomocy metody Janbu i łamanej powierzchni poślizgu. Analiza wyników wykazała, że wszystkie skarpy wymagają zabezpieczenia. Jako metodę wzmocnienia ośrodka gruntowego (poprawy stateczności ogólnej) przyjęto zbrojenie wgłębne samowierzącymi, iniekcyjnymi gwoździami gruntowymi.

W kolejnych etapach prowadzono obliczenia stateczności ogólnej z uwzględnieniem przyjętych systemów zabezpieczenia, tak by dla konstrukcji w postaci docelowej (ostatecznej geometrii i obciążeniach działających na konstrukcję) wskaźnik stateczności był wyższy niż wymagany 1,30. Dokonano również sprawdzenia stateczności chwilowej na poszczególnych poziomach wykopu. Najczęściej przyjmowano „klasyczny” układ gwoździ, gdzie gwoździe górne mają długości niezbędne do utrzymania stateczności chwilowej, natomiast stateczność ogólną nadają układowi gwoździe dolne, dłuższe, sięgające poza powierzchnię poślizgu. W trakcie modelowania modyfikowano parametry techniczne gwoździ gruntowych (długości, rozstaw itp.) dla określonych parametrów gwoździ: średnicy efektywnej buławy, wartości tarcia płaszczowego, poszukując za każdym razem najniekorzystniejszej powierzchni poślizgu (najmniejszego wskaźnika stateczności). Proces prowadzono do momentu uzyskania optymalnego rozwiązania techniczno-ekonomicznego.

#### 4.4. Zabezpieczenie budynków sąsiadujących

Problemem równie istotnym jak zapewnienie stateczności ścian wykopu było właściwe zabezpieczenie istniejących budynków historycznych, znajdujących się w bezpośredniej bliskości, tuż przy krawędzi wykopu, narażonych na silne jego oddziaływanie. Obiekty te z uwagi na swój stan techniczny (określony w inwentaryzacji jako dostateczny) oraz charakter

konstrukcji (budynki ceglane murowane) były szczególnie narażone na uszkodzenia wywołane przemieszczeniami, związanymi ze strefą odprężenia ośrodka gruntowego. W celu zminimalizowania wpływu wykopu na budynki istniejące zaprojektowano wzmocnienie ich posadowienia za pomocą mikropali. Podchwycenie obiektu odpowiednio dobranym układem mikropali pozwala na przeniesienie obciążeń od budynku na strefę najmniej narażoną na wpływ wykopu, poniżej jego dna. Tym samym minimalizuje się obciążenie obudowy wykopu, a przy odpowiednio dobranej jej sztywności uzyskuje się pożądaną efekt minimalnego wpływu wykopu na sąsiadujący obiekt. W tym przypadku sprawę komplikował dodatkowo fakt, że obiekty MS-79 (wieża wyciągowa szybu) oraz MS-8 (maszynownia) po projektowanej modernizacji miały pełnić nowe funkcje (odpowiednio: tarasu widokowego z windą panoramiczną oraz obiektu gastronomicznego). Zatem przy projektowaniu wzmocnienia posadowienia, poza funkcją ochronną, zabezpieczającą przed nadmiernymi, szkodliwymi przemieszczeniami, należało przewidzieć zmieniające się obciążenia i warunki pracy fundamentów mikropalowych.

Dla obiektu MS-79, biorąc pod uwagę rodzaj konstrukcji, zakres obciążeń działających na konstrukcję wieży wyciągowej oraz warunki geologiczno-inżynierskie w jej obrębie, do analizy przyjęto wykorzystanie mikropali typu Titan 73/53. Weryfikację wytrzymałości przyjętego zbrojenia oraz nośności zewnętrznej mikropali przeprowadzono zgodnie z EC 7 dla maksymalnej siły pionowej działającej na bloki zastrzałów. Założono, że mikropale będą przenosiły siły wyrwywające i wciskające działające na konstrukcję.

Po przeprowadzeniu kombinacji obciążeń projektowych dla schematu obliczeniowego układu ośmiu mikropali przyjęto maksymalne osiowe obciążenie mikropala:  $E_k = 412,50$  kN. Minimalna długość mikropala musi gwarantować uzyskanie trzonu iniekcyjnego o odpowiedniej długości w gruntach nośnych oraz zapewnić swobodne wykonanie głowic. Założono ponadto minimalne zagłębienie mikropali poniżej dna wykopu 1,50 m. W obliczeniach długości czynnej mikropala pominięto pierwsze 1,50 m długości mikropala – odcinek ten stanowi zakotwienie w fundamencie. Weryfikację wytrzymałości nośności wewnętrznej i zewnętrznej mikropali

przeprowadzono w programie DC-Pile. W wyniku obliczeń zaprojektowano mikropale 73/53 o długości 18 m.

Dla budynku MS-8 przewidziano wzmocnienie fundamentów oraz ich podbicie w części obiektu, w której należało wykonać w jego wnętrzu dodatkową kondygnację podziemną. Zaprojektowano układ mikropali podchwytujących, mających za zadanie przeniesienie pełnych obciążeń od ścian na warstwy gruntu poniżej dna wykopu, oraz krótszych mikropali podbijających, tworzących wypełnienie nowej ściany fundamentowej w części pogłębianej. Biorąc pod uwagę rodzaj konstrukcji, zakres obciążeń działających na konstrukcję budynku MS-8, projektowane pogłębienie części budynku o jedną kondygnację oraz warunki geologiczno-inżynierskie w jego obrębie, do analizy przyjęto wykorzystanie mikropali podchwytujących: pod ścianami zewnętrznymi w części pogłębianej budynku – Titan 73/53; pod pozostałymi odcinkami ścian zewnętrznych – Titan 73/56.

Założono, że mikropale będą przenosiły siły wciskające działające na konstrukcję ścian. Analiza obciążeń pod budynkiem MS-15 przeprowadzona została przez projektanta konstrukcji Nowego Muzeum Śląskiego (firma inżynierska STATYK). Po przeprowadzeniu kombinacji tych obciążeń dla schematu obliczeniowego układu mikropali pod ścianami w części pogłębianej w rozstawie 1,60 m przyjęto maksymalne osiowe obciążenie mikropala Titan 73/53 na poziomie 452 kN, w pozostałej części Titan 73/56 – 412 kN.

W obliczeniach długości czynnej mikropala pominięto pierwsze 1,50 m długości mikropala – odcinek ten stanowi zakotwienie w ścianie fundamentowej. Z obliczeń przeprowadzonych w programie DC-Pile wynikało, że założone mikropale 73/56 i 73/53 o długości 15 m spełnią wymagania co do przeniesienia obciążeń od ścian budynku MS-15 na warstwy gruntu poniżej dna wykopu. Wzdłuż ścian północnej i zachodniej (niesąsiadujących z wykopem) wystarczająca długość mikropali wynosi 9 m dla typu 73/53 i 73/56. Sztywność mikropali w części pogłębianej budynku zapewniała bezpieczną pracę (bez wyboczenia) pod warunkiem zachowania wymaganego reżimu technologicznego. Przewidywane osiadania według obliczeń pozostają bez ujemnego wpływu na nośność i użyteczność budynku MS-8.

## 5. Monitoring

Zgodnie z zaleceniami projektu, przez okres realizacji kondygnacji podziemnych budynki sąsiadujące z wykopem oraz skarpy (ściany) wykopu zabezpieczane konstrukcyjnie należało objąć systemem monitoringu. Monitoring obejmował pomiary przemieszczeń pionowych wskazanych obiektów sąsiadujących z wykopem, pomiary przemieszczeń poziomych ścian wykopów oraz pomiary przemieszczeń poziomych w głębi górotworu (pomiary inklinometryczne). Dla obserwacji sił w gwoździach na najbardziej obciążonych skarpach pionowych zainstalowane zostały systemowe wskaźniki obciążenia.

Monitoring konstrukcji budynków sąsiadujących z wykopem był szczególnie istotny ze względu na ich zabytkowy charakter. Pomiary konstrukcji zabezpieczającej wykop pozwoliły na obserwację i nadzorowanie pracy skarp (obudowy) wykopu, co umożliwiło weryfikację założeń projektowych. Przy takim postępowaniu istnieje możliwość wczesnego rozpoznania niekorzystnych zjawisk i odpowiednio wczesnej interwencji dla wyeliminowania potencjalnych zagrożeń. Jednocześnie na każdym etapie prac wymagany był dozór geotechniczny. Pozwoliło to na sprawne dostosowanie projektu zabezpieczenia skarp do faktycznych warunków gruntowych, co przekładało się na zwiększone bezpieczeństwo konstrukcji i pozwoliło na optymalizację ekonomiczną rozwiązań. Ich typ i rodzaj były bardzo precyzyjnie dopasowane do napotkanych warunków.

Należy zaznaczyć, że przewidziane rozwiązania geotechniczne sprawdziły się znakomicie, np. maksymalne osiadania budynku MS-8 szacowano na 6 mm, pomierzone wyniosły zaś jedynie 3 mm. Teoretyczne przemieszczenia poziome palisady kotwionej, zabezpieczającej wykop w tej części, według obliczeń szacowano na 36 mm, pomierzone wyniosły 7 mm.

Jako pełnoprawny element monitoringu wprowadzono w projekcie monitoring geotechniczny. Pod tym pojęciem należy rozumieć szereg obserwacji dokonywanych w obrębie górotworu przy odsłanianiu każdego kolejnego poziomu roboczego w celu bieżącej oceny zgodności założeń projektowych z warunkami rzeczywistymi. Wyniki tak prowadzonego monitoringu pozwoliły dostosowywać konstrukcję zabezpieczenia wykopu dla zapewnienia właściwego poziomu technicznego i ekonomicznego. Elementy konstrukcji, które mogły pod-



Ryc. 3. Konsultacje projektantki z kierownikiem robót

## 6. Aspekty wykonawcze, faza realizacji

Dla osób, które zajmują się stroną obliczeniową projektów zabezpieczeń głębokich wykopów, jest jasne, że im bardziej stroma jest ściana wykopu, tym intensywniejsze muszą być zabezpieczenia. W przypadku palisady wspornikowej, palisady kotwionej, ściany szczelinowej lub ścianki berlińskiej obudowa jest zwykle pionowa i na jej wymiarowanie wpływają oczywiście takie czynniki, jak parametry geotechniczne gruntów, głębokość wykopu, warunki wodne, obciążenia występujące za obudową. Z rozważań odpada praktycznie geometria zabezpieczenia z wyjątkiem ewentualnych ułatwień lub utrudnień wynikających z ukształtowania wykopu w planie. Jeśli inwestor dysponuje terenem choć trochę większym niż obrys wznoszonego obiektu, to w miejscach, gdzie nie występuje konieczność ochrony istniejących budynków w bezpośrednim sąsiedztwie wykopu, zawsze warto rozważyć wariant zabezpieczenia wykopu z pochyleniem skarpy. Optymalizacja kosztów zabezpieczenia wykopu zawiera się, w dużym uproszczeniu, między minimalnymi kosztami wykopu szerokoprzestrzennego bez żadnych zaawansowanych zabezpieczeń technicznych, gdzie koszty to zwiększone kubatury robót ziemnych, obliczenia określające geometrię bezpiecznego wykopu i wynikające z dobrej praktyki budowlanej powierzchniowe zabezpieczenie skarp przed opadami, a pionową ścianą obostrzoną wymogami często milimetrowych dopuszczalnych przemieszczeń na jej koronie. Między tymi skrajnymi przypadkami pozostaje często do zagospodarowania przez inwencję projektanta „drogocenne” ok. 60° nachylenia, rzutujące na koszt robót.

Na budowie nowego gmachu Muzeum Śląskiego można znaleźć przykłady zastosowania optymalizacji kosztów zabezpieczenia wykopów przez zróżnicowanie pochyleń ścian w pełnym zakresie. Wykop w segmentach oznaczonych A1, A2, A3, B, usytuowanych wzdłuż ul. Różdzieńskiego, został wykonany jako szerokoprzestrzenny o nachyleniu skarp 1:1,5. Na takie rozwiązanie pozwalały: prosta budowa geologiczna w tym rejonie (piaski średniozagęszczone), odległość granicy działki od krawędzi wykopu oraz niewielkie obciążenie naziomu tymczasową drogą technologiczną. W segmencie D1 wystąpiła duża zmienność warunków rzutujących

na nachylenie ścian wykopu. Dwie ściany: wschodnią i zachodnią, wykonano rozkopem (ściana wschodnia wykorzystana była jako zjazd do wykopu). Ściana północna położona została do nachylenia ok. 75°. Pochylenie takie wystarczyło jednak, by można było zastosować klasyczne już rozwiązanie w postaci ściany gwoździowanej z opinką elastyczną. Gwoździe gruntowe wykonywane były oczywiście na bieżąco w udostępnianych przez prace ziemne poziomach. Równie systematycznie w miarę pogłębiania wykopu wykonywana była opinka powierzchniowa z romboidalnej siatki stalowej wysokiej wytrzymałości Tecco firmy Geobrugg, pod którą rozkładano przepuszczalną dla wody wysączającą się ze skarpy geowłókninę. Zabezpieczenia powierzchniowe w tej technologii wymagają wcześniejszego przygotowania na koronie skarpy rolek siatki i włókniny o odpowiedniej długości i opinania odsłoniętej powierzchni na bieżąco na głowicach wykonanych już gwoździ. W trakcie zabezpieczania północnej skarpy sektora D wystąpiły okoliczności, które skłoniły nadzór autorski do wykorzystania interaktywności realizowanego projektu. Na ok. 80 m<sup>2</sup> dolnej części skarpy wystąpiły znacznie gorsze od oczekiwanych warunki gruntowo-wodne i należało zwiększyć charakter i intensywność wzmocnienia ściany. Zastosowano mocniejsze gwoździe oraz dołożono do stalowej siatki opinkę ze zbrojonego betonu natryskowego, zapewniając równocześnie odpowiednie zdrenowanie górotworu. Południowa skarpa wykopu w sektorze D miała bardziej złożoną geometrię z uwagi na bliskość zabytkowego budynku MS-8 i podziemnego tunelu łączącego budynek D z główną częścią muzeum. Dodatkowym wyzwaniem dla robót w tym rejonie była potrzeba zachowania w dobrej kondycji dwóch stuletnich płytaków, dla których zmodyfikowano kształt zabezpieczanych ścian, tworząc w planie i w przekroju linie łamane (wykonano też kotwione odciągi podtrzymujące drzewa). W ramach oszczędnego gospodarowania budżetem optymalizowano grubość opinki torkretowej i liczbę warstw siatki zbrojeniowej. Na ścianach o nachyleniu 3:1 stosowano zbrojenie pojedyncze, na ścianach pionowych – siatkę podwójną.

Bardzo istotną rolę przy prowadzeniu prac tego typu pełni osoba koordynująca roboty, które często prowadzone są przez różne firmy. Prace związane z pogłębianiem wykopu muszą być podporządkowane

legać dostosowaniu w ramach bieżącego monitoringu geotechnicznego, to parametry gwoździowania (typ, długość, rozstaw) oraz sposób obliczania (sztywne bądź elastyczne). Z uwagi na stopień złożoności oceny geotechnicznej masywu, wszelkie decyzje dotyczące ewentualnych zmian sposobu zabezpieczenia wykopu, wynikające z odmiennych od zakładanych warunków geotechnicznych górotworu, pozostawały w gestii projektanta działającego w porozumieniu z osobą posiadającą uprawnienia geologiczno-inżynierskie w kategorii VII lub VI. W zakresie monitoringu geotechnicznego obserwacjom podlegały:

- typ litologiczny utworów występujących w obrębie zabezpieczanych skarp,
- stan gruntów bądź stopień zwietrzzenia, w przypadku utworów skalistych wytrzymałość jednostkowa szacowana metodami polowymi,
- stopień zaburzenia górotworu (geologiczny wskaźnik jakości): strukturę, szczelinowatość, orientację przestrzenną spękań, jakość powierzchni spękań,
- warunki zawodnienia górotworu.

Orientacyjne określenie warunków stanowiących założenia wyjściowe do projektu w zakresie stateczności globalnej i odpowiedniego typu obliczania zebrano w specjalnych tabelach, co zwiększało transparentność tego elementu monitoringu i ułatwiało podejmowanie decyzji.



Ryc. 4. Widok w kierunku obiektu MS-8 i szybu Warszawa



Ryc. 5. Widok w kierunku budynku MS-15



Ryc. 6. Widok obudowy wykopu przy chronionym platanie

działaniom ekipy wykonującej zabezpieczenia ścian. Tempo robót ziemnych oraz ich sposób wykonywania ściśle zależą od przyjętego sposobu zabezpieczenia, reżimów technologicznych oraz warunków gruntowych warstw odsłanianych w miarę postępu robót.

Wzdłuż wschodniej i południowej ściany budynku MS-8 oraz wzdłuż zachodniej ściany budynku MS-15 wykonane zostały palisady z pali DFF o długościach do 19 m. Pale o średnicy 400 mm, zbrojone kształtownikami HEB, zostały zaprojektowane jako element ściany kotwionej o niewielkiej grubości. Kotwione palisady z uwagi na bardzo ograniczoną ilość miejsca zostały włączone do konstrukcyjnej współpracy ze ścianami nośnymi nowych budynków. Jest oczywistością, że pogłębianie wykopu osłoniętego palisadą daje dużo większą pewność prowadzenia prac przy kolejnych usuwanych warstwach, bardziej niezależniacząc te roboty od niespodzianek gruntowo-wodnych oraz od nadmiernie zapalczywych operatorów koparek. Palisady wspomniane wyżej zostały wykonane przy użyciu palownicy o masie ok. 65 t. W tych miejscach była możliwość zastosowania tak dużego sprzętu, ale w dwóch innych lokalizacjach tej budowy zastosowano w miejscach niedostępnych

Tab. 1. Zestawienie wykonanych robót geotechnicznych

Opis	Jedn.	Łączna liczba
Gwoździe gruntowe	m	14 691,0
Dreny wiercone	m	362,0
Opinka torkretowa	m <sup>2</sup>	2865,5
Opinka elastyczna – siatka Tecco	m <sup>2</sup>	1200,0
Mikropale	m	11 261,5
Mikropale kotwiące	m	3852,0
Pale DFF	m	1912,5
Kolumny jet grouting	m	695,8
Inklinometry	m	150,0

dla palownic iniekcyjne mikropale do stworzenia pionowej osnowy palisadowej, ułatwiającej prowadzenie wykopów. Usytuowane pionowo mikropale, wykonane w odstępie od 30 do 50 cm, skutecznie eliminowały ryzyko wysuwania się gruntu spod wykonywanej torkretem oblicówki ściany gwoździowanej z wykorzystaniem efektu przesklepienia.

Zabezpieczenie wykopów związane z budową nowego gmachu Muzeum Śląskiego stanowiło doskonały poligon do zastosowania całej gamy zróżnicowanego asortymentu wyrobów podstawowych i akcesoriów dodatkowych systemu geotechnicznego Titan. Użyto elementów pozwalających na wykonanie gwoździ gruntowych współpracujących z opinką elastyczną i sztywną obudową torkretową, ale wykonano też ścianę gwoździowaną zespoloną z dobudowaną do niej ścianą konstrukcyjną za pomocą tzw. podwójnych głowic. Wykonano podchwycenie podpór starej wieży wyciągowej – zabytkowego szybu Warszawa, zabudowując głowice mikropali w wykutych w jej stopach wnękach, podchwyciono mikropalami ściany zabytkowego budynku MS-8, zespalając ich głowice ocepem ze zwieńczeniem palisady z pali DFF i fundamentami obiektu, a w innym miejscu znalazło zastosowanie złącze bagnetowe, pozwalające na wykonanie mikropali „z pustym przewiercem”, tj. z pozostawieniem górnego końca mikropala pod ziemią w oczekiwaniu jego zastosowania w późniejszym etapie prac. W związku z bardzo zmieniającymi się lokalnie warunkami gruntowymi stosowano całą gamę systemowych koronek, pozwalających z jednej strony szybko prowadzić prace wiertnicze, a z drugiej optymalnie wykorzystywać nośność przewiercanych gruntów. Przysłowiową wisienką na torcie można by nazwać systemowe nakrętki ockowe, zainstalowane na mikropalach kotwiących, elastyczne odciążki podtrzy-

mujące zabezpieczone na krawędziach wykopu platany.

W trakcie realizacji opisanych w artykule robót firma Soley Sp. z o.o. wykonała dla generalnego wykonawcy, Budimeksu SA, specjalistyczne prace, zestawione zbiorczo w tabeli 1.

## 7. Podsumowanie

Opisana realizacja była zadaniem bardzo wymagającym zarówno od strony projektowej, jak i wykonawczej. Złożoność projektu wynikająca z geometrii wykopu oraz różnorodności potrzebnych typów i funkcji zabezpieczeń geotechnicznych była ponadstandardowa. W połączeniu z niezwykle skomplikowanymi warunkami geotechnicznymi sprawiło to, że projekt i wykonawstwo w klasycznym ujęciu stawały się niemożliwe do zrealizowania.

Zakończone sukcesem prace oraz zebrane w czasie ich trwania wyniki i obserwacje potwierdziły skuteczność niekonwencjonalnego podejścia do opisu i traktowania szczególnie złożonych ośrodków gruntowych, jak również pełne możliwości projektowania aktywnego, opartego na wielowątkowym monitoringu. Doskonale w tę koncepcję aktywnego, elastycznego projektowania wpisuje się system Titan, dający szerokie możliwości szybkiego reagowania na zmiany.

Trzy spójne elementy: technologia, podejście projektowe oparte na mniej oczywistej wiedzy, wyjątkowej elastyczności i kreatywności, jak również (a może przede wszystkim) wykonawstwo wymagające szczególnej staranności i kompetentnej kadry, ściśle współpracującej z projektantem i generalnym wykonawcą, pozwalają na niemalże dowolne kształtowanie inżynierskiej rzeczywistości.

Artykuł pierwotnie opublikowany jako referat w materiałach konferencyjnych *Głębokie wykopy 2013*.