

Zastosowanie geologiczno-inżynierskiego modelowania 3D do oceny geotechnicznych warunków posadowienia inwestycji realizowanej z zastosowaniem ścian szczelinowych

Michał Jaros¹, Marta Szlasa¹



M. Jaros



M. Szlasa

Implementation of engineering geology 3D modeling to assess geotechnical foundations requirements of the investment executed in diaphragm wall. Prz. Geol., 62: 584–587.

Abstract. The paper presents use of 3D technology in geotechnical conditions assessment for underground investment in Warsaw. Research were done after a failure during ground works. Difficulties in engineering works were caused by complex ground conditions on site and tall buildings in surroundings. The paper presents stages of 3D model creation as well as its assumptions and results. There were used 3D Analyst tools by ESRI with “kriging” interpolation method. Possible failure reason pointed out by the authors was the wrong depth of diaphragm walls foundation, what was highlighted in 3D analyses and views.

Keywords: 3D model, complicated ground conditions, diaphragm walls

Celem opracowań geologicznych (w tym geologiczno-inżynierskich) jest przedstawienie modelu budowy geologicznej na podstawie interpretacji dostępnych danych. Podstawowym, powszechnie stosowanym elementem wizualizacji zinterpretowanej budowy geologicznej są przekroje oraz mapy geologiczne. Są to dane (obrazy) „płaskie”, opisane przy pomocy dwóch wymiarów – długości i szerokości (współrzędnych X i Y), czyli wykonane w technologii 2D. Rozwój technologii informatycznych spowodował powstanie i powszechniejszy dostęp do zaawansowanych aplikacji graficznych (pracujących w środowisku GIS i CAD), które umożliwiają interpretację danych i ich wizualizację w trzech wymiarach – długości, szerokości i wysokości (współrzędne X, Y, Z), tzn. wykonanych w technologii 3D. Stworzone dzięki temu trójwymiarowe modele budowy geologicznej są interesującym rozszerzeniem możliwości przedstawiania warunków gruntowo-wodnych i jednocześnie zwiększają wiarygodność i ułatwiają dalsze analizy.

Możliwość przestrzennej prezentacji warstw geologicznych, do celów posadowienia obiektów budowlanych, przedstawiano m.in. w opracowaniach kartograficznych [www.pgi.gov.pl] lub publikacjach branżowych krajowych (Kwiecień, 2009) i zagranicznych (Dong i in., 2011).

Wizualizację 3D budowy geologicznej wykorzystano w trakcie oceny i weryfikacji geotechnicznych warunków posadowienia dla jednej ze stołecznych inwestycji. Jednym z etapów realizacji budowy było wykonanie głębokiego wykopu w technologii ścian szczelinowych w obrębie gęstej i wysokiej zabudowy miejskiej. W trakcie realizacji prac budowlanych metodą odkrywkową, do wykopu dostał się nawodniony piasek, z miejsca zalegania *in situ*. W wyniku rozluźnienia, a w konsekwencji wypłukania piasku powstała wyrwa od poziomu terenu do głębokości kilkunastu metrów, co doprowadziło do zapadnięcia się naziemnej infrastruktury komunikacyjnej oraz zagrożenia utraty stateczności obiektów budowlanych sąsiadujących z miejscem zdarzenia. W związku z tym stwierdzono także uszkodzenie sieci wodociągowej, z której woda dodatkowo nawadniała grunt.

WIZUALIZACJA BUDOWY GEOLOGICZNEJ W TECHNOLOGII 3D

W ramach prac analitycznych, mających na celu zweryfikowanie geotechnicznych warunków posadowienia i okreś-

lenie ewentualnych przyczyn awarii, wykonano ocenę danych geologicznych i zreinterpretowano budowę geologiczną rejonu realizowanej inwestycji budowlanej. Ocenie podlegały materiały i dane projektowe, zaś reinterpretację przeprowadzono dwuetapowo:

- w pierwszej kolejności wykonano reinterpretację budowy geologicznej na podstawie danych archiwalnych,
- w dalszym etapie reinterpretację wzbogacono o otwory wykonane po wystąpieniu awarii.

W ramach interpretacji budowy geologicznej, sporządzono wizualizację w technologii 3D dla obu wyżej wymienionych etapów. Na potrzeby analizy otwory występujące w podłożu podzielono na trzy serie litologiczno-genetyczne:

- grunty antropogeniczne,
- grunty spoiste,
- grunty niespoiste.

Następnie warstwy występujące w obrębie serii gruntów spoistych podzielono, ze względu na kryterium przydatności jako podłoża, na:

- grunty spoiste nie tworzące naturalnej warstwy izolacyjnej,
- grunty spoiste tworzące naturalną warstwę izolacyjną.

Ze względu na wymagania techniczne do posadowienia ścian szczelinowych, jako bariery izolacyjne przyjęto warstwy różnowiekowych gruntów spoistych, o miąższości powyżej trzech metrów, z wyłączeniem pyłów. Przy wydzielaniu warstw w sposób zamierzony nie uwzględniono podziału stratygraficznego. Głównym kryterium wyznaczania warstw był jakościowy podział gruntów pod względem właściwości fizycznych, w szczególności właściwości filtracyjnych. Tego typu reinterpretacja danych geologicznych miała na celu opracowanie modelu budowy geologicznej, a przede wszystkim wyznaczenie rozprzestrzenienia naturalnej warstwy izolacyjnej. Przyjęte uproszczenia w interpretacji budowy geologicznej były wystarczające do trójwymiarowego modelowania, ponieważ jego celem było przedstawienie przestrzennego układu warstw gruntowych o istotnych dla projektowania właściwościach.

Zgodnie z przyjętym podziałem litologiczno-genetycznym wprowadzone wydzielenia zamieszczono na profilach geologicznych. Dla tak przygotowanych danych przeprowadzono, za pomocą narzędzia 3D Analyst oraz Spatial Analyst firmy ESRI, interpolację metodą krigingu. Jest to zaawansowana metoda geostatystyczna, uznawana za jedną z lepszych metod interpolacji niejednorodnych zjawisk przyrodniczych.

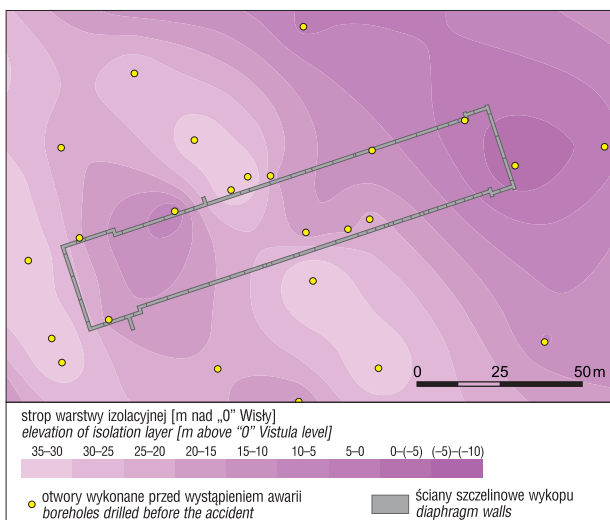
¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; michal.jaros@pgi.gov.pl; marta.szlasa@pgi.gov.pl.

Uwzględnia ona ogólny trend danych i jest przydatna w sytuacji, gdy dane są rozmieszczone nierównomiernie (Goldsztejn & Skrzypek, 2004). Przy interpolacji wykorzystano topograficzne współrzędne X, Y lokalizacji otworu, rzędną wysokościową powierzchni terenu oraz przeliczone wartości rzędnych stropów wydzielonych serii litologiczno-genetycznych. Interpolację przeprowadzono osobno dla stropu każdej z wydzielonych warstw, a następnie z ich wykorzystaniem stworzono trójwymiarowe modele budowy geologicznej.

Wstępnie przygotowano dwie wersje modelu budowy geologicznej, w celu przedstawienia zmian ukształtowania stropów wydzielonych warstw w zależności od stopnia udokumentowania warunków geologicznych. Pierwszy model wykonano wyłącznie na podstawie otworów archiwalnych, natomiast na drugim modelu uwzględniono otwory wykonane po wystąpieniu awarii (ryc. 1, 2). Dla przykładu na rycinie 1 i 2 przedstawiono zmiany przebiegu izolinii stropu warstwy izolacyjnej w rejonie wykonanych dodatkowych otworów badawczych.

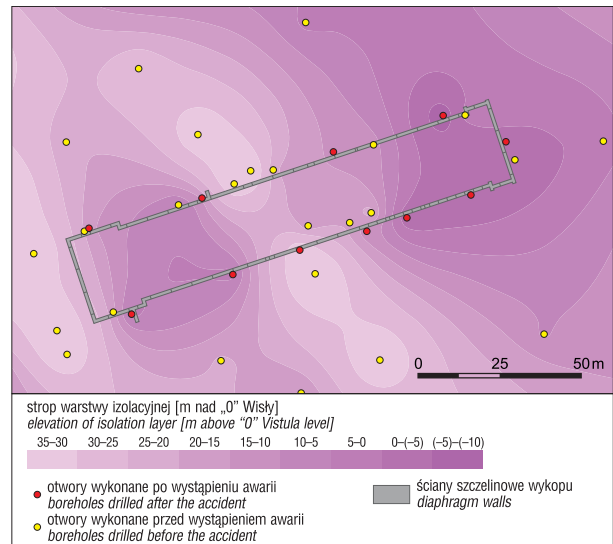
Na podstawie analiz obu wersji modeli, stwierdzono uszczegółowienie przebiegu izolinii stropu rozpoznanych gruntów w rejonie realizowanej inwestycji na modelu wzbogaconym o dodatkowe otwory. Ten model wykorzystano w dalszych analizach.

Na modelu poddanym analizie warstwę przypowierzchniową tworzą grunty antropogeniczne, o miąższości do kilku metrów (ryc. 3), wykształcone jako piaski o różnej granulacji i gliny z domieszką gruzu ceglanego. Poniżej nasypów występują grunty spoiste, wykształcone głównie jako gliny i piaski gliniaste oraz lokalnie grunty niespoiste – piaski o różnej granulacji (ryc. 3). Grunty spoiste tworzą płytko występujące warstwy o małych miąższościach, nieodpowiednie do zagłębienia ścian szczelinowych. Poniżej gruntów spoistych występuje miąższa, nierozdzielona warstwa gruntów niespoistych czwartorzędu, neogenu i paleogenu, wykształcona głównie jako piaski o różnej granulacji, żwiry oraz pospółki. Miąższość tej warstwy jest zróżnicowana i wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do ponad 30 metrów (ryc. 3). W obrębie tej warstwy występują niewielkie przewarstwienia i soczewki gruntów spoistych. W warstwie tej, około 10 m p.p.t., występuje zwierciadło wód podziemnych o charakterze swobodnym oraz stabilizują się też ciśnienia piezometryczne wód występujących w niższej leżącej warstwie wodonośnej, co może świadczyć o dobrych kontaktach hydraulicznych i dro-



Ryc. 1. Fragment mapy stropu warstwy izolacyjnej opracowanej na podstawie otworów archiwalnych

Fig. 1. Part of isolation layer elevation map, based on archive boreholes



Ryc. 2. Fragment mapy stropu warstwy izolacyjnej opracowanej na podstawie otworów archiwalnych i wykonanych po awarii

Fig. 2. Part of isolation layer elevation map, based on archive boreholes and those drilled after the accident

gach zasilania istniejących między tymi warstwami. Najważniejszą warstwą przedstawioną na trójwymiarowym modelu są grunty spoiste tworzące, ze względu na miąższość i właściwości filtracyjne, naturalną warstwę izolacyjną (ryc. 3). Dla zadania kartograficznego przyjęto, że tworzą ją głównie mioplioceneskie ropy i gliny oraz lokalnie czwartorzędowe grunty spoiste, o miąższości powyżej 3 metrów. Całkowita miąższość naturalnej bariery izolacyjnej nie została określona, ponieważ nie udokumentowano jej spągu. Strop występowania naturalnej bariery izolacyjnej charakteryzuje się dużymi deniwelacjami – od 1 do 60 m p.p.t. (od 34 do ok. 25 m nad „0” Wisły). Wiąże się to z zaburzeniami glacictonicznymi osadów plioceneskich oraz erozją czwartorzędowych osadów spoistych (Sarnacka, 1992; Frankowski i in., 2001). W jej obrębie występują niewielkie przewarstwienia i soczewki gruntów niespoistych.

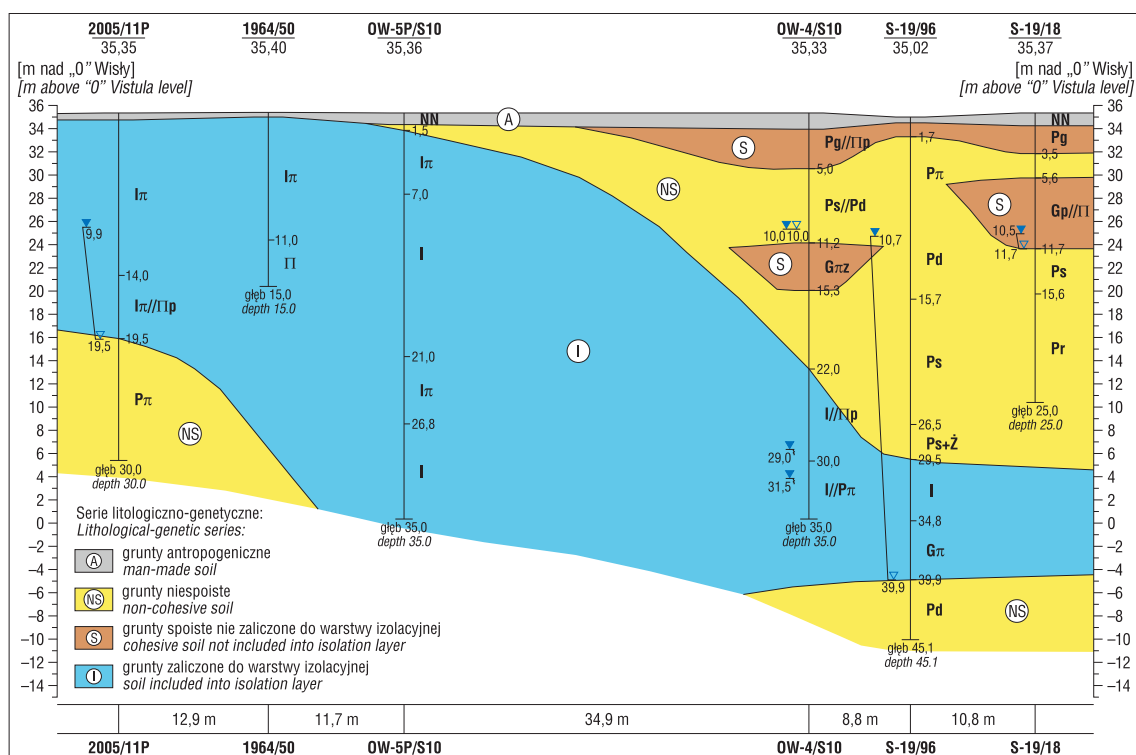
Do sporządzonego modelu 3D budowy geologicznej dodano zaprojektowane i wykonane elementy realizowanej inwestycji budowlanej, takie jak:

- ściany szczelinowe, z uwzględnieniem podziału sekcijnego oraz dokładnych wymiarów (w tym głębokości), na podstawie dokumentacji technicznych;
- płytę denną, z uwzględnieniem wybranych parametrów konstrukcyjnych.

Głębokość, na której prowadzono prace ziemne, wyznaczał poziom posadowienia płyty dennej. Na modelu 3D pokazano miejsce awarii, z uwzględnieniem rozmiarów pustki powstałej w wyniku deformacji filtracyjnych gruntu. Po naniesieniu na model 3D budowy geologicznej wszystkich niezbędnych elementów konstrukcyjnych dokonano jego analizy, w trakcie której zwracano uwagę na:

- budowę geologiczną, zwłaszcza układy warstw gruntów spoistych (słaboprzepuszczalnych) i niespoistych,
- interakcję elementów konstrukcyjnych budowy (płyta denna, ściany szczelinowe) z wydzielonymi seriami litologiczno-genetycznymi.

W trakcie analizy modelu 3D stwierdzono, że strop warstwy słaboprzepuszczalnej, spełniającej warunki na potrzeby posadowienia ścian szczelinowych, charakteryzuje się bardzo dużymi deniwelacjami. Wyraźnie widoczne są obniżenia stropu powierzchni utworów tej warstwy oraz jego elewacje. Szczegółowej analizie poddano grunty występujące w poziomie posadowienia płyty dennej i ścian szczelino-



Ryc. 3. Przekrój geologiczny przedstawiający budowę geologiczną w rejonie inwestycji
 Fig. 3. Geological cross-section in the construction area

wych. W jej efekcie stwierdzono, że płyta denne i część wykonanych sekcji ścian szczelinowych zostały posadowione bezpośrednio w gruntach niespoistych. Posadowienie ścian szczelinowych, około 2 metrów powyżej warstwy słaboprzepuszczalnej, spowodowało niewystarczającą izolację wykopu (ryc. 4). Dla zweryfikowania tej informacji oraz poprawności wykonania modelu 3D budowy geologicznej, повторно przeanalizowano posiadane dane dotyczące realizowanej inwestycji. Ponowna weryfikacja wykazała prawidłowość wykonanego modelu 3D oraz zasadność poczynionych spostrzeżeń.

Jako możliwą przyczynę awarii powstałej podczas prowadzenia prac budowlanych wskazano, przedstawione na modelu 3D, niedogłębienia w posadowieniu ścian szczelinowych. W wyniku braku pełnej izolacji wykopu, podczas prac ziemnych i stopniowego odciażania dna wykopu, doszło do zniszczenia spowodowanego prawdopodobnie hydraulicznym wynoszeniem cząstek gruntu. Zaobserwowany typ deformacji filtracyjnych wystąpił przy zdejmowaniu nadkładu w trakcie wykonywania wykopu w ścianach szczelinowych, gdy wartość obliczeniowa siły ciśnienia sphywowego przewyższyła ciężar słupa gruntu z uwzględnieniem wporu (PN-EN 1997-1:2008), co zgodnie z przywołanymi standardami świadczy o przekroczeniu stanu granicznego HYD.

W omawianym przypadku, niepełne odizolowanie nawodnionej warstwy gruntów niespoistych wywołało deformację, która nie miała charakteru powierzchniowego i przejawiała się punktowym wypływem wody na granicy konstrukcji uszczelniającej i gruntu, wynosząc ziarna i cząstki w formie erozji wewnętrznej, która z kolei rozluźniła grunt w otoczeniu miejsca awarii. To spowodowało osiadania powierzchni terenu, zaznaczone na modelu 3D w formie pustki. Dopływ nawodnionych piasków spoza wykopu do jego wnętrza spowodował rozluźnienie gruntów w poziomie posadowienia okolicznych budynków.

Istotnym czynnikiem warunkującym wykonanie wiarygodnego modelu 3D budowy geologicznej jest stopień udokumentowania analizowanego obszaru odpowiednią liczbą

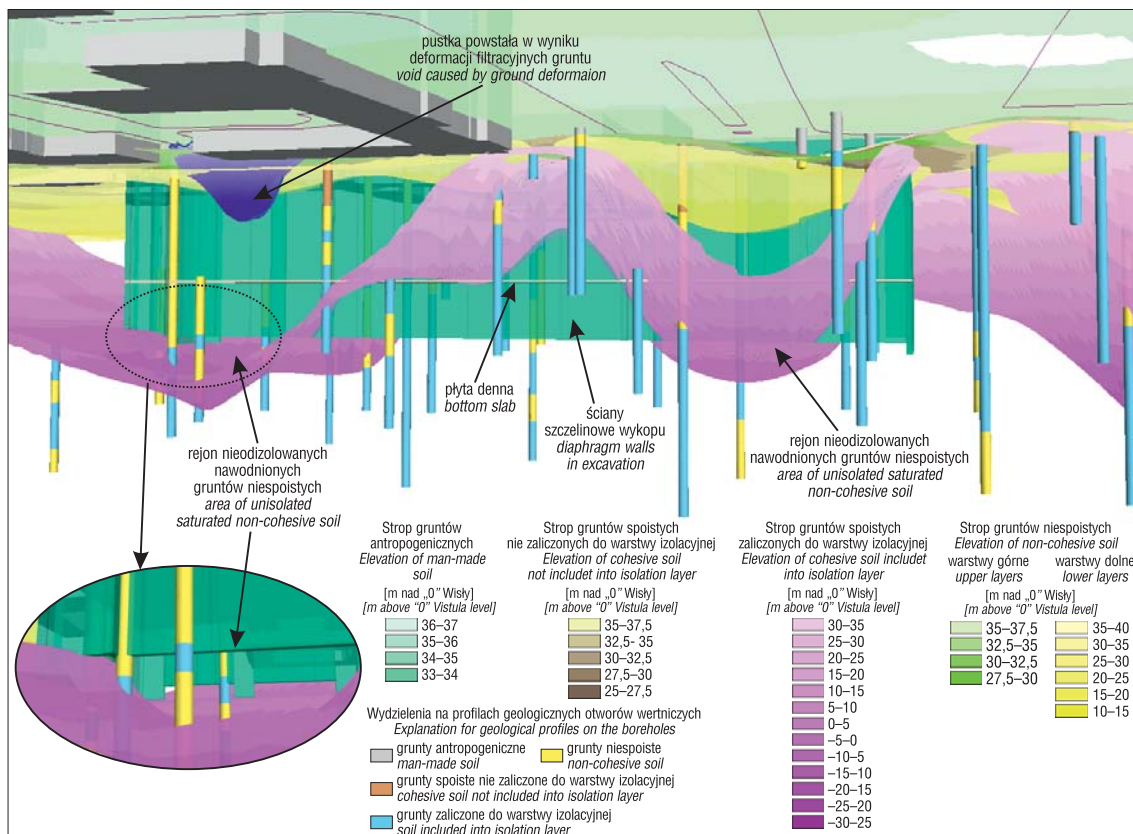
otworów o równomiernym rozprzestrzenieniu. Zakres udokumentowania terenu, warunkujący poprawność wykonania modelu 3D, musi być dostosowany do stopnia złożoności spodziewanej budowy geologicznej. W przypadku prostych warunków gruntowo-wodnych stopień udokumentowania badanego terenu będzie miał mały wpływ na wiarygodność wykonania geologicznego modelu 3D. Nawet minimalne, akceptowalne rozpoznanie geologiczne nie powinno spowodować dużych błędów w przyjętych rozwiązaniach odwzorowanych w trójwymiarowej interpretacji. Tworzenie modelu 3D dla złożonych lub skomplikowanych warunków gruntowo-wodnych, zwłaszcza tam, gdzie występują silne zaburzenia glacytektoniczne, wymaga dokładnego rozpoznania budowy geologicznej. W takim przypadku nawet jeden dodatkowy punkt dokumentacyjny, w kluczowym dla interpretacji miejscu, może znacznie wpłynąć na bardziej adekwatne do rzeczywistości określenie położenia stropu i spągu izolacyjnych warstw podłoża.

Interpretując budowę geologiczną z zastosowaniem trójwymiarowych modeli, zwłaszcza dla złożonych i skomplikowanych warunków gruntowo-wodnych, należy sprawdzić wiarygodność informacji zawartych w opisie otworów wiertniczych, w tym poprawność danych lokalizacyjnych oraz interpretację izolacyjności w profilach geologicznych. W przypadku istnienia wątpliwości dotyczących wiarygodności danego otworu badawczego, wskazane jest wyeliminowanie go z dalszych analiz w celu uniknięcia wystąpienia błędów w interpretacji budowy geologicznej na modelu 3D.

WNIOSKI

Na podstawie wyżej opisanych analiz stwierdzono, że:

- zasadne jest wykonywanie trójwymiarowych modeli budowy geologicznej w rejonie realizowanej inwestycji budowlanej, zwłaszcza w przypadku występowania złożonych lub skomplikowanych warunków gruntowo-wodnych;
- prawidłowo przygotowany trójwymiarowy model geologiczny, z naniesionymi projektowanymi elementami inwe-



Ryc. 4. Fragment modelu 3D budowy geologicznej w rejonie prowadzonych prac budowlanych
Fig. 4. Fragment of geological 3D model in the area of ground works

stycji, już na etapie projektowania pozwala w kompleksowy sposób przeanalizować interakcję projektowanych prac budowlanych z podłożem, określonym poprzez wiarygodny model geologiczny, i zapobiec ewentualnej awarii;

– wygenerowany obraz pozwala odpowiednio wcześniej zlokalizować miejsca potencjalnych zagrożeń związanych z błędami na etapie projektowania i/lub realizacji inwestycji oraz określić związane z tym ryzyko geologiczne.

Identyfikacja czynników ryzyka geologicznego w procesie budowlanym przekłada się bezpośrednio na bezpieczeństwo inwestycji. Niekorzystne czynniki geologiczne, nawet rzadko występujące, charakteryzują się dużą siłą oddziaływania i powodują poważne konsekwencje dla właściwej realizacji inwestycji. Nawet ogólna ocena ryzyka geologicznego wykonana na etapie wstępnym realizacji projektu, która jest znikomym kosztem w skali inwestycji, może być kluczowa przy formowaniu kontraktu – na etapie ofertowania i realizacji. Pozwala to ustalić, kto i w jakim stopniu bierze na siebie ryzyko wystąpienia niekorzystnych zjawisk związanych z warunkami gruntowo-wodnymi (Majer i in., 2013). Dodatkową zaletą cyfrowego trójwymiarowego modelowania geologicznego jest jego otwarta struktura i dynamika, która pozwala łatwo dodawać informacje o terenie i o wszelkich zmianach projektowych, co umożliwia jego szybkie aktualizowanie. Dobrze opracowany trójwymiarowy model budowy geologicznej z pewnością może mieć wpływ na uniknięcie, w późniejszej fazie realizacji inwestycji, zdarzeń generujących znaczne koszty czy straty istotne dla społeczeństwa.

Wykonując geologiczny model 3D, należy zwrócić szczególną uwagę na stopień udokumentowania badanego

obszaru, jakość posiadanych danych oraz dysponować odpowiednią wiedzą na temat budowy geologicznej analizowanego terenu. Dobrze opracowany trójwymiarowy model geologiczny z pewnością wspomogłoby prawidłową ocenę zebranych danych. Należy pamiętać, że jest to wyłącznie narzędzie geostatystyczne oparte na obliczeniach matematycznych. Ostateczna interpretacja nie może być zatem odebrana bezkrytycznie, lecz oceniona zgodnie z posiadaną wiedzą i geologicznym doświadczeniem.

LITERATURA

- DONG M., HU H. & AZZAM R. 2011 – Application of three dimensional geological models to geotechnical engineering problems. [W:] Proceedings of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics, October 14–16 2011, Beijing (China): 473–478.
- FRANKOWSKI Z. i IN. 2001 – Baza danych geologiczno-inżynierskich wraz z atlasem geologiczno-inżynierskim Warszawy. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- GOLDSZTEJN P. & SKRZYPEK S. 2004 – Wykorzystanie metod interpolacji do numerycznego kreślenia map powierzchni geologicznych na podstawie nieregularnie rozmieszczonych danych. Pr. Geol., 52, (3): 233–236.
- KWIECIEN J. 2009 – Technologia GIS w geologii inżynierskiej. Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych. Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz.
- MAJER E., SOKOŁOWSKA M. & RYŻYŃSKI G. 2013 – Identyfikacja ryzyka geologicznego w procesie inwestycyjnym. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła.
- PN-EN 1997-1. EUROKOD 7 2008 – Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne. PKN, Warszawa.
- SARNACKA Z. 1992 – Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. Pr. Państw. Inst. Geol., 138.