

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

mgr inż. **Natalia Maca**
mgr inż. **Jakub Sierant**
TITAN Polska Sp. z o.o.

W dobie dużego zagęszczenia zabudowy i przy jednoczesnej znacznej rozległości terytorialnej aglomeracji najczęstszy obecnie kierunek rozwoju przestrzeni miejskiej odbywa się, z coraz większą intensywnością, wzdłuż nowej osi urbanistycznej. Ewolucja przestrzeni obejmuje nowe płaszczyzny poprzez wykorzystanie obszarów leżących zarówno ponad, jak i pod powierzchnią terenu miejskiego. Efektem rozwoju są (powszechnie już) wysokie budynki z rozbudowanymi kondygnacjami podziemnymi w centrach miast oraz wyraźna tendencja do odzyskiwania terenu spod istniejących obiektów lub ich wgłębnej rozbudowy. Projektowanie i wykonanie takich konstrukcji jest już w zasięgu technicznym. Wymaga jednak szczególnej uwagi i staranności. Musi obejmować warunki związane nie tylko z nowo budowanym obiektem, ale również – a czasami przede wszystkim – z już istniejącymi budynkami w bezpośrednim sąsiedztwie prowadzonych prac, dla których zazwyczaj niezbędne jest wykonanie głębokich wykopów. Sprawa jest szczególnie trudna, kiedy weźmiemy pod uwagę zabytkowy charakter budynków zlokalizowanych w centrach większości dużych miast. Takie budynki są wyjątkowo wrażliwe na przemieszczenia podłoża nierozzerwalnie związane z wykopami i ich właściwe zabezpieczenie wymaga szeregu szczególnych zabiegów geotechnicznych.

Artykuł przedstawia **zagadnienia związane z projektowaniem i wyko-**

nawstwem 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 sprzężenia zwrotnego projektu z wykonawstwem poprzez rozbudowany, wieloaspektowy system monitoringu.

Informacje ogólne o inwestycji

Siedziba Nowego Muzeum Śląskiego – pierwszego obiektu wyznaczającego tzw. oś kultury – została zlokalizowana w Katowicach przy ulicy Kopalnianej 6, 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 oraz budynków dawnej kopalni. Zamierzenie architektoniczne zrealizowano poprzez:

- ulokowanie obiektu głównego – przestrzeni ekspozycyjnych, konferencyjnych, technicznych wraz z parkingiem pod powierzchnią terenu;
- adaptację historycznych obiektów dawnej kopalni do celów wystawienniczych, 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. Ten głęboki wykop przebiegał bezpośrednio przy trzech adaptowanych do nowych funkcji obiektach objętych ochroną konserwatorską:

- budynku maszyny wyciągowej Szybu „Warszawa” (obiekt MS-8) adaptowanego dla celów gastronomicznych;
- wieży wyciągowej Szybu „Warszawa” (obiekt MS-79) adaptowanej dla funkcji widokowych poprzez dobudowanie windy panoramicznej i tarasu widokowego;
- magazynie odzieżowym (obiekt MS-15) adaptowanym dla celów wystawienniczych – Centrum Scenografii Polskiej.

Informacje o inwestycji:

Investor: Muzeum Śląskie w Katowicach

Architekt: Riegler-Riewe, Graz, Austria

Projekt konstrukcji: Pracownia Inżynierska STATYK, Katowice

Generalny wykonawca: Budimex S.A.

Wykonawca zabezpieczeń

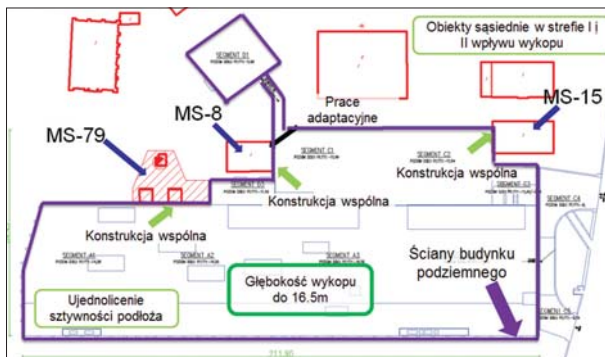
geotechnicznych: Soley Sp. z o.o., Balice k. Krakowa

Projekt zabezpieczeń

geotechnicznych: Soley Sp. z o.o., Balice k. Krakowa;

TITAN Polska Sp. z o.o., Kraków

Wartość inwestycji: 324 mln zł



Rys. 1 | Plan sytuacyjny terenu budowy



Fot. 1 | Panorama budowy

Główne założenia techniczne do projektu zabezpieczeń geotechnicznych

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

1. zabezpieczenie głębokiego, szerokoprzestrzennego wykopu o zróżnicowanej geometrii;
2. zabezpieczenie obiektów zabytkowych zlokalizowanych bezpośrednio przy krawędzi planowanego głębokiego wykopu;
3. wykonanie zabezpieczeń geotechnicznych umożliwiających wykonanie w istniejącym budynku MS-8 dodatkowej kondygnacji podziemnej, szybu windowego i skomunikowanie go poprzez 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.

Warunki geotechniczne i hydrogeologiczne

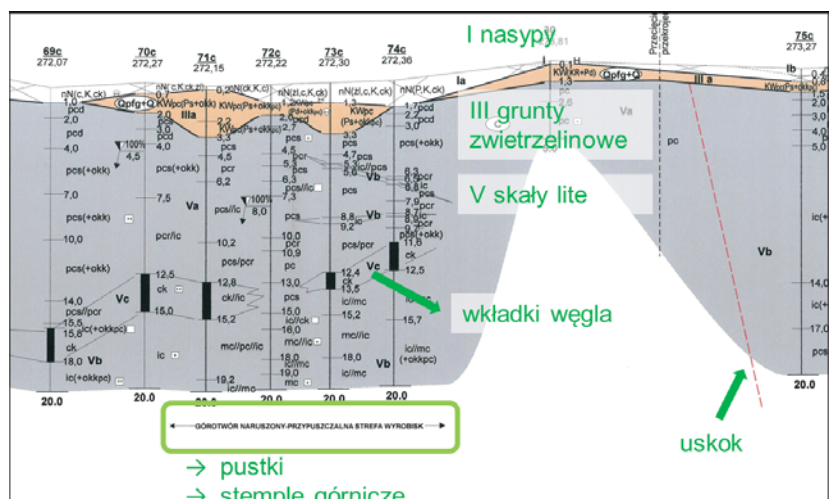
Warunki geotechniczne i hydrogeologiczne w podłożu zostały określone przez firmę PROGEO z Katowic.

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 i piaskowce w różnym stopniu zwietrzienia oraz bardzo zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych, ich zwietrzeliny oraz przewarstwienia węgla. Na obszarze inwestycji nie stwierdzono występowania ciągłych poziomów wodonośnych, choć napotkano na niewielkie sączenia i natrafiono na podpowierzchniowe wody. Ponadto na obszarze inwestycji znajdowały się dwa duże uskoki przecinające ścianę wykopu, a w trakcie prowadzenia robót stwierdzono szereg drobniejszych niezgodności i zaburzeń tektonicznych.

Pogórnicy charakter ośrodka objawiał się natomiast występowaniem quasi-ciągłych zaburzeń tektonicznych, obecnością pustek poeksploatacyjnych, stref spękań i rozluźnień. Obszar objęty był w przeszłości płytką eksploatacją, co pozostawiło po sobie ślady w postaci starych zrobów i poszczelnienia masywu.

Projekt zabezpieczeń geotechnicznych

Przyjęty model ośrodka gruntowego Podsumowując **warunki geotechniczne na obszarze inwestycji, należałoby je określić jako bardzo skomplikowane**, wymykające się przyjętym w tradycyjnej geotechnice regułom i modelom opisu. Gromadzenie i weryfikację danych wyjściowych do projektu oparto zatem w znacznej mierze na metodzie obserwacyjnej



Rys. 2 | Przykładowy przekrój geotechniczny

z bardzo dużym kryterium opisu wg teorii Hoeka-Browna. W połączeniu z wiedzą geologiczno-inżynierską na temat procesów i zjawisk geodynamicznych pozwoliło to na dobre prognozowanie realnych właściwości i sposobu zachowania górotworu.

Przyjęty model projektu

Biorąc pod uwagę rodzaj i zakres niezbędnych do wykonania robót oraz uwarunkowania geotechniczne ustalono, iż jedyną metodą, która może zapewnić odpowiednią jakość techniczną rozwiązań, wymagany poziom bezpieczeństwa, właściwe tempo robót oraz zakładany efekt ekonomiczny, jest projekt aktywny, w ramach którego – dzięki ciągłej weryfikacji poprzez monitoring – wprowadzane rozwiązania były na bieżąco dostrajane do faktycznie napotykanym warunków.

Zabezpieczenie ścian/skarp wykopów

Analizując uwarunkowania geotechniczne i logistyczne prowadzenia robót w głębokim wykopie przyjęto, że skarpy na odcinkach newralgicznych zostaną zabezpieczone przez gwoździowanie, przy czym przyjęto nachylenie wszystkich skarp 75° lub 90° . 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 me-

tody równowagi granicznej, czyli tzw. metodę „pasków” GGU-STABILITY v. 9.28 wraz z modułem GGU-NAIL do analizy konstrukcji gwoździowanych. Najczęściej przyjmowano „klasyczny” układ gwoździ, gdzie gwoździe górne mają długości niezbędne do utrzymania stateczności chwilowej, natomiast stateczność ogólną nadają układy gwoździe dolne, dłuższe, sięgające poza powierzchnię poślizgu.

Zabezpieczenie budynków sąsiadujących

Problemem równie istotnym jak zapewnienie stateczności ścian wykopu było właściwe zabezpieczenie istniejących budynków historycznych, znajdujących się tuż przy krawędzi wykopu, narażonych na silne jego oddziaływanie. Obiekty te, z uwagi na swój stan techniczny (dostateczny) oraz charakter konstrukcji (ceglane murowane), były szczególnie podatne na uszkodzenia wywołane przemieszczeniami. W celu zminimalizowania wpływu wykopu na budynki istniejące, **zapro-**

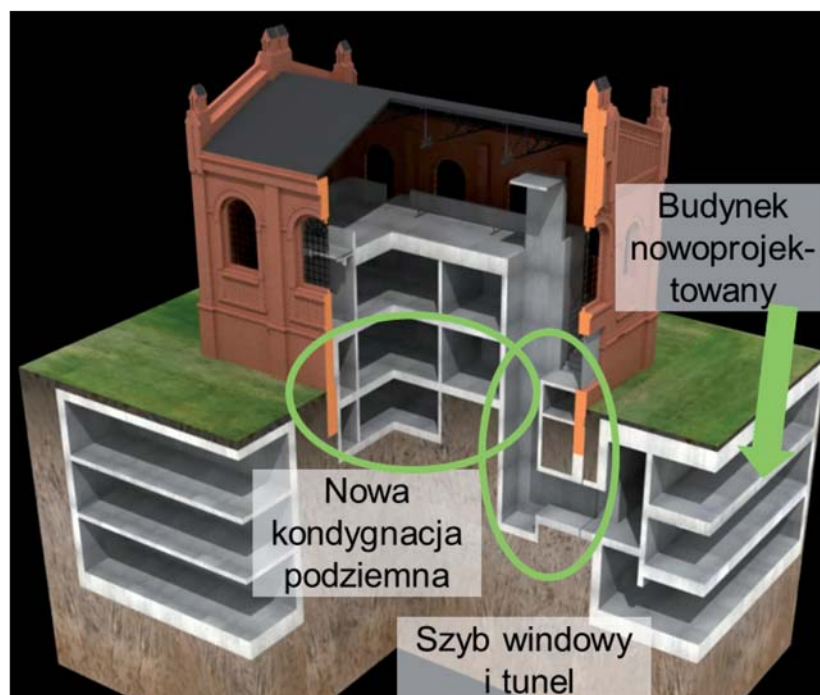
jektowano wzmocnienie ich posadowienia za pomocą mikropali.

Odpowiednio zaprojektowane podchwycenie ścian pozwala na przeniesienie obciążeń od budynku na strefę poniżej jego dna wykopu i minimalizację obciążenia obudowy wykopu. W tym przypadku sprawę komplikował dodatkowo fakt, iż obiekty MS-79 oraz MS-8 po projektowanej modernizacji miały pełnić nowe funkcje. Zatem przy projektowaniu wzmocnienia posadowienia należało przewidzieć zmieniające się obciążenia i warunki pracy fundamentów mikropalowych. Ponadto prace adaptacyjne prowadzone były jednocześnie z głębieniem wykopu pod główny gmach, co stanowiło dodatkową trudność.

Dla obiektu MS-79, biorąc pod uwagę rodzaj konstrukcji, zakres obciążeń działających na konstrukcję wieży wyciągowej oraz warunki geologiczno-inżynierskie w jej obrębie, do jej wzmocnienia wykorzystano mikropale typu TITAN 73/53 dł. 18 m. Założono, że mikropale będą przenosiły siły wry-



Fot. 2 | Widok północnej ściany wykopu z różnymi rodzajami zabezpieczeń



Rys. 3 | Wizualizacja docelowego kształtu budynku MS-8 z zaznaczeniem wprowadzonych w ramach adaptacji części (nowa kondygnacja podziemna, szyb windy z tunelem przechodzącym pod ścianą szczytową do budynku głównego) oraz fragmentami kondygnacji sąsiadującego budynku nowo projektowanego gmachu głównego



Fot. 3 | Wykonywanie mikropali podchwytyjących ścianę budynku

wające i wciskające działające na konstrukcję. Weryfikację wytrzymałości nośności wewnętrznej i zewnętrznej mikropali przeprowadzono w programie DC-Pile.

Dla budynku MS-8 przewidziano wzmocnienie fundamentów oraz ich podbicie w części obiektu, w której należało wykonać w jego wnętrzu dodatkową kondygnację podziemną. Przewidziano układ mikropali podchwytyjących, 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. Po przeprowadzeniu kombinacji obciążeń dla schematu obliczeniowego układu mikropali pod ścianami w części pogłębianej w rozstawie 1,60 m przyjęto do realizacji mikropale TITAN 73/53, a w pozostałej części TITAN 73/56, wszystkie dł. 15 m. Wzdłuż ścian północnej i zachodniej (niesąsiadujących z wykopem) wystarczająca długość mikropali wynosi 9 m. Szytywność mikropali w części pogłębianej budynku zapewniała bezpieczną pracę (bez wyboczenia) pod warunkiem zachowania wymaganego reżimu technologicznego. Przewidywane osiadania wg obliczeń bez ujemnego wpływu na nośność i użyteczność budynku MS-8.

Monitoring

Budynki sąsiadujące z wykopem oraz skarpy (ściany) wykopu zabezpieczane

konstrukcyjnie zostały objęte systemem monitoringu. Monitoring obejmował pomiary przemieszczeń pionowych wskazanych obiektów sąsiadujących z wykopem, pomiary przemieszczeń poziomych ścian wykopów oraz pomiary przemieszczeń poziomych wgłębi górotworu (pomiary inklinometryczne). Dla obserwacji sił w gwoździach na najbardziej obciążonych skarpach pionowych zainstalowane zostały systemowe wskaźniki obciążenia.

Pomiary konstrukcji geotechnicznych i budynków istniejących pozwoliły na obserwację oraz nadzorowanie ich pracy, co umożliwiło weryfikację założeń projektowych. Przy takim postępowaniu istnieje możliwość wczesnego rozpoznania niekorzystnych zjawisk i odpowiednio wcześniej podjętej interwencji dla wyeliminowania potencjalnych zagrożeń.

Należy zaznaczyć, iż przewidziane rozwiązania geotechniczne sprawdziły się znakomicie: dla przykładu, 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, wg obliczeń – 36 mm, pomierzone – 7 mm.

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

Aspekty wykonawcze, faza realizacji

Podczas budowy nowej Siedziby Muzeum Śląskiego wykorzystano cały

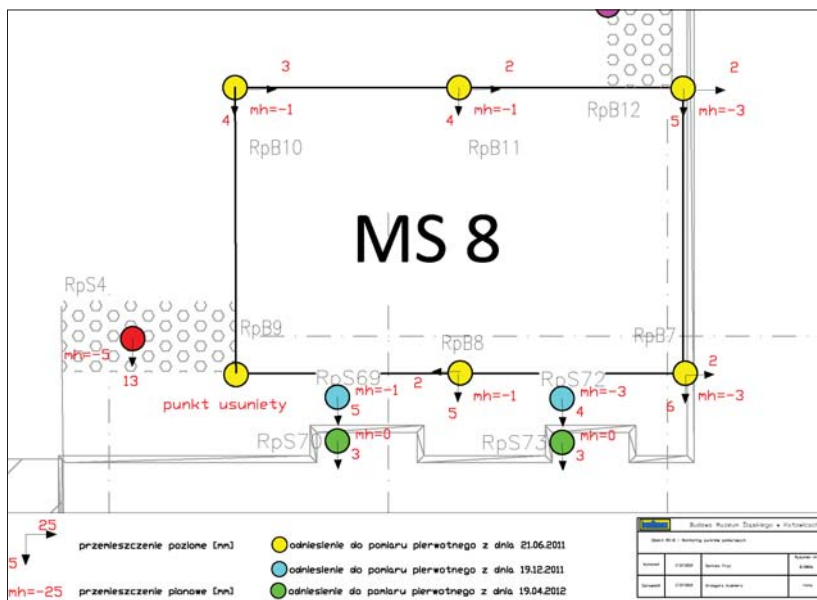
wachlarz rozwiązań geotechnicznych. Pierwszym z nich są konstrukcje gwoździowane. I tak w miejscach, gdzie możliwe było nachylenie ścian wykopu pod kątem 75°, zastosowano klasyczne już rozwiązanie w postaci ściany gwoździowanej z opinką elastyczną. Gwoździe gruntowe wykonywane były oczywiście na bieżąco 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.

Na skarpach wykopu w bezpośredniej bliskości budynków istniejących lub w rejonach o trudniejszych warunkach geotechnicznych oraz na ścianach pionowych zastosowano konstrukcje gwoździowane z opinką torkretową o zróżnicowanej grubości i zbrojeniu. Dodatkowym wyzwaniem dla robót w rejonie wykopu była potrzeba zachowania w dobrej kondycji dwóch stuletnich platanów, dla zabezpieczenia których wykonano kotwione odciążki podtrzymujące.

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



Fot. 4 | Wykonywanie pali DFF wzdłuż ściany budynku MS-8



Rys. 4 | Przykładowy raport z wynikami jednodniowego monitoringu geodezyjnego dla budynku MS-8

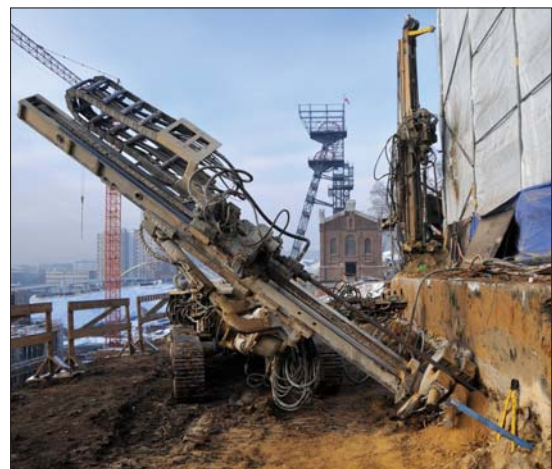
HEB, zaprojektowane zostały jako element ściany kotwionej o niewielkiej grubości. Kotwione palisady z uwagi na bardzo ograniczoną ilość miejsca zostały włączone do konstrukcyjnej współpracy ze ścianami nośnymi nowych budynków. Jest oczywistością, że pogłębianie wykopu osłoniętego palisadą daje dużo większą pewność prowadzenia prac przy kolejnych usuwanych warstwach, uniezależniając bardziej te roboty od niespodzianek gruntowo-wodnych oraz

od nadmiernie zapalczwych operatorów koparek. W tych miejscach niedostępnych dla dużych palownic wykonano iniekcyjne mikropale do stworzenia pionowej osnowy palisadowej, skutecznie eliminującej ryzyko wysuwania się gruntu spod wykonywanej torkretem oblicówki ściany gwoździowanej z wykorzystaniem efektu przesklepienia.

Zabezpieczenie wykopów związane z budową Nowego Muzeum Śląskiego stanowiło doskonały poligon do



Fot. 5 | Widok w kierunku budynku MS-15



Fot. 6 | Wykonywanie mikropali kotwiących palisadę wzdłuż budynku MS-15, w tle budynek MS-8 i wieża wyciągowa MS-79

zastosowania całej gamy wyrobów podstawowych i akcesoriów dodatkowych systemu geotechnicznego TITAN. Użyto elementów pozwalających na wykonanie gwoździ gruntowych współpracujących z opinką elastyczną oraz 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 zespalać 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 przewiertem”, 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.



Fot. 7 | Widok w kierunku obiektu MS-8 i Szybu Warszawa

W trakcie realizacji opisanych w artykule robót firma Soley sp. z o.o. wykonała dla generalnego wykonawcy – Budimex S.A. specjalistyczne prace zestawione zbiorczo w tabeli 1.

Podsumowanie

Opisana realizacja była zadaniem bardzo wymagającym zarówno od strony projektowej, jak i wykonawczej. Złożo-

ność 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. W tę koncepcję aktywnego, elastycznego projektowania wpisuje się system TITAN.

Trzy spójne elementy: technologii, 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.

Tab. 1 | Zestawienie wykonanych robót geotechnicznych

opis	jednostka	łącna ilość
gwoździe gruntowe	m	14 691,0
dreny wiercone	m	362,0
opinka torkretowa	m ²	2 865,5
opinka elastyczna – siatka Tecco	m ²	1 200,0
mikropale	m	11 261,5
mikropale kotwiące	m	3 852,0
pale DFF	m	1 912,5
kolumny jet-grouting	m	695,8
inklinometry	m	150,0