

# Coraz głębiej, coraz gęściej – wyzwania geotechniczne w projektach realizowanych w zabudowie miejskiej

tekst: **NATALIA MACA**, Titan Polska Sp. z o.o., zdjęcia: **TITAN POLSKA Sp. z o.o.**

W ostatnich dziesięcioleciach kierunek rozwoju miast uległ znacznej zmianie – rozbudowa realizuje się głównie w osi pionowej, przy czym nie dotyczy to już tylko budowy (powszechnych już) wysokich budynków z rozbudowanymi kondygnacjami podziemnymi czy zagospodarowywania nawet niewielkich działek w gęstej zabudowie. Coraz intensywniej również odzyskuje się przestrzeń spod istniejących obiektów lub wykonuje ich wglębną rozbudowę. Te tendencje wiążą się nierozdzielnie z koniecznością realizacji wykopów o stale rosnącej głębokości i do niedawna nieosiągalnym poziomie złożoności.

Oczywiście, zabezpieczenie głębokich wykopów w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących budynków, tym bardziej połączone z wykonaniem wykopu pod takimi budynkami (ryc. 1), choć jest dzisiaj technicznie wykonalne i wykonywane, wymaga szczególnej uwagi i staranności. Jak wszystkie konstrukcje geotechniczne, takie obiekty obciążone są znacznym ryzykiem wynikającym z charakteru gruntu jako materiału budowlanego i z ograniczonego dostępu do konstrukcji. Dodatkowymi – a czasami decydującymi – czynnikami są wymogi związane z istniejącymi budynkami w strefie oddziaływania wykopu, zwłaszcza kiedy weźmiemy pod uwagę zabytkowy charakter budynków zlokalizowanych w centrach większości dużych miast oraz aspekty logistyczne takich realizacji.

W artykule wymieniono najważniejsze wyzwania związane z projektowaniem głębokich wykopów zlokalizowanych pod i w bezpośredniej bliskości istniejących budynków. Zestawienie to nie wyczerpuje całej tematyki i nie stanowi listy kontrolnej,

ale odzwierciedla obserwacje z działalności zawodowej dotyczące często spotykanych błędów prowadzących do problemów realizacyjnych, awarii, a nawet katastrof budowlanych tego typu konstrukcji.

## Planowanie

Fundamentalny dla sukcesu projektu – zarówno pod kątem bezpieczeństwa, jak i efektu ekonomicznego – może być etap przedprojektowy. Już w stadium opracowań koncepcyjnych oraz przygotowania warunków kontraktu należy ustalić kwestie techniczne, które stanowią ramę całego projektu, a których zaniedbanie czy nieprawidłowe zdefiniowanie skutkować będzie niską jakością prac (projektowych i wykonawczych), niepotrzebnie wysoką ceną lub trudnościami na kolejnych etapach, nie wyłączając bezpieczeństwa. Zagadnienia te związane są ściśle ze zróżnicowaniem poziomu niezawodności konstrukcji, zintegrowanym z nim systemem zarządzania jakością oraz analizą i zarządzaniem ryzykiem.

Od głębokości wykopu, zasięgu strefy oddziaływania, identyfikacji obiektów (budynków, sieci uzbrojenia, ale też obiektów przyrodniczych) w niej zlokalizowanych, a także ich wartości historycznej, przyrodniczej i wrażliwości na deformacje czy w końcu rozpoznania wymogów społecznych zależeć będzie klasa konsekwencji. To kryterium bezpośrednio przekłada się na zróżnicowanie poziomu niezawodności i zarządzanie jakością zgodnie z normami [1] oraz [2]. Warto zauważyć, że wdrożenie tego systemu pozwala docelowo na optymalizację ekonomiczną, daje wytyczne co do kompetencji i doświadczenia osób zaangażowanych w projekt oraz poziomu nadzoru.

Jednocześnie należy dokonać ustalenia strategii zarządzania ryzykiem, a także identyfikacji i jakościowej oceny ryzyka dla inwestycji, czego postawy znaleźć można w normie [3].

Trudno wyjaśnić, dlaczego zarządzanie ryzykiem jest marginalizowane w projektach geotechnicznych, które już ze swojej natury są obarczone istotnym ryzykiem, przy czym te będące przedmiotem niniejszego artykułu są wyjątkowo wymagające. Krytycznym aspektem jest tutaj również stworzenie mapy odpowiedzialności zaangażowanych stron, prowadzące do stosownego przydziału ról i podziału ryzyka między wyko-



Ryc. 1. Głębinie wykopu dla nowej kondygnacji pod budynkiem teatru – podchwycenie stężonymi grupami mikropali

nawcą i inwestorem. Niestety, o ile w projektach prowadzonych według procedur FIDIC temat jest nieco sformalizowany, o tyle w większości przetargów publicznych nie jest stosownie uregulowany (ryzyko ponosi wykonawca). Prowadzi to z jednej strony do zawyżania cen, a z drugiej określane jest jako jedna z najczęstszych przyczyn awarii budowlanych w geotechnice. W tej sytuacji wdrożenie choćby namiastki analizy ryzyka ma zasadnicze znaczenie dla efektywnej realizacji projektu.

## Projektowanie

Zabezpieczenie głębokiego wykopu w zabudowie miejskiej wymaga od projektanta znajomości problemów statyki, geotechniki, zwłaszcza współpracy konstrukcji z gruntem, specjalistycznej wiedzy z zakresu mechaniki gruntu i technologii budowy. Jednocześnie to ta część przedsięwzięcia budowlanego decyduje o powodzeniu i bezpieczeństwie dalszych etapów prac konstrukcyjnych.

Dlatego w procesie projektowania należy dokonać wieloaspektowej analizy i oceny szeregu zagadnień potencjalnie wpływających na efekt projektu. Dodatkowo, aby analiza ta przyniosła wymierne rezultaty w postaci wyboru najbardziej optymalnego rozwiązania, powinna mieć charakter postępowy, dostosowany do etapu projektowego. Przy takiej metodzie w kolejnych fazach projektowania stopniowo zwiększa się zakres i dokładność rozpoznania geotechnicznego, stosownie do coraz bardziej skonkretyzowanych wymagań odpowiednich dla przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego, i dokonuje się (iteracyjnie) ewentualnych modyfikacji przyjętych założeń. Dzięki temu ostatecznie dysponuje się dokładnymi danymi, dostosowanymi do technologii, funkcji oraz sposobu obliczeń konstrukcji zabezpieczającej. Wymienione w dalszej części punkty należy rozpatrywać zatem również w aspekcie ich wzajemnych zależności i istotności dla konstrukcji, co może ulec zmianie wraz z zaawansowaniem procesu projektowego. Warto tu też zauważyć, że taki model progresywnego projektowania jest coraz bardziej promowany w rekomendacjach branżowych i znajduje odzwierciedlenie w nowych wersjach norm europejskich.

Wśród pierwszych zagadnień, które należy rozpoznać i które decydować będą o sposobie zabezpieczenia i oddziaływaniu wykopu na obiekty sąsiednie, są warunki geotechniczne i hydrogeologiczne. Mowa tu nie tylko o rodzaju gruntów w podłożu, ale ocenie ich parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych oraz szczególnych właściwości. Wydawałoby się to kwestią oczywistą, tym bardziej że techniki i jakość rozpoznania gruntu są coraz lepsze, ale niestety wiele awarii obudów wykopów związanych jest właśnie z brakami w tym zakresie.

Nie można zapominać, że sposób badania i ocena parametrów geotechnicznych do projektowania zależy m.in. od rodzaju konstrukcji, jej współpracy z gruntem, metody obliczeń, a także historii rozwoju naprężeń i – co krytyczne dla przedmiotu niniejszego artykułu – zakresu odkształceń itp. Nadal zdarza się, że tak złożone konstrukcje, choć projektowane z wykorzystaniem wyrafinowanych narzędzi numerycznych, opisywane są parametrami wyprowadzonymi z normy [4], co może prowadzić do niemiernodajnych wyników z dziedziny bezpieczeństwa, a na pewno przemieszczeń. Dla właściwej prognozy tych ostatnich decydujące będzie odpowiednie opisanie sztywności gruntów, stosownie do przyjętego modelu konstytutywnego.

Dodatkowo przy doborze technologii i w obliczeniach statycznych należy wziąć pod uwagę takie cechy gruntów, jak wrażliwość na obecność wody (grunty ekspansywne, zapadowe) czy drgania. W końcu, opracowując model geotechniczny, należy uwzględnić prognozowane w podłożu zmiany, powstałe wskutek wykonywania i eksploatacji obiektu, np. zmiana naprężenia, warunków wodnych, termicznych (coraz popularniejsze konstrukcje geotermalne czy termoaktywne). Jak zatem widać, do zaplanowania badań i oceny ich wyników niezbędny jest udział projektanta geotechnika.

Jeśli chodzi o kwestie związane z obecnością wody w gruncie, to jej oddziaływanie również może mieć kluczowe znaczenie. Głębokość zalegania zwierciadła wody gruntowej, jej swobodny bądź napięty charakter, możliwość odciążenia jej dopływu lub pompowania decydować będą o przyjętych rozwiązaniach, wymiarowaniu elementów konstrukcji, stateczności dna wykopu i jego wpływie na otoczenie. Problemy te, choć dobrze opisane w literaturze fachowej, np. [5], są czasem bagatelizowane, a przecież zjawiska związane z ciśnieniem wody w porach gruntu lub jej przepływem są jednymi z powszechnych źródeł awarii.

Podstawowym wyzwaniem dla budownictwa podziemnego w miastach jest jednak aspekt deformacji terenu i wpływu tych deformacji na istniejące elementy zabudowy. To właśnie kwestia użyteczności obiektów zlokalizowanych w strefie oddziaływania wykopu jest sednem procesu projektowego. U jego podstawy leży określenie zasięgu strefy wpływu i wrażliwości zlokalizowanych w niej obiektów z ustaleniem granicznych wartości deformacji (pomocne mogą w tym być rekomendacje europejskie i krajowe, np. [6], norma [1] itp.). Oczywiście, obszar strefy oddziaływań zależy od rodzaju i sztywności obudowy, więc może ulec zmianom wraz z dostosowaniem koncepcji projektowej do aktualizowanych danych.

Samo prognozowanie przemieszczeń obudowy wykopu i otaczającego gruntu (a z nim obiektów) jest zagadnieniem złożonym. Można wykorzystać w tym celu:

- doświadczenia porównywalne – wyniki pomiarów przemieszczeń podobnych konstrukcji w zbliżonych warunkach geotechnicznych. Choć mogą one dać najdokładniejsze prognozy, są w praktyce trudne do zastosowania ze względu na złożony i niepowtarzalny charakter omawianych projektów;
- metody półempiryczne – oparte na uproszczonych modelach zalecenia obliczeniowe, np. zgodnie z [6] czy nomogramy dla typowych przypadków, np. [7];
- metody analityczne, głównie metoda modułu reakcji podłoża, które jednak pozwalają jedynie na predykcję przemieszczeń obudowy, w dodatku bardzo silnie zależnych od wyznaczonego, niemierzalnego modułu  $k_{rr}$ . Pośrednio, wykorzystując uzyskane przemieszczenia poziome obudowy, można oszacować osiadanie terenu (analitycznie), ale dokładność takich wyników jest dyskusyjna. Ponadto metody te generalnie nie uwzględniają zjawiska odprężenia gruntu ani innych efektów związanych z osobliwością zachowania się gruntów [8];
- metody numeryczne – jako jedyne pozwalają na odzwierciedlenie pracy nawet najbardziej złożonego przestrzennie układu wykopu, istniejących i projektowanych konstrukcji z uwzględnieniem zarówno specyfiki reakcji gruntu, jak i pełnego przebiegu prac budowlanych (etapowanie, odwodnienie, konsolidacja, sprężanie itp.). Techniki obliczeniowe i modele konstytutywne są też coraz dokładniejsze,



umożliwiają projektowanie pracy konstrukcji bardzo zbliżone do rzeczywistej. Do oceny deformacji zaleca się odejście od prostych, idealnie sprężysto-plastycznych modeli z kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra i stosowanie zaawansowanych modeli konstytutywnych (z nieliniową zależnością sztywności od naprężeń i odkształceń; wiele prac, np. [9], zajmuje się tym zagadnieniem). Trzeba jednak mieć na uwadze, że nawet najbardziej wyrafinowany model numeryczny nie da satysfakcjonujących wyników, jeśli przyjęte założenia będą błędne. Dlatego tak istotny jest odpowiedni opis modelu gruntu i materiału konstrukcyjnego oraz stosowne do zakresu ich pracy wartości opisujących je parametrów (charakterystycznych lub średnich, stosownie do modelu zniszczenia), zwłaszcza odkształceniowych, dobór podejścia obliczeniowego, a także odwzorowanie etapów prac [10]. Nie bez znaczenia pozostaje kwestia walidacji modeli, kalibracji danych oraz analizy wrażliwości. Warto tu też zaznaczyć, że sprawdzenie stanu użyteczności w obliczeniach numerycznych nie jest tożsame z najlepszym oszacowaniem deformacji.

W zależności od wpływu projektowanych robót (deformacje terenu, obniżenia zwierciadła wód gruntowych) na istniejące obiekty może zająć potrzeba zabezpieczenia ich konstrukcji. Do wzmocnienia konstrukcji stosuje się ściągi lub usztywnienia w różnych poziomach, a także iniekcje uszkodzonych murów. Żeby zabezpieczyć obiekty przed skutkami nierównomiernych przemieszczeń lub je ograniczyć, stosuje się wzmocnienia fundamentów, ich podparcie lub podchwycenie. Wykorzystuje się tutaj kolumny iniekcyjne – choć należy mieć na uwadze, że stosowanie wysokich ciśnień jak w technologii jet grouting w niektórych przypadkach może doprowadzić do pogorszenia warunków i niekontrolowanych przemieszczeń zabezpieczanego obiektu – oraz mikropale, odpowiednio połączone z konstrukcją istniejącą. Podchwycenie mikropalami jest też zasadniczą metodą pozwalającą na głębienie wykopu pod budynkami. Przy odpowiedniej ich aranżacji i usztywnieniu umożliwiają bezpieczne „zawieszenie” budynku wysoko ponad dnem realizowanego wykopu (ryc. 2).



Ryc. 2. Podchwycenie elewacji wieżami mikropalowymi w celu wykonania kondygnacji podziemnych pod dawną areną walki byków

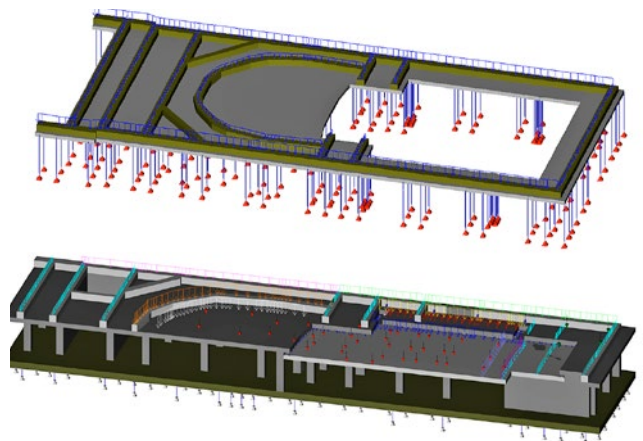
I wreszcie, chociaż jest to zagadnienie bazowe, to zgodnie z opisanym modelem projektowania progresywnego warto po kolejnych krokach rozważyć, czy przyjęte rozwiązania technologiczne uwzględniają specyficzne wyzwania związane z realizacją wykopu w gęstej zabudowie, takie jak:

- funkcja konstrukcji – dobór obudowy wykopu i podchwycenia ścian musi uwzględniać przede wszystkim konieczność minimalizacji przemieszczeń (zatem sztywne palisady sprawdzą się lepiej niż ściana berlińska), wymaganą trwałość (i ewentualne wykorzystanie jako konstrukcja docelowa nowego obiektu) oraz szczelność. Ponadto w projektach obciążonych tak dużym ryzykiem jak omawiane rekomenduje się organicznie jednostkowej odpowiedzialności pojedynczego elementu konstrukcyjnego, czyli np. gęstszy rozstaw kotew o mniejszym obciążeniu; na rycinie 3 widoczne jest zróżnicowanie rodzajów obudowy w zależności od bliskości zabudowy i jej wrażliwości;



Ryc. 3. Głęboki wykop przylegający do zabytkowych obiektów zabezpieczony w różnych technologiach – w budynku w głębi wykonywana jest nowa kondygnacja podziemna z tunelem pod ścianą szczytową

- ograniczenia gabarytowe – podchwycenie fundamentów wykonywane z wnętrza budynku realizowane może być tylko małą wiertnicą, a same mikropale muszą być łączone z małych odcinków (ryc. 4), z kolei wykonywanie obudowy przy



Ryc. 4. Koncepcja podchwycenia fragmentu konstrukcji i zabezpieczenia wykopu pod częścią zabytkowego budynku

istniejącej ścianie zawęża wybór technologii do tych realizowanych dostosowanym do tej funkcji sprzętem (*front of the wall*);

- warunki geotechniczne – np. w gruncie kamienistym pograżenie ścianki szczelnej jest praktycznie niewykonalne, a w gruntach wrażliwych na zawilgocenie zaleca się konstrukcje ograniczające napływ wody za ścianę czy w głąb wykopu;
- ograniczenia działki oraz związane z tym warunki logistyki budowy – rozwiązanie technologiczne musi uwzględniać możliwości dojazdu, prowadzenia dróg technologicznych, składowania materiałów oraz jednoczesnej realizacji różnych elementów czy faz budowy;
- harmonogram – wymagane tempo prac może wymagać zastosowania jedynie najbardziej wydajnych technologii, ale też ograniczenia etapowania wykopu, co wpłynie np. na zmniejszenie liczby rzędów podparć (zakotwień);
- uciążliwość dla otoczenia – prowadząc prace w bliskości istniejących budynków, należy stosować technologie niepowodujące drgań mogących uszkodzić konstrukcje oraz o niskim poziomie hałasu.

## Wykonawstwo

Pomimo że dobry projekt jest kluczowy dla bezpieczeństwa każdej konstrukcji geotechnicznej, normy europejskie, w tym [11], podkreślają znaczenie nadzoru, kontroli i monitorowania na budowie. Działania te są kluczowe jako pozwalające na wczesną identyfikację niekorzystnych zjawisk, ale też jako informacja zwrotna o prawidłowym zachowaniu konstrukcji czy prowadzeniu prac. Dodatkowo, w projektach obciążonych wysokim ryzykiem, do których zaliczamy analizowane, zaleca się, aby projektowanie wspomagać i korygować pomiarami prowadzonymi w czasie budowy. Nie dotyczy to tylko stosowania metody obserwacyjnej, ale jest sprzężone z projektowaniem progresywnym.

U podstawy rzetelnego systemu kontroli stoi opisany wyżej system zarządzania jakością, lecz kluczowa jest tu specyfikacja wymogów oraz program monitoringu opracowany przez projektanta, stosownie do klasy konsekwencji projektowanego obiektu. Dokumenty te muszą również jasno wskazywać strony odpowiedzialne za prowadzenie opisanych działań, odpowiedzialne za interpretację wyników, odbiorców raportów oraz osoby decyzyjne. Zapewniona w ten sposób współpraca uczestników projektu i ciągłość komunikacji (na wszystkich etapach realizacji) jest gwarantem sukcesu realizacji zarówno w aspekcie bezpieczeństwa, jak i efektywności ekonomicznej.

Właściwie przygotowany program monitoringu jest krytyczny dla realizacji głębokich wykopów w bliskości istniejącej zabudowy i powinien stanowić część dokumentacji projektowej. Mierzone wielkości, techniki i narzędzia pomiarowe oraz częstotliwość pomiarów są szeroko opisywane, np. w [12, 13, 14]. Do decyzji projektanta należy opracowanie siatki pomiarowej oraz – i jest to kwestia fundamentalna – wielkości kontrolnych mierzonych wartości wraz ze stosownym systemem reagowania. Prowadzenie monitoringu według rzetelnego programu umożliwi dogłębną kontrolę przebiegu budowy, pokrywającą ewentualnie luki czy niedopełnienie obowiązków nadzoru.

W wymagania i kompleksowość analizowanych projektów doskonale wpisuje się wdrażana aktualnie w Polsce technologia BIM. Taki cyfrowy model zbierający informacje o projektowanej konstrukcji i istniejących obiektach z nim związanych, aktualizacji

postępu prac, sprzężony z wynikami monitoringu oraz badań czy próbnych obciążeń, dostępny wszędzie i dla wszystkich znacząco ułatwia zarządzanie złożonym projektem w opisanych aspektach. A w przypadku stosowania metody obserwacyjnej ogromnie ułatwia wdrożenie modyfikacji konstrukcyjnych lub technologicznych.

## Podsumowanie

Głębokie wykopy realizowane w zwartej zabudowie miejskiej, powstające w celu odzyskania przestrzeni spod istniejących obiektów, są jednymi z najtrudniejszych problemów projektowania geotechnicznego. Wymagają zwrócenia się z wieloma wyzwaniami na każdym etapie realizacji. Niektóre z tych zagadnień, mimo istotnego znaczenia, bywają bagatelizowane, co często prowadzi do problemów w postaci nadmiernych przemieszczeń lub awarii. Zostały one wymienione i pokrótce opisane w artykule.

Kluczem do zaprojektowania efektywnej konstrukcji zabezpieczenia wykopu i realizacji zakończonej sukcesem jest plan uwzględniający odpowiedni poziom niezawodności i zarządzanie ryzykiem. Plan ten powinien być wdrażany przez kompetentny zespół w procesie projektowania o charakterze postępowym i wykonania wspomaganego systemem monitorowania. Jego nieodzownym aspektem jest też ciągła współpraca uczestników projektu na różnych etapach. Takie podejście pozwala pomyślnie zrealizować nawet najbardziej wymagające i niespotykane inwestycje.

## Literatura

- [1] PN-EN 1990:2004 *Eurokod 0: Podstawy projektowania konstrukcji*.
- [2] ISO 2394:2015 *General principles on reliability for structures*.
- [3] PN-ISO 31000:2018-08 *Zarządzanie ryzykiem*. Wytyczne.
- [4] PN-B-03020:1981 *Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [5] Kłosiński B.: *Sprawdzanie stateczności dna głębokich wykopów*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2014, nr 1, s. 38–44.
- [6] *Instrukcja 376/2002. Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów*. Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa 2002.
- [7] Puller M.: *Deep Excavations: A Practical Manual*. Thomas Telford, 2003.
- [8] Siemińska-Lewandowska A.: *Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo*. WKŁ. Warszawa 2010.
- [9] Truty A.: *On consistent nonlinear analysis of soil-structure interaction problems*. „Studia Geotechnica et Mechanica” 2018, Vol. 40, no. 2, pp. 86–95.
- [10] Lees A.: *The use of geotechnical numerical methods with Eurocode 7*. „Engineering and Computational Mechanics” 2017, Vol. 170, issue 4, pp. 1–21.
- [11] PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7 *Projektowanie geotechniczne*. Cz. 1. *Zasady*.
- [12] *Instrukcja 443/2009; System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów*. Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa 2009.
- [13] Sieńko R., Bednarski Ł.: *Monitorowanie obiektów budowlanych w sąsiedztwie budowy*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2016, nr 4, s. 28–33.
- [14] *Recommendations on Excavations EAB*. Society German Geotechnical. Wiley VCH Verlag GmbH. Berlin 2014.

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

