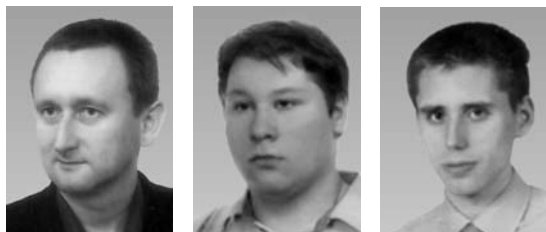


## Ocena wpływu budowy geologicznej na wyniki numerycznego modelowania przemieszczeń ścian i dna wykopu w świetle danych pomiarowych ze stacji A14 I linii metra w Warszawie

Paweł Popielski<sup>1</sup>, Adam Kasprzak<sup>1</sup>, Błażej Smoliński<sup>1</sup>



P. Popielski

A. Kasprzak

B. Smoliński

**Evaluation of the impact of the geological structure on the results of numerical analysis of anchored diaphragm wall sand trench bottom based on the measurement made during the implementation of A14 station of metro line I in Warsaw.** *Prz. Geol.*, 64: 230–237.

*Abstract.* The paper shows a comprehensive analysis of the displacement of anchored diaphragm wall on the example of the trench of the A14 Świętokrzyska station of underground line I in Warsaw. Based on the collected information and technical documentation the 2D numerical models were generated in ZSoil2014v.14.10 (Z\_SOIL PC 2014v.14.10; ZaceServices; Lausanne2015). According to available documentation, sophisticated soil and water conditions were taken into account in the analysis. Based on the

calculations the character of displacements at different steps of trench digging were discussed. In the conclusion, the influence of variability of geological and geotechnical conditions was evaluated.

**Keywords:** numerical modeling, geotechnics, material parameters

Wielowariantowe obliczenia numeryczne stają się dzisiaj coraz popularniejszym narzędziem w praktyce inżynierskiej. Wspomagają proces projektowania oraz pozwalają na wczesną eliminację potencjalnych błędów konstrukcyjnych. Zakres możliwych do prowadzenia analiz jest bardzo szeroki. Obejmuje zarówno naprężenia, deformacje, zagadnienia stateczności, jak i np. modelowanie skutków zjawisk filtracyjnych zachodzących w podłożu gruntowym. Z powodzeniem może być ono stosowane w odniesieniu do interakcji gruntów i obiektów budowlanych: budowli, budynków i innych konstrukcji inżynierskich. Jedną z podstawowych kwestii, mających bezpośredni wpływ na wynik modelowania numerycznego, są poprawne dane i scenariusze do obliczeń. Geometria analizowanej konstrukcji, układ poszczególnych warstw, przestrzenny rozkład parametrów materiałowych powinny być możliwie najlepiej odwzorowane. Co więcej, przyjęty model fizyczny oraz metodę obliczeniową należy starannie dopasować do analizowanego zagadnienia. Istotnymi czynnikami są również etapy wykonywania konstrukcji, warunki brzegowe, a przede wszystkim poprawnie wyznaczone wartości parametrów materiałowych. To od nich w głównej mierze uzależniony jest końcowy wynik obliczeń (np. rozkład naprężeń oraz odkształceń) i konkretne wartości poszukiwanych wielkości przemieszczeń. Należy jednak zaznaczyć, że prawidłowe wyznaczenie poszczególnych parametrów materiałowych uwzględnianych w analizach numerycznych jest zagadnieniem trudnym i skomplikowanym. Często pobór próbek materiałowych z konkretnych obiektów i lokalizacji jest utrudniony lub wręcz niemożliwy (np. w gęstej zabudowie). W takich przypadkach trzeba posłużyć się danymi literaturowymi, wytycznymi, normami, a także metodą obserwacyjną oraz doświadczeniem własnym i analogiami, jeżeli takowe mamy. Należy mieć

również świadomość zmienności parametrów materiałowych w czasie, powodowanej np. specyfiką środowiska i warunków pracy. Podobne zmiany występują w odniesieniu do warunków gruntowo-wodnych. W praktyce układ poszczególnych warstw litologicznych oraz zwierciadła wody gruntowej mogą być bardzo zróżnicowane. Dodatkowo w ośrodku gruntowym mogą występować liczne przewarstwienia i soczewki, często powodujące problemy wykonawcze oraz eksploatacyjne. W zakresie głębokich posadowień do istotnych zagadnień należy zaliczyć np. potencjalną możliwość odprężenia dna wykopu (Barański i in., 2008). Jest to ważne z punktu widzenia etapowego wykonania obiektu oraz wyboru odpowiedniej technologii. Niedokładne i pobieżne rozpoznanie podłoża powoduje zafałszowanie danych służących generacji modeli numerycznych i ma bezpośredni wpływ na jakość uzyskanych wyników oraz oszacowanie skali zjawiska (Popielski & Stasiński, 2005). Sytuacja komplikuje się dodatkowo, gdy uświadomimy sobie zmienność parametrów materiałowych w przestrzeni. Obecnie coraz częściej do pozyskania niezbędnych danych są wykorzystywane metody nieinwazyjne. Badania geofizyczne, takie jak badania sejsmiczne, elektrooporowe czy profilowania georadarowe, pozwalają na zlokalizowanie anomalii w analizowanym ośrodku. Są pomocne w określeniu występowania granic poszczególnych stref litologicznych, ich miąższości, a także położenia zwierciadła wody gruntowej. Interpretacja wyników uzyskanych tymi metodami często jest jednak subiektywna i skomplikowana. Dobrze jest więc powierzyć to zadanie specjalistom, np. doświadczonemu geologowi. Należy również podkreślić celowość jednoczesnego wykorzystywania kilku metod geofizycznych, a także tradycyjnych odwiertów i sondowań, w celu weryfikacji rezultatów badań.

<sup>1</sup> Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; pawel.popielski@is.pw.edu.pl, adam.kasprzak@is.pw.edu.pl, blazej.smolinski@is.pw.edu.pl.

W przypadku obiektów liniowych o powtarzalnej geometrii jest czymś naturalnym opracowanie dwuwymiarowego modelu numerycznego dla kilku charakterystycznych przekrojów konstrukcji, uwzględniających zróżnicowanie parametrów materiałowych w przestrzeni, np. pod względem budowy geologicznej podłoża. Podejście takie znacznie upraszcza i przyspiesza obliczenia numeryczne. Do analizy wyznacza się reprezentatywne przekroje płaskie, o stosunkowo niewielkiej, w porównaniu do modeli 3D, liczbie węzłów. Rozpatrując zagadnienie np. posadowienia budynku czy wykonania wykopu, uwzględnia się w takiej sytuacji jednak tylko lokalne warunki gruntowo-wodne. Weryfikacja otrzymanych wyników obliczeń w kontekście całości analizowanego obiektu, w zależności od stopnia skomplikowania przypadku, może nastroczać pewne trudności. W artykule przedstawiono wpływ zróżnicowanych warunków gruntowo-wodnych na wartości przemieszczeń kotwionej ściany szczelinowej zabezpieczającej wykop pod stacją A14 Świętokrzyska I linii metra w Warszawie. Jest to stosunkowo dobrze udokumentowany i przeanalizowany obiekt, który obecnie stanowi ciekawe źródło informacji, porównań i analogii przy realizacji nowych inwestycji w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Na potrzeby artykułu wygenerowano dwa modele numeryczne zróżnicowane pod względem przyjętych warunków geologiczno-inżynierskich, obrazujące kolejne etapy realizacji stacji A14. Dla każdego z przypadków przeprowadzono obliczenia odkształceń i przemieszczeń oparte na informacjach zawartych w zaktualizowanej dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (PIG-PIB, 2015) rozpatrywanego obszaru. Różnice w uzyskanych rezultatach zostały zaprezentowane w dalszej części artykułu.

## OBIEKT BADAŃ

Stacja A14 I linii metra jest zlokalizowana w Warszawie, w rejonie skrzyżowania ulic Marszałkowskiej i Świętokrzyskiej. Zgodnie z danymi zawartymi w pracy Siemińskiej-Lewandowskiej (2001) wykop pod stacją A14 został wykonany w technologii ścian szczelinowych. Jest to obecnie bardzo często stosowane rozwiązanie, do którego zalet należy zaliczyć:

- optymalizację kosztów – jednoczesne zapewnienie stateczności ścian wykopu i ograniczenie napływu wód gruntowych (przeciwna ściana pionowa),
- możliwość wykonania ściany szczelinowej jako docelowego elementu konstrukcyjnego obiektu (ściany podziemia, fundamentu),
- możliwość wykonywania ścian szczelinowych w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących obiektów,
- małą uciążliwość robót – niski poziom hałasu, brak wibracji.

W trakcie realizacji omawianego obiektu, ściany szczelinowe grubości 80 cm wykonano ze zwykłego betonu klasy B30. Zabezpieczenie ścian wykopu zrealizowano, wykonując dwa rzędy kotew gruntowych oraz rozpory z rur stalowych o średnicy 508 mm. Pierwszy rząd kotew został sprężony siłą 500 kN, rząd drugi – 600 kN. Dno wykopu o projektowanej rzędnej 14,60 m p.p.t. zostało zabezpieczone żelbetową płytą denną o grubości 120 cm. Całkowita szerokość wykopu w dnie wynosiła 20 m. Sche-

mat obrazujący omawianą konstrukcję przedstawiono na rycinie 1.

Na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej stwierdzono występowanie w podłożu złożonych warunków wodno-gruntowych (GEOTEST, 2005; PIG-PIB, 2015). Podkreślić należy występowanie zarówno gruntów niespoistych, spoistych, jak i pochodzenia antropogenicznego. Grunty nasypowe odznaczają się zmienną miąższością i zalegają do głębokości 2,70 m p.p.t. (32,25 m n.p. „0” Wisły). Są to głównie charakteryzujące się zróżnicowaną granulacją piaski i gruz. W głębszych warstwach występują utwory neogeńskie. Są one reprezentowane przez silnie zaburzone glaciektogenicznie iły pstry wykształcone w postaci ilów, ilów pylastych, glin pylastych i pyłów. W tych ostatnich stwierdzono przewarstwienia zawodnionych piasków drobno- i średnioziarnistych. Zgodnie z informacjami zawartymi w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej na rozpatrywanym obszarze wydzielono osiem warstw geotechnicznych:

I – grunty nasypowe z piasków o różnej granulacji wymieszanych z żużlem i gruzem, występujące do głębokości 2,70 m p.p.t. (32,25 m n.p. „0” Wisły),

II – wodnolodowcowe piaski drobnoziarniste, średniozagęszczone ( $I_D = 0,60$ ),

III – wodnolodowcowe piaski średnioziarniste, średniozagęszczone ( $I_D = 0,60$ ),

IV – morenowe piaski gliniaste, twaroplastyczne i plastyczne ( $I_L = 0,25$ ),

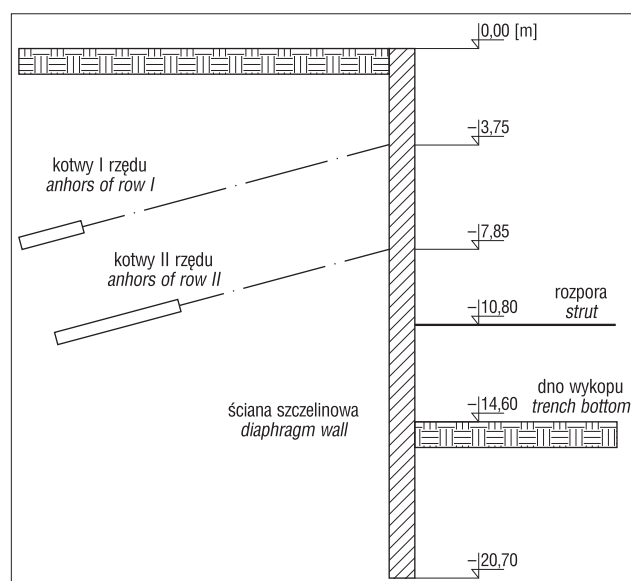
V – neogeńskie piaski drobnoziarniste i pylaste, zagęszczone ( $I_D = 0,70$ ),

VI – neogeńskie piaski średnioziarniste, zagęszczone ( $I_D = 0,70$ ),

VII – neogeńskie gliny pylaste i pyły piaszczyste twaroplastyczne ( $I_L = 0,00-0,25$ ),

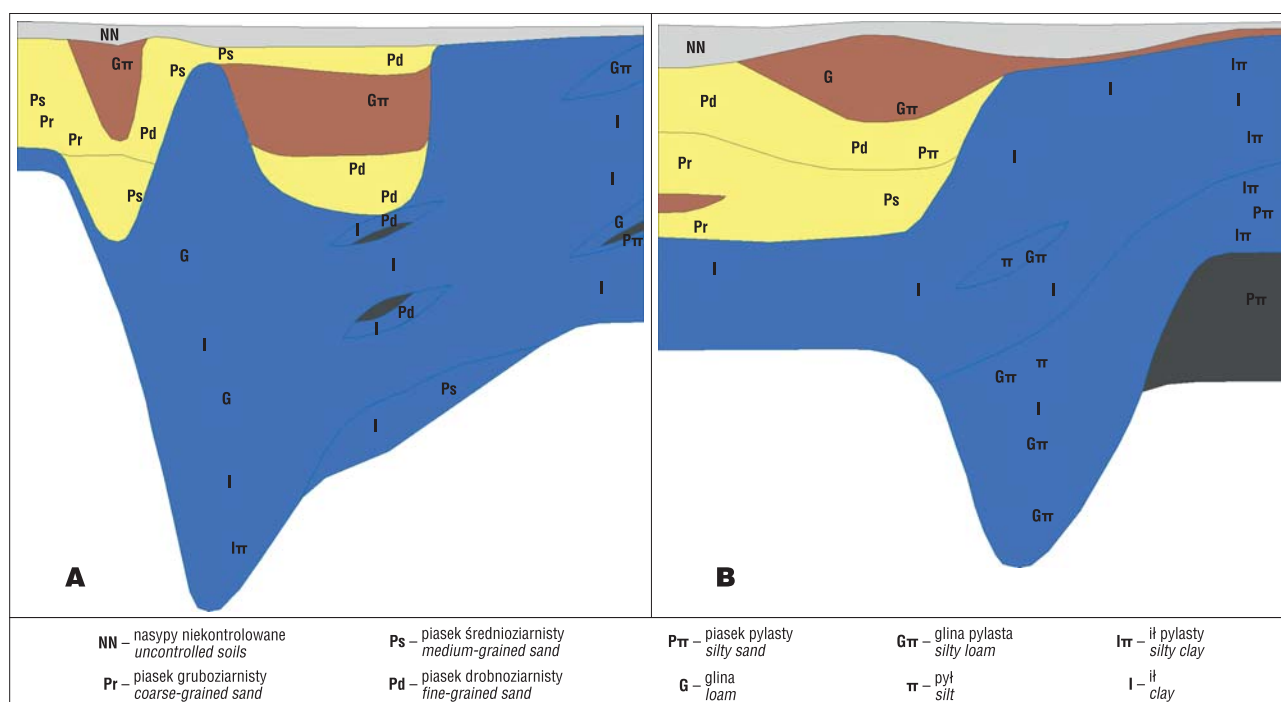
VIII – neogeńskie iły i iły pylaste, twaroplastyczne i półzwarne ( $I_L = 0,00-0,10$ ),

Na analizowanym obszarze stwierdzono występowanie złożonych warunków gruntowo-wodnych. Rozpoznano dwa poziomy wodonośne. Położenie zwierciadła wody grunto-



Ryc. 1. Schemat wykopu pod stacją A14 I linii metra w Warszawie (na podstawie Siemińskiej-Lewandowskiej, 2001)

Fig. 1. Scheme of the trench of the A14 station of underground line I in Warsaw (based on Siemińska-Lewandowska, 2001)



**Ryc. 2.** Schematy budowy geologicznej podłoża wykorzystane do obliczeń numerycznych (na podstawie GEOTEST, 2005; PIG-PIB, 2015)  
**Fig. 2.** Schemes of the geological structure used for numerical calculations (based on GEOTEST, 2005; PIG-PIB, 2015)

wej jest zróżnicowane. W gruntach nasypowych oraz piaskach, w zależności od lokalizacji, swobodne zwierciadło wody gruntowej zlokalizowano na głębokości 2,50–2,60 m p.p.t. (tj. na rzędnej 32,45–32,65 m n.p. „0” Wisły) do 6,60 m p.p.t. (tj. 28,35 m n.p. „0” Wisły). W piaskach neogeńskich nawiercono wodę pod ciśnieniem. W tym przypadku zwierciadło stabilizowało się na rzędnej 26,70–28,35 m n.p. „0” Wisły. Ponadto na różnych głębokościach zaobserwowano występowanie sączeń (GEOTEST, 2005).

Do obliczeń numerycznych przyjęto, dwa reprezentatywne schematy budowy geologicznej podłoża w rejonie stacji A14 I linii metra (ryc. 2). Jako parametry wyjściowe wykorzystano informacje zwarte w GEOTEST, 2005 i PIG-PIB, 2015 oraz normie PN-81/B-03020. W obydwu przypadkach dokonano ich modyfikacji w odniesieniu do najgłębiej położonych utworów zgodnie z tabelą 1, na podstawie pracy Popielskiego (2012). Prezentowane w tabeli 1 zależności i współczynniki są opracowaniem autorskim

**Tab. 1.** Wartości modułów odkształcenia E [MPa] i współczynników zwiększających dla gruntów warszawskich (Popielski, 2012)  
**Table 1.** The values of deformation modulus E [MPa] and increasing coefficients for soils Warsaw (Popielski, 2012)

Rodzaj gruntu Type of soil	Stopień zagęszczenia Density index $I_D$	Moduł odkształcenia wg PN-81/B-03020 Modulus of compressibility according to PN-81/B-03020 standard E [MPa]	Współczynnik zwiększający Increasing ratio		
			<5 m poniżej dna wykopu <5 meters below the bottom of the trench	5–15 m poniżej dna wykopu 5–15 meters below the bottom of the trench	>15 m poniżej dna wykopu >15 meters below the bottom of the trench
Żwir, pospółka Gravel, sandy gravel	≈0,8 ≈0,5	200 140	1,0	1,5	2,0
Piaski grubo- i średnioziarniste Coarse-grained and medium-grained sands	≈0,8 ≈0,5	130 80	1,5	2,0	3,0
Piaski drobnoziarniste i pylaste Fine-grained and silty sands	≈0,8 ≈0,5	75 50	2,0	3,0	4,0–5,0
	Stopień plastyczności Liquidity index $I_L$				
Gliny zwałowe Tills	<0	A* >70	3,0–5,0	5,0–6,0	–
Iły plioceńskie Pliocene clay	≈0	D** 26	–	4,0–8,0	8,0–16,0 (maximum 22)

\* – grunty spójne, morenowe, skonsolidowane, \*\* – ły, niezależnie od genezy.  
 \* – cohesive soils, consolidated, \*\* – clays, regardless of the geological origin.

i zostały wyznaczone na drodze obliczeń metodą elementów skończonych za pomocą analizy wstecz, w płaskim stanie odkształcenia, z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu gruntu z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra.

### MODELE NUMERYCZNE

Analizy numeryczne prowadzono na podstawie metody elementów skończonych (MES). Polega ona na dyskretyzacji analizowanego ośrodka na elementy skończone, dla których są rozwiązywane układy równań różniczkowych. Obliczenia prowadzi się wyłącznie w odniesieniu do węzłów podziału, a rozwiązanie jest przybliżane odpowiednimi funkcjami. Prostota oraz duża efektywność powodują, że w chwili obecnej MES jest wykorzystywana praktycznie we wszystkich dziedzinach nauki (Zienkiewicz & Taylor, 2007), w tym również w zagadnieniach głębokich wykopów i posadowień (Mitew-Czajewska i in., 2011). Obliczenia przemieszczeń ścian szczelinowych i odprężenia dna wykopu analizowanej konstrukcji przeprowadzono w pakiecie ZSoil 2014 v.14.10 (ZSOIL Manual Data Preparation & Tutorials, 2014). Przyjmując odpowiednie wymiary modelu eliminujące negatywny wpływ warunków brzegowych, zablokowano przemieszczenia poziome na bocznych krawędziach modelu oraz przemieszczenia pionowe i poziome na jego dolnej krawędzi. Zastosowano strukturalną siatkę elementów skończonych, czterowęzłowych. Uwzględniono położenie zwierciadła wody gruntowej oraz zmiany wartości modułu odkształcenia gruntów wraz ze wzrostem głębokości zalegania poszczególnych utworów (tab. 1). Przyjęto obciążenie powierzchni terenu spowodowane sprzętem budowlanym  $q = 10$  kPa (Siemińska-Lewandowska, 2001). Obliczenia przeprowadzono na podstawie modelu idealnie sprężysto-plastycznego, bazującego na warunku plastyczności Druckera-Pragera. W przeciwieństwie do modelu Coulomba-Mohra, powierzchnia plastyczności Druckera-Pragera jest gładka i tworzy w przestrzeni naprężeń głównych

stożek, eliminując wpływ osobliwości. W modelu tym jest wymagane zdefiniowanie następujących parametrów:

- moduł odkształcenia (E),
- współczynnik Poissona ( $\nu$ ),
- kąt tarcia wewnętrznej  $[\phi]$ ,
- spójność (c).

Na potrzeby artykułu przyjęto ujednoczoną wartość współczynnika Poissona ( $\nu = 0,3$  [-]) dla poszczególnych gruntów, niezależnie od ich litogenezy. Wygenerowany numeryczny model 2D stacji Świętokrzyska został przedstawiony na rycinach 3 i 4. Wykorzystane w obliczeniach wyprowadzone parametry materiałowe zostały przedstawione w tabeli 2.

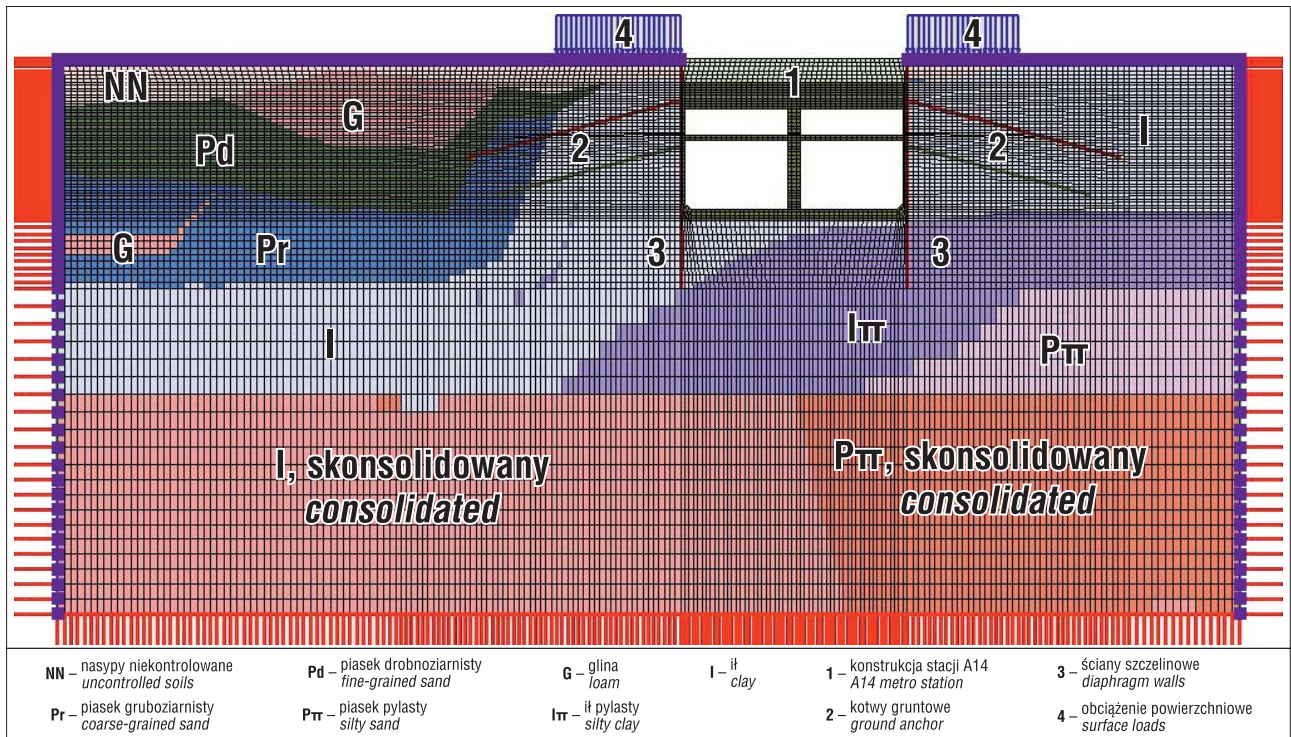
Konstrukcja otrzymanego modelu numerycznego, umożliwiła odtworzenie w poszczególnych krokach czasowych etapowania robót prowadzonych na budowie stacji A14 I linii metra (Siemińska-Lewandowska, 2001). Zamieszczone poniżej poszczególne rzędne zostały odniesione do poziomu terenu w miejscu wykonania inwestycji tj. 35 m n.p. „0” Wisły. Obliczenia były prowadzone w odniesieniu do następujących stanów realizacji obiektu:

- etap I – wygenerowano w podłożu naprężenia początkowe i ciśnienia porowe wynikające z układu warstw gruntu i poziomu wody gruntowej występującej w analizowanym przekroju – stan zerowy. Uwzględniony układ warstw i poziom wody gruntowej przyjęto zgodnie z opracowaniem geotechnicznym;
- etap II – modelowano numerycznie wykonanie ścian szczelinowych stacji metra A14 Świętokrzyska do rzędnej 20,70 m p.p.t.,
- etap III – modelowano proces głębienia wykopu stacji metra A14 Świętokrzyska do rzędnej 4,55 m p.p.t. Odtworzono wykonanie kotew I rzędu, sprężonych siłą 500 kN,
- etap IV – modelowano wykonanie wykopu stacji metra A14 Świętokrzyska do rzędnej 6,65 m p.p.t. Odtworzono wykonanie kotew II rzędu, sprężonych siłą 600 kN,

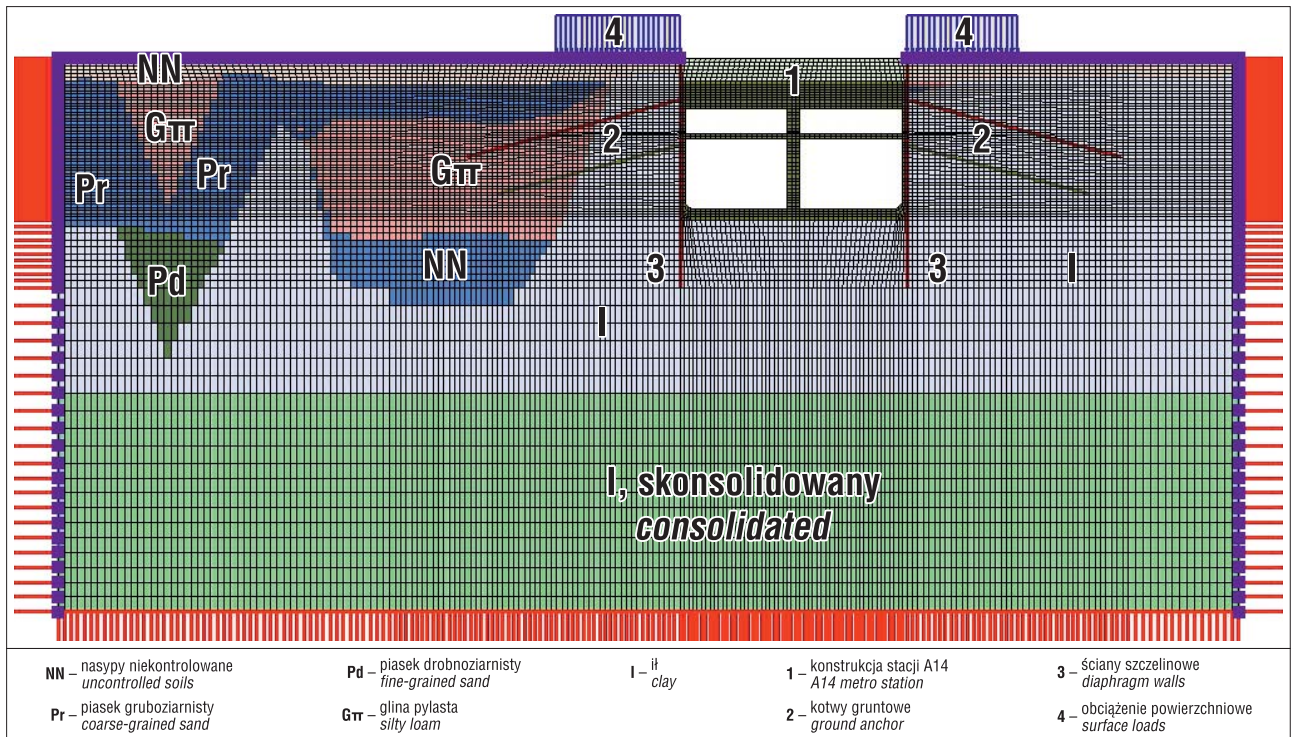
**Tab. 2.** Efektywne parametry materiałowe wykorzystane do obliczeń  
**Table 2.** The material parameters used for the calculation

Rodzaj gruntu <i>Type of soil</i>	Moduł odkształcenia <i>Modulus of compressibility</i>	Kąt tarcia wewnętrznej <i>Angle of internal friction</i>	Kohezja <i>Cohesion</i>	Ciężar objętościowy <i>Unit weight of a soil</i>	Współczynnik filtracji <i>Coefficient of permeability</i>
	E [MPa]	$\Phi$ [°]	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	k [m/d]
Nasypy niekontrolowane (NN) <i>Uncontrolled soils (NN)</i>	30	20	30	17	0,3
Gлина (G) <i>Till (G)</i>	100	20	40	19	0,5
Piasek drobnoziarnisty (Pd) <i>Fine-grained sand (Pd)</i>	100	35	–	20	3
Piasek gruboziarnisty (Pr) <i>Coarse-grained sand (Pr)</i>	120	35	–	18	5
Г (I) <i>Clay (I)</i>	150	20	50	20	0,001
Pył (π) <i>Silt (π)</i>	200	20	45	20	0,1
Piasek pylasty (Pπ) <i>Silty sand (Pπ)</i>	240	30	5	20	0,3
Г (I) skonsolidowany <i>Consolidated clay (I)</i>	400	20	50	20	0,001
Pył (π) skonsolidowany <i>Consolidated silt (π)</i>	400	20	45	20	0,1
Piasek pylasty (Pπ) skonsolidowany <i>Silty sand (Pπ) consolidated</i>	350	30	5	20	0,3





Ryc. 3. Przyjęta geometria modelu – przypadek A; na krawędziach widoczne warunki brzegowe  
 Fig. 3. Model geometry – variant A; visible boundary condition on the edges



Ryc. 4. Przyjęta geometria modelu – przypadek B; na krawędziach widoczne warunki brzegowe  
 Fig. 4. Model geometry – variant B; visible boundary condition on the edges

- etap V – zamodelowano pogłębienie wykopu stacji metra A14 Świętokrzyska do rzędnej 11,85 m p.p.t. oraz zabezpieczenie ścian wykopu rozporą rurową na rzędnej 10,85 m p.p.t.,
- etap VI – zamodelowano pogłębienie wykopu stacji metra A14 Świętokrzyska do rzędnej 14,60 m p.p.t.,

- etap VII – zamodelowano wykonanie żelbetowej konstrukcji stacji metra A14 Świętokrzyska (płyta denna + stropy),
- etap VIII – zamodelowano zmianę warunków wodno-gruntowych spowodowanych przez odbudowę wyporu pod stacją metra A 14.

## WYNIKI OBLICZEŃ

Uzyskane z modelowania numerycznego wartości przemieszczeń poziomych ścian szczelinowych ograniczających wykop odniesiono do wyników monitoringu prowadzonego podczas budowy stacji A14 I linii metra w Warszawie (Siemińska-Lewandowska, 2001). Przedstawione tam dane pochodzą z obserwacji prowadzonych od marca 1995 r. do kwietnia 1996 r. i od maja do grudnia 1998 r. W artykule przeanalizowano również charakter przemieszczeń dna wykopu po uzyskaniu jego projektowanej rzędnej. Zbiorcze zestawienie wyników dla obu przypadków obliczeniowych zamieszczono w tabeli 3.

Na podstawie rezultatów obliczeń można stwierdzić, że uzyskane wartości są zgodne z danymi pochodzącymi z obserwacji poczynionych bezpośrednio na budowie stacji A14. Charakter przemieszczeń analizowanej konstrukcji jest podobny, natomiast wartości przemieszczeń w analogicznych poziomach pomiarowych odbiegają od siebie. Różnice oscylują w granicach kilku milimetrów. W obydwu przypadkach obliczeniowych zaobserwowano odprężenie dna wykopu, co wynika bezpośrednio z odprężenia gruntów spoistych w podłożu (ryc. 5, 6). Przemieszczenia wyznaczone w trakcie analizy numerycznej mieszczą się w szerokich przedziałach wartości pochodzących z monitoringu dla obydwu przekrojów obliczeniowych. Świadczy to o poprawności wykonanej „analizy wstecz”. Większe zróżnicowanie występuje w trzecim i czwartym poziomie pomiarowym (Siemińska-Lewandowska, 2001), gdzie wskutek prowadzenia prac budowlanych i uszkodzenia reperów pomiarowych, rzeczywiste dane pomiarowe są obarczone dużym rozrzutem bądź niekompletne.

Chcąc skomentować pozostałe nieznaczne rozbieżności w wynikach i obserwacjach, należy wspomnieć o założeniach uwzględnionych przy generacji modelu. W trakcie opracowywania geometrii opierano się na danych zawartych m.in. na przekrojach geologiczno-inżynierskich. Te natomiast są tylko mniej lub bardziej dokładną próbą odzwierciedlenia rzeczywistej struktury ośrodka gruntowego. Przyjęty schemat budowy podłoża nie musi idealnie odzwierciedlać stanu faktycznego. Uwzględnione parametry materiałowe również są próbą uśrednienia danych laboratoryjnych i projektowych, uzupełnionych o doświadczenia własne autorów. Świadczy to o znaczącym wpływie danych geologiczno-geotechnicznych na rezultaty obliczeń numerycznych. W praktyce inżynierskiej może mieć to duży wpływ na podejmowanie decyzji projektowych i przyjmowanie konkretnych rozwiązań konstrukcyjno-technicznych.

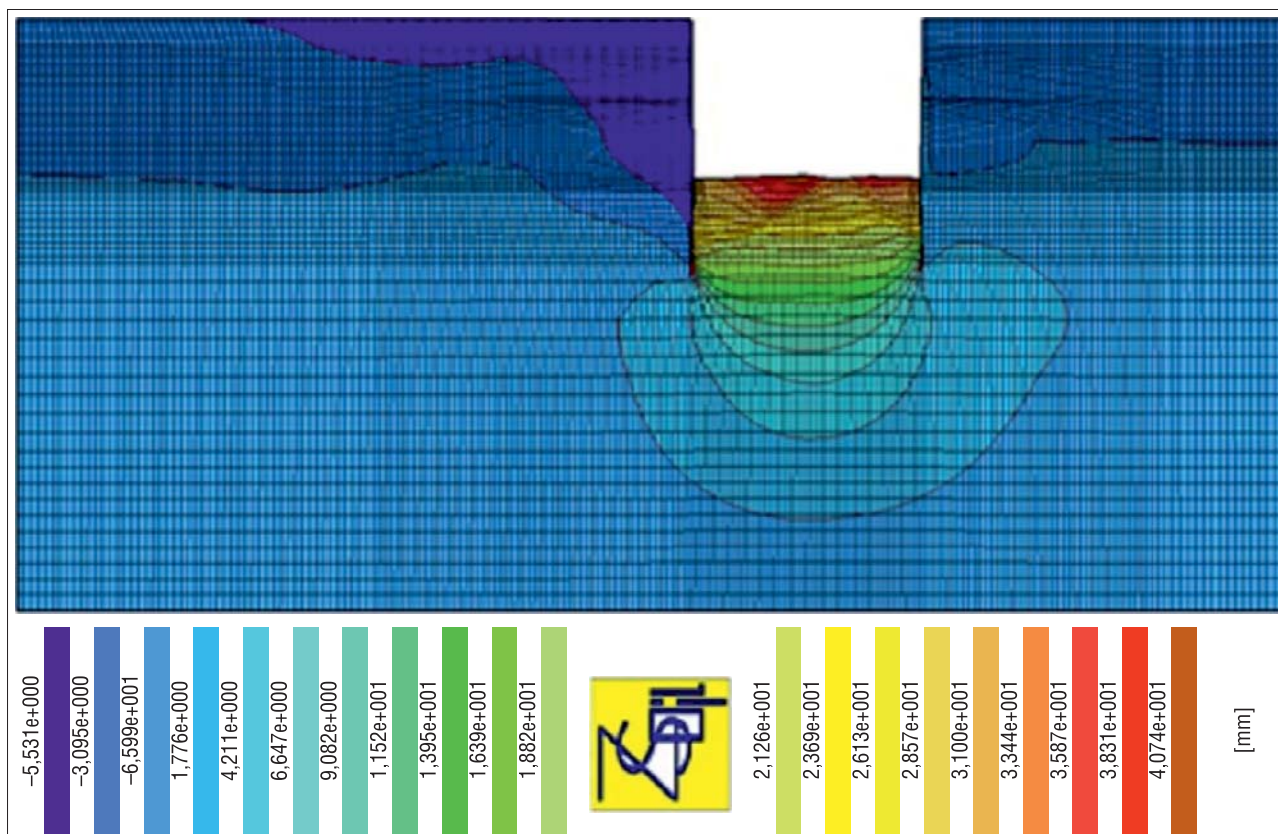
Zarówno dla przypadku obliczeniowego A, jak i B większe wartości przemieszczeń zaobserwowano w odniesieniu do lewej ściany modelowanego wykopu. Pod względem obliczeń numerycznych trudno jest jednak odnieść uzyskane wyniki do analiz numerycznych zawartych w publikacji Siemińskiej-Lewandowskiej (2001). W cytowanej pracy skorzystano z warunku symetrii, modelując tylko „połówkę” obiektu. Zostały założone tym samym jednolite warunki gruntowe po obu stronach wykopu. Wydzielono tylko dwie, wzajemnie równoległe warstwy litologiczne. Powyższe uwarunkowania pokazują aktualne możliwości i złożoność analiz numerycznych oraz postępowanie jakiegoś przedsięwzięcia w tej dziedzinie w ostatnich latach. Podsumowując wykonane obliczenia, należy podkreślić, że przeprowadzone analizy numeryczne nie odzwierciedlają w pełni charakteru pracy analizowanego obiektu. Wyznaczone wartości przemieszczeń ustalono na podstawie wyników uproszczo-

**Tab. 3.** Uzyskane wartości przemieszczeń oraz wartości rzeczywiste (na podstawie Siemińskiej-Lewandowskiej, 2001)  
**Table 3.** Obtained values of displacement and actual values (based on Siemińska-Lewandowska, 2001)

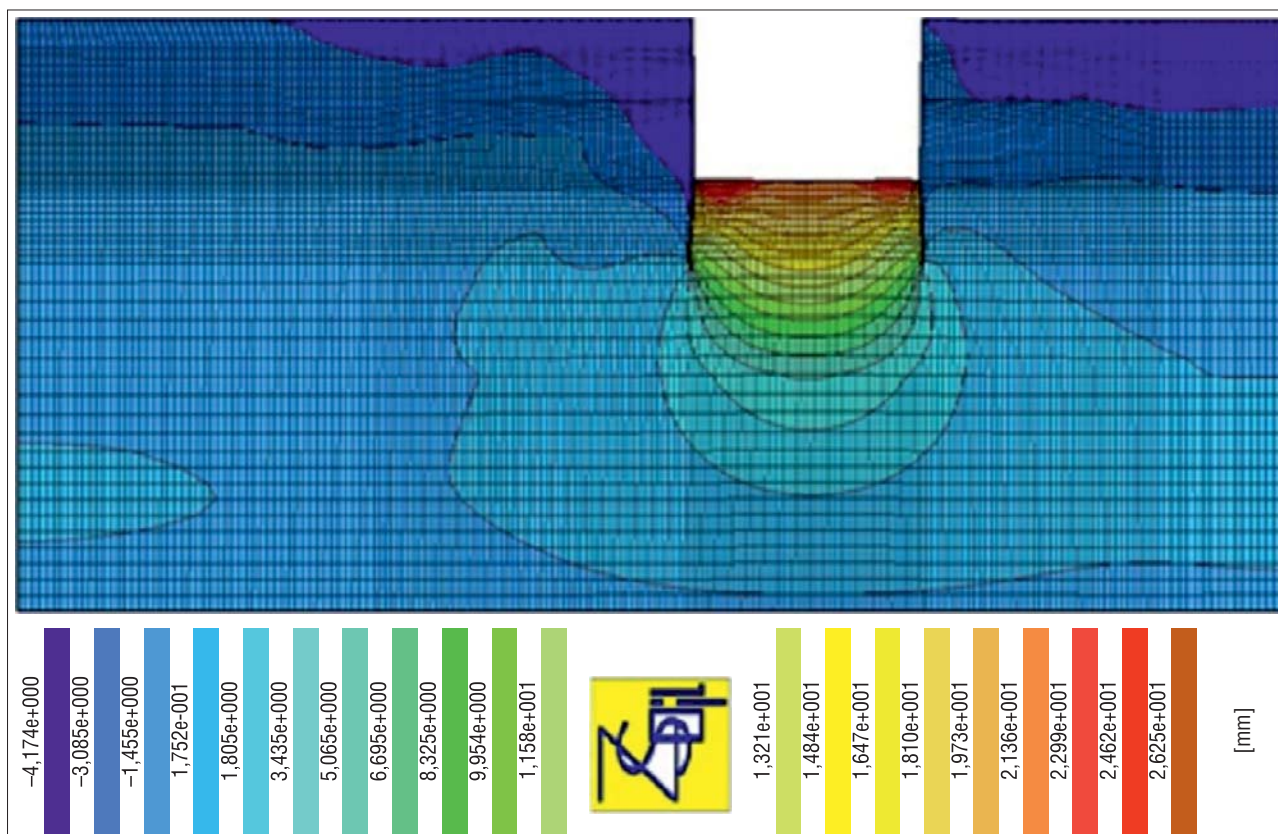
Lokalizacja <i>Location</i>	Przemieszczenia [mm] (+) <i>Displacement [mm] (+)</i>				Wartości obserwowane na budowie stacji A14 <i>Observed values during A14 metro station construction</i>
	Obliczenia numeryczne przypadek A <i>Numerical calculation variant A</i>		Obliczenia numeryczne przypadek B <i>Numerical calculation variant B</i>		
	Ściana lewa <i>Left wall</i>	Ściana prawa <i>Right wall</i>	Ściana lewa <i>Left wall</i>	Ściana prawa <i>Right wall</i>	
I poziom pomiarowy (1 m p.p.t) <i>Measurement level I (1 m b.g.l.)</i>	3,5–18	2,7–10	4,2–20,2	2,4–11,6	3–16
II poziom pomiarowy (3,8 m p.p.t) <i>Measurement level II (3.8 m b.g.l.)</i>	6,5–21	6–12	4,2–20,2	2,4–11,6	14–20
III poziom pomiarowy (8 m p.p.t) <i>Measurement level III (8 m b.g.l.)</i>	19–20	12–23	18,2–20,2	10,4–13,7	13–24 (duży rozrzut) <i>(large spread)</i>
IV poziom pomiarowy (11,5 m p.p.t) <i>Measurement level IV (11.5 m b.g.l.)</i>	23–24	16–17	20–21	10,4–14	5–8 (niekompletne) <i>(incomplete)</i>
Odprężanie dna wykopu <i>Relaxation of the trench bottom</i>	41		26		30–60

Wartość dodatnia (+) oznacza przemieszczenia ścian „do wnętrza” wykopu, w przypadku dna wykopu przemieszczenia w górę.  
Sign (+) means displacement “toward inside” of the trench.





Ryc. 5. Wynik obliczeń numerycznych. Przesunięcia pionowe. Odprężenie dna wykopu – przypadek A  
 Fig. 5. Result of numerical calculation. Vertical displacement. Relaxation of the trench bottom – variant A



Ryc. 6. Wynik obliczeń numerycznych. Przesunięcia pionowe. Odprężenie dna wykopu – przypadek B  
 Fig. 6. Result of numerical calculation. Vertical displacement. Relaxation of the trench bottom – variant B

nego modelu dwuwymiarowego (model płaski). Jego dużym ograniczeniem jest brak możliwości uwzględnienia w obliczeniach wpływu ewentualnych zmian geometrii i parametrów materiałowych w przestrzeni trójwymiarowej. W przypadku niejednorodnej budowy podłoża gruntowego i skomplikowanych warunków gruntowo-wodnych jest to niezbędne. W większości przypadków modele 3D dostarczają pełniejszych i dokładniejszych wyników oraz informacji (Kasprzak i in., 2015; Łukasik i in., 2015). W bardziej wymowny sposób wizualizują również procesy i zjawiska zachodzące w obrębie analizowanego obiektu.

## WNIOSKI

Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Otrzymane wyniki obliczeń korelują się z rzeczywistymi wartościami przemieszczeń ścian szczelinowych obserwowanych podczas realizacji stacji metra A14;
2. Zaobserwowano występowanie przemieszczeń pionowych dna wykopu, co jest związane z odprężeniem gruntów spoistych w podłożu i zgodne z obserwacjami wykonanymi w trakcie realizacji obiektu;
3. Różnice w poszczególnych wartościach przemieszczeń wynikają z różnego układu warstw geologicznych przyjętego do obliczeń;
4. Przyjęte do obliczeń numerycznych parametry materiałowe różnią się od danych zawartych w dokumentacji projektowej. Zostały one zmodyfikowane autorską metodą na podstawie „analizy wstecz” dla głębokich posadowień realizowanych na terenie Warszawy;
5. Wraz z głębokością zmianie ulega sztywność poszczególnych warstw geologicznych, co ma znaczący wpływ na końcowy wynik analiz;
6. W przypadku skomplikowanej budowy geologicznej podłoża, w celu uzyskania jak najbardziej miarodajnych wyników, konieczne jest bardzo dokładne rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych. Pomocne mogą się okazać metody geofizyczne, takie jak: sejsmiczne, metoda elektrooporowa czy georadarowa (GPR);
7. Wiarygodność wyników obliczeń numerycznych jest uzależniona od dokładności rozpoznania geologicznego i poprawności wyznaczania parametrów materiałowych;
8. Podczas projektowania i wykonawstwa obiektów budowlanych w trudnych warunkach (skomplikowana

budowa podłoża, sąsiedztwo istniejących budynków, głębokie wykopy itp.) nie można opierać się na typowych oszacowaniach parametrów oraz normowych metodach obliczeń statycznych;

9. Należy wykorzystywać modelownie numeryczne (2D i 3D), bazujące na nowoczesnych badaniach gruntu i nowoczesnych technikach dokumentacyjnych, oraz rozbudowywać sieci monitoringu geodezyjnego. Wykonane obserwacje geodezyjne pozwalają zweryfikować poprawność modelu MES w stosunku do rzeczywistości.

Autorzy pragną podziękować Recenzentom: dr. hab. Pawłowi Dobakowi, dr. Radosławowi Mieszkowskiemu, mgr. Michałowi Radzikowskiemu za ich cenne uwagi, które przyczyniły się do poprawy tego artykułu.

## LITERATURA

- BARAŃSKI M., POPIELSKI P. & SZCZEPAŃSKI T. 2008 – Analiza numeryczna odprężenia gruntu w głębokich wykopach ze względu na sztywność. *Czas. Tech.*, 20, ser. Środowisko, 3: 3–20.
- GEOTEST, 2005 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska do projektu architektoniczno-budowlanego budynku biurowo-handlowego w Warszawie róg ulicy Marszałkowskiej i Świętokrzyskiej. Warszawa.
- MITEW-CZAJEWSKA M., SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA A. & TOMCZAK U. 2011 – Analiza przemieszczeń ścian głębokich wykopów realizowanych w Warszawie. *Inż. i Bud.*, 67 (4): 214–217.
- KASPRZAK A., POPIELSKI P. & SMOLIŃSKI B. 2015 – Analiza numeryczna przemieszczeń budynku CBD i okolicznej zabudowy spowodowanych realizacją inwestycji przy ulicy Marszałkowskiej róg Świętokrzyskiej z uwzględnieniem współpracy ścian szczelinowych, płyty dolnej i baret. *Wydz. Inż. Środow.*, Politechnika Warszawska
- ŁUKASIK S., MISIUREK R., POPIELSKI P. & RYMSZA B. 2015 – Projekt budynku CBD-1 częściowo posadowionego na korpusie stacji metra A14-Świętokrzyska. Cz. II: Analiza statyczna ścian szczelinowych oraz prognozowanie przemieszczeń korpusu stacji i budynku, *Symposium „Problemy geotechniczne posadowienia obiektów w rejonie Warszawy”*, SGGW, Warszawa.
- PIG-PIB, 2015 – Dokumentacja badań podłoża gruntowego na potrzeby optymalizacji posadowienia budynku przy skrzyżowaniu ulic Marszałkowskiej i Świętokrzyskiej w Warszawie. NAG PIG-PIB, Warszawa.
- PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- POPIELSKI P. 2012 – Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. *Pr. Nauk. PW, Środowisko*, 61.
- POPIELSKI P. & STASIEŃSKI J. 2005 – Zastosowanie pakietu HYDRO-GEO w geotechnice i hydrotechnice, dokładności obliczeń numerycznych, analiza wstecz. *XX Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Wiśla: 235–259.
- SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA A. 2001 – Przemieszczenia ścian kotwionych szczelinowych, *Pr. Nauk. PW, Budownictwo*, 139.
- ZIENKIEWICZ O.C. & TAYLOR R.L. 2007 – *Finite element method*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Sixth edition.
- Z\_SOIL MANUAL DATA PREPARATION & TUTORIALS 2014 – Z\_SOIL PC v. 14.10.2014, Zace Services, Lausanne.