

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 207–216
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 207–216
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.20

Damian KŁOBUKOWSKI¹, Tomasz GODLEWSKI¹, Paweł POPIELSKI²

¹Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu, Instytut Techniki Budowlanej
Building Structures, Geotechnics and Concrete Department, Building Research Institute

²Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika
Warszawska

Faculty of Building Services, Hydro and Environmental Engineering, Warsaw University
of Technology

Analiza numeryczna procesu odwodnienia budowlanego wykopu zlokalizowanego w pobliżu dużej rzeki Numerical analysis of dewatering process of an excavation located close to a large river

Słowa kluczowe: odwodnienie wykopu, modelowanie MES, deformacja, filtracja wody

Key words: excavation dewatering, finite element method, FEM, deformation, water filtration

Wprowadzenie

Wraz z rozwojem technik obliczeniowych wspomagających projektowanie geotechniczne możliwe jest coraz dokładniejsze odzwierciedlenie zachowania konstrukcji współpracującej z podłożem, uwzględniające również złożoną problematykę przepływu wody w gruncie. Pozwala to na wybór racjonalnych rozwiązań projektowych, szczególnie w przypadku występowania skomplikowanych warunków podłoża lub posado-

wienia obiektów o znacznej złożoności z uwagi na ich konstrukcję, lokalizację czy układ geometryczny. Przykład takiej analizy dla instalacji związanych z energiką przedstawiono w dalszej części artykułu.

Jednymi z podstawowych czynników warunkujących stopień skomplikowania obiektów budownictwa energetycznego są ich układ konstrukcyjny oraz złożoność poszczególnych instalacji, a na etapie realizacji konieczność jednoczesności wykonania (równoległe prowadzenie robót ziemnych czy też prowadzenie odwodnień). Powoduje to konieczność uwzględniania różnych wariantów realizacji w analizie korelacji konstrukcji z podłożem. Z geotechnicznego punktu widzenia decydującymi wa-

runkami w analizie stanów granicznych są warunki użytkowania, którym należy poświęcić szczególną uwagę. W przypadku prowadzenia odwodnienia wykopów istotne staje się prawidłowe odzwierciedlenie tego procesu w kontekście poprawności przyjętych rozwiązań (Sokołowski i Żbikowski, 1993), ale również z uwagi na bezpośrednio z nim związany warunek użytkowania (np. nierównomierne osiadanie fundamentu w sąsiedztwie na skutek obniżenia zwierciadła wód gruntowych). Z tych względów dla racjonalnego zaprojektowania systemów odwodnienia niezbędne jest przyjęcie właściwego modelu odwzorowującego przepływ wody w ośrodku gruntowym przy zadanych warunkach pompowania, różnych stanach ekstremalnych takich jak sytuacje wezbraniowe czy awarie studni. Z uwagi na wieloetapowość i złożoność badań modelowych niezbędne staje się wykorzystanie zaawansowanych narzędzi numerycznych, np. metody elementów skończonych (MES) (Bogusz, Godlewski i Łukasik, 2017).

Dobór modelu obliczeniowego określany jest rodzajem zadania (typem konstrukcji), wybór modelu determinuje z kolei parametry niezbędne do obliczeń. Określając parametry obliczeniowe, należy kierować się przede wszystkim dokładnymi wynikami badań *in situ* (wiercenia, CPT, DMT, sondowania, próbnego pompowania) oraz laboratoryjnych, ponieważ stosowanie wyłącznie narzędzi statystycznych w tym celu może prowadzić do błędnych interpretacji. Model geotechniczny podłoża jest częścią projektu, powinien być w nim zdefiniowany i transparentny odnośnie założonych warunków geotechnicznych (jawność założeń, ułatwienie wymiany informa-

cji, możliwość weryfikacji itp.). Jego zakres powinien zawierać i uwzględniać informację odnośnie: geometrii podłoża, właściwości mechaniczne, hydrauliczne oraz hydrogeologiczne gruntów, a także etapów zmienności parametrów w czasie, typów konstrukcji, strefy aktywnej i stanów granicznych.

Obszar analizy

Teren projektowanej inwestycji, o powierzchni 24 ha, jest położony na lewym brzegu Wisły. Pod względem morfologicznym jest to taras nadzalewowy rzeki Wisły. Powierzchnia terenu jest płaska, a deniwelacje nie przekraczają 1 m. Rzędne terenu wahają się od 107 do 108 m z zerem projektowym 107,70 m.

Budynek główny oraz chłodnia kominowa wraz z zespołem obiektów towarzyszących są podstawowymi obiektami instalacji, a podstawowymi jednostkami wytwórczymi bloku są kocioł oraz turbina parowa przeznaczona do współpracy z kotłem, sprzęgnięta z generatorem wytwarzającym energię elektryczną i podłączonym do rozdzielni 400 kV. Turbozespół wraz z całą infrastrukturą jest zlokalizowany w budynku maszynowni.

Warunki geotechniczne

W podłożu analizowanej inwestycji poza przypowierzchniowymi warstwami gleby i nasypów występują dwa kompleksy piaszczyste. Pierwszy stanowią holocenijskie aluwialne osady piaszczyste, drugi – plejstocenijskie piaski i żwiry rzeczne tarasu nadzalewowego Wisły

sięgające do 23 m. Miejscami zdeponowane są piaszczyste osady z wkładkami węgla brunatnego (neogeńska facja burowęglowa) sięgające do głębokości 30 m. W rejonie maszynowni warunki geotechniczne określono na podstawie wierceń oraz sondowań statycznych (CPT) i dynamicznych (DPSH).

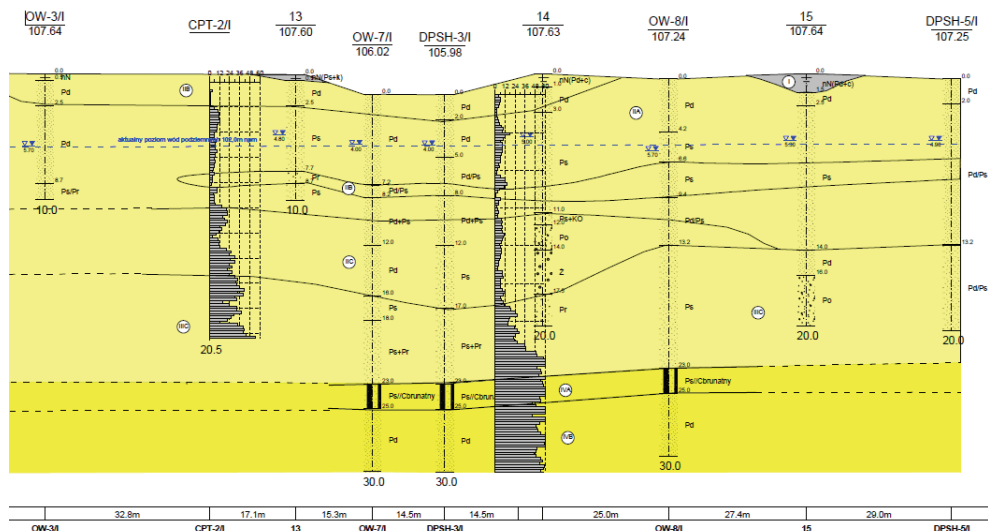
Z dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (HydroGeoStudio, 2013a) wynika, że podział na warstwy geotechniczne określono według stopnia zagęszczenia gruntu (I_d). Wyróżniono pięć głównych warstw z podziałem na podwarstwy (łącznie 10 wydzieleni). W rejonie budynku maszynowni i turbozespołu w podłożu wyróżniono następujące warstwy geotechniczne:

- warstwa I – grunty nasypowe $I_d = 0,30-0,80$;
- warstwa II – utwory o genezie rzecznej w postaci piasków głównie drobnych i średnich:
 - warstwa IIA – $I_d = 0,40-0,50$,

- warstwa IIB – $I_d = 0,30$,
- warstwa IIC – $I_d = 0,50-0,65$,
- warstwa III – utwory o genezie rzecznej w postaci piasków średnich i grubych:
 - warstwa IIIC – $I_d > 0,75$ ze żwirem,
 - warstwa IV – utwory formacji burowęglowej w postaci piasków średnich,
 - warstwa IVA – $I_d > 0,85$ z wkładkami węgla brunatnego,
 - warstwa IVB – $I_d > 0,85$.

Budowę podłoża i wzajemny układ warstw geotechnicznych w podłożu maszynowni pokazano na układzie warunków gruntowo-wodnych (rys. 1).

W podłożu nowego bloku i całej elektrowni występuje jeden ciągły poziom wodonośny istotny z geotechnicznego punktu widzenia (Bujakowski, 2015). Związany jest on z utworami wodonośnymi czwartorzędu i trzeciorzędu o łącznej miąższości 30 m. Współczynnik



RYSUNEK 1. Układ warunków geotechnicznych analizowanego obszaru (HydroGeoStudio, 2013a)
 FIGURE 1. The geotechnical conditions of the analyzed area (HydroGeoStudio, 2013a)

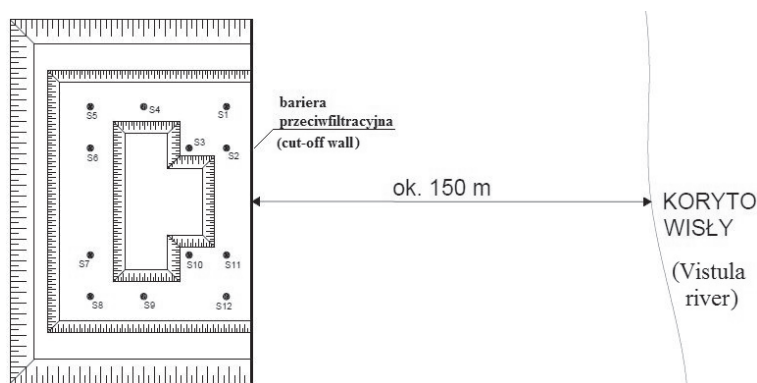
filtracji warstwy wodonośnej jest wysoki ($30,24 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$). Określono go na podstawie badań laboratoryjnych uziarnienia oraz próbnych pompowań. Analizowane zwierciadło wód podziemnych ma charakter swobodny i występuje na głębokości 1,6–5,7 m na rzędnej 101,8–104,0 m (HydroGeoStudio, 2013b). Z uwagi na bliskość rzeki i ścisły z nią związek hydrauliczny zwierciadło wód gruntowych pierwszego przypowierzchniowego poziomu wodonośnego ma zmienny charakter – ulega sezonowym i incydentalnym wahaniom w stosunku do stanu średniego. Typowa wartość wahań może osiągać 2 m.

Model obliczeniowy wykopu fundamentowego

Duża ilość zagadnień, które należy rozpatrzyć, aby trafnie ocenić stan konstrukcji geotechnicznej, skłania do zastosowania wygodnego narzędzia, jakim jest analiza numeryczna. Jedną z coraz częściej wykorzystywanych metod obliczeniowych jest MES. Metoda ta polega

na podziale obszaru na skończoną liczbę elementów połączonych ze sobą węzłami oraz iteracyjnym rozwiązywaniu równań różniczkowych dla tych elementów. Obliczenia numeryczne niniejszej publikacji wykonane zostały za pomocą programu ZSoil 2014 v. 14.14 przy założeniu przestrzennego modelu obliczeniowego. Celem przeprowadzonych obliczeń numerycznych była analiza procesu filtracji nieustalanej, ciśnienia porowego wody gruntowej oraz przemieszczeń pionowych i stateczności.

Analiza procesu filtracji w podłożu została przeprowadzona przy założeniu etapowego wykonania wykopu fundamentowego, działającego odwodnienia czasowego w postaci studni odwodnieniowych oraz z uwzględnieniem niedalekiego położenia rzeki Wisły, tj. około 150 m (rys. 2). Analizowany wykop, ze względu na położenie względem rzeki oraz zasięg leja depresji, zalicza się do grupy wykopów brzegowych (Wieczysty, 1982). W modelu obliczeniowym rozmieszczenie studni odwodnieniowych (rys. 2) przyjęto zgodnie z projek-



RYSUNEK 2. Plan wykopu z lokalizacją pionowych studni depresyjnych (S1–S12)
 FIGURE 2. Excavation plan with the location of vertical depression wells (S1–S12)

tem odwodnienia budowlanego (Hydro-GeoStudio, 2013b).

Przemieszczenia pionowe przedstawiono w formie tabelarycznej, a współczynniki bezpieczeństwa stateczności ogólnej policzono metodą c–fi redukcji (proporcjonalnej redukcji parametrów materiałowych). Obliczenia związane z deformacją podłoża wykonano dla kilku wariantów:

- wariant 1 – analiza dla zmiennego poziomu wody w Wiśle,
- wariant 2 – analiza dla stałego średniego poziomu Wisły,
- wariant 3 – analiza dla sytuacji, w której przestaje działać jedna studnia (awaria).

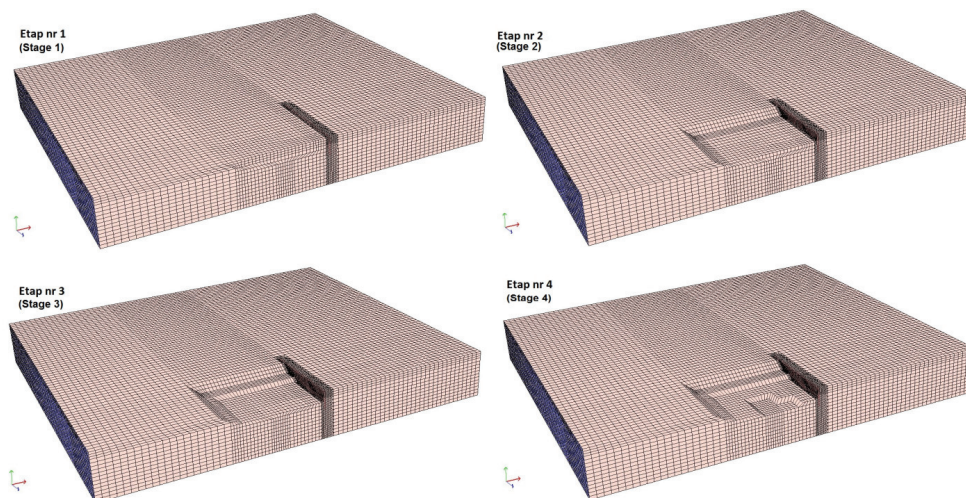
Dla wariantów filtracji i deformacji, ze względu na symetryczność wykopu oraz efektywniejszy wizualnie sposób prezentacji wyników, większość obliczeń przeprowadzono na połowie modelu.

W celu ukazania rzeczywistej sytuacji w tabeli podsumowującej zaprezentowano wyniki obliczeń dla całego wykopu.

Geometria modelu

Analizie numerycznej został podany obszar zawierający symetryczną połowę wykopu fundamentowego wraz z terenami przyległymi.

Na rysunku 3 zamieszczono ilustracje czterech etapów modelowania, odpowiadające stopniowemu głębieniu wykopu, z widoczną przyciemnioną strefą (ang. *seepage*) na widocznej lewej ścianie modelu, gdzie wprowadzono warunki brzegowe związanych z poziomem wody na granicy modelu. Etapy kolejne, czyli 5–8, symulują już tylko zmienny poziom wody w Wiśle. Strefy z przyłożonymi warunkami brzegowymi wynikającymi ze zmieniających się



RYСУNEK 3. Model obliczeniowy (połowiczny): etap 1 – teren z zagłębioną ścianką szczelną; etap 2 – wykonanie wykopu do poziomu 6 m; etap 3 – wykop do poziomu 9 m; etap 4 – wykop do poziomu 12 m (Kłobukowski, 2017)

FIGURE 3. Computational model (half): Stage 1 – an area with embedded sheet pile wall; Stage 2 – excavation to the level of 6 m; Stage 3 – excavation to the level of 9 m; Stage 4 – excavation to the level of 12 m (Kłobukowski, 2017)

poziomów wody zostały zlokalizowane na dwóch płaszczyznach modelu – jedna w miejscu koryta rzeki, a druga na przeciwległej stronie modelu w miejscu lokalizacji piezometru. W tych miejscach zostało przyłożone ciśnienie wody według odpowiednich funkcji. Dla pierwszego boku była to funkcja stanu wody w Wiśle, a dla boku drugiego była to funkcja opisująca poziom wody w piezometrze. W celu wydłużenia drogi filtracji wody dopływającej do wykopu od strony rzeki wbudowano tam barierę przeciwnfiltracyjną (zgodnie z projektem budowlanym) w postaci ścianki szczelnej typu Larsena (rys. 2). W modelu zagęszczono siatkę w miejscu wbudowanej bariery celem uszczegółowienia obliczeń.

Przyjęcie parametrów materiałowych

Według dokumentacji geologiczno inżynierskiej (HydroGeoStudio, 2013a) w podłożu występują w przeważającej części piaski drobne Pd (FSa). W modelu przyjęto zatem podłoże jednolite piasek drobny Pd (FSa) o następujących parametrach:

- moduł okształcenia $E = 80\,000$ kPa,
- współczynnik Poissona $\nu = 0,3$,

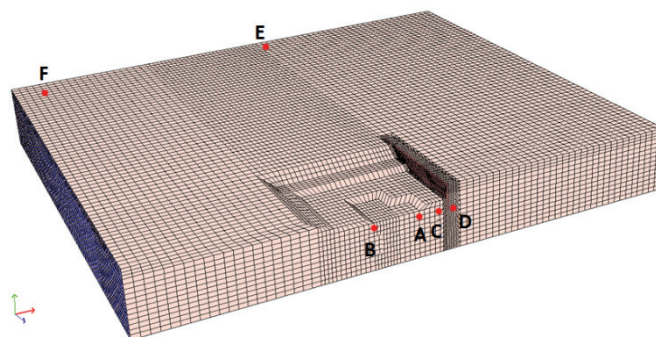
- ciężar objętościowy $\gamma = 20$ kN·m⁻³,
- kąt tarcia wewnętrznego $\varphi = 34^\circ$,
- kohezja (spójność) $c = 0$ kPa,
- współczynnik filtracji $k = 3,5 \cdot 10^{-4}$ m·s⁻¹.

Wyniki badań modelowych

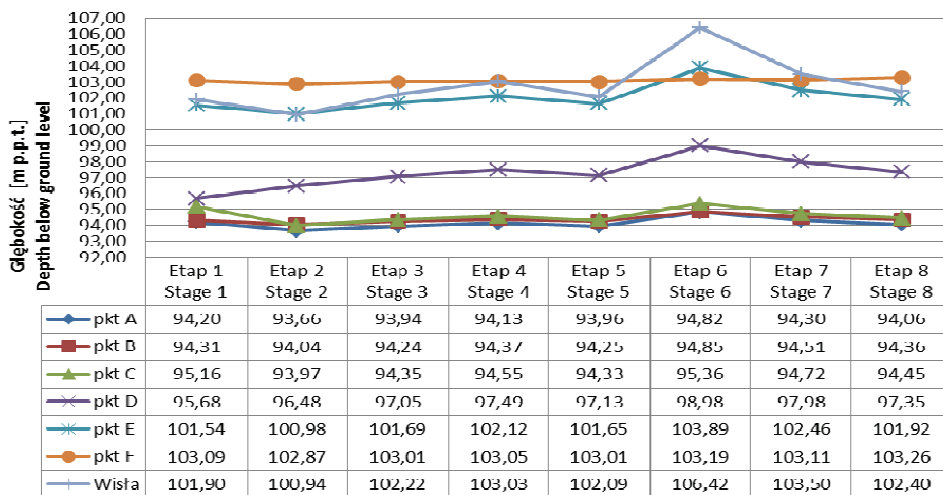
Obliczenia filtracji nieustalonej

Wyniki obliczeń zaprezentowano jako wykresy wartości ciśnienia dla wybranych punktów pomiarowych. Wykresy otrzymano poprzez przeliczenie wartości ciśnienia porowego na metry słupa wody. Do analizy użyto kilka wirtualnych punktów pomiarowych (A, B, C, D, E, F), ale punkty E i F miały odzwierciedlenie w istniejących piezometrach (rys. 4), co pozwoliło skalibrować model do warunków rzeczywistych. Uzyskane dokładne wartości zwierciadła wody umożliwiają porównanie wyników z wartościami projektowanymi.

Na rysunku 5 zestawiono stany wody w piezometrach oraz w Wiśle. Należy nadmienić, że etap 6 przedstawia sytuację, w której wystąpił krótkotrwały stan powodziowy. Poziom wody osiągnął



RYSUNEK 4. Lokalizacja charakterystycznych punktów pomiarowych w modelu (Kłobukowski, 2017)
 FIGURE 4. Location of characteristic measuring points in the model (Kłobukowski, 2017)



RYSunEK 5. Zestawienie wysokości poziomów wód gruntowych oraz wody w Wiśle w kolejnych etapach obliczeniowych (Kłobukowski, 2017)

FIGURE 5. Comparison of the groundwater levels and water in the Vistula river in subsequent calculation stages (Kłobukowski, 2017)

wtedy wartość 106,42 m przy rzędnej terenu 107 m.

Przeanalizowano również przypadek awaryjny, kiedy przestaje działać jedna studnia. Wyłączono studnię S6, co spowodowało w jej rejonie wyciek. Sytuację potęguje to, że podczas etapu 6 doszło do szczególnego podniesienia poziomu wód w rzece.

Obliczenia deformacji

Analizę deformacji wykonano, posługując się modelem sprężysto plastycznym z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. Rezultaty analizy procesu deformacji dna wykopu zobrażowano w formie maksymalnych zmian wartości przemieszczeń pionowych dna wykopu. W tabeli uwzględniono wyniki z etapów 3–8, ponieważ w etapach 1 i 2 symulacji nie zachodziły istotne zmia-

ny. Stateczność dna wykopu dla każdego z analizowanych przypadków była zachowana ($SF > 2$).

Do zniszczenia wywołanego znacznym wypiętrzeniem hydraulicznym może dojść w sytuacjach przekroczenia granicznej wartości naprężeń całkowitych gruntu przez naprężenia wywołane ciśnieniem wody w porach. Zjawisko to powstaje najczęściej na skutek spadku hydraulicznego głównie w gruntach sypkich lub gruntach o małej spójności. W prezentowanym modelu różnica wypiętrzenia dna wykopu wyniosła w najbardziej niekorzystnym punkcie 28,7 mm, co przy uwzględnieniu geometrii modelu oraz tego, że obliczenia nie uwzględniają wpływu głębokości na sztywność gruntu, jest wartością „bezpieczną”.

TABELA. Maksymalne zmiany wartości przemieszczeń pionowych dna wykopu
 TABLE. Maximum changes in the value of vertical displacements of the excavation bottom

Warianty Variants	Maksymalne zmiany wartości przemieszczeń pionowych dna wykopu w stosunku do etapu 3 [mm] Maximum changes in the value of vertical displacements of the excavation bottom in relation to stage 3 [mm]					
	etap 3 Stage 3	etap 4 Stage 4	etap 5 Stage 5	etap 6 Stage 6	etap 7 Stage 7	etap 8 Stage 8
Zmienny poziom wody w Wiśle Variable water level in the Vistula	0	+16,3	+26,3	+28,4	+27,2	+26,6
Stały poziom wody w Wiśle Constant water level in the Vistula	0	+15,9	+26,3	+26,3	+26,3	+26,3
Przypadek awarii Well failure	0	+16,4	+26,3	+28,5	+27,3	+26,7
Model całościowy Full-size model	0	+16,4	+26,3	+28,7	+27,4	+26,7

Wnioski

Modelowanie numeryczne wymaga wprowadzenia wielu danych materiałowych oraz warunków brzegowych, od których zależy poprawność obliczeń. W przypadku modelowania zjawisk nieustalonych, takich jak filtracja w bliskim sąsiedztwie rzeki konieczne, jest zastosowanie analizy filtracji nieustalonej (Gruszczyński i Małecki, 2006).

Wzrost gradientów hydraulicznych na barierach uszczelniających może spowodować niekorzystne zjawiska filtracyjne i doprowadzić do sufozji lub erozji wewnętrznej – stan graniczny HYD (Popielski, 2000).

Obliczenia procesu deformacji podłoża wykonano za pomocą modelu sprężysto plastycznego z warunkiem plastyczności CM, który nie uwzględnia wpływu głębokości na sztywność gruntu. Zmianę wyporu dna w najmniej korzystnym przypadku, wynoszącym 28,7 mm dla etapu 6 w modelu całościowym, można więc uznać za zawyżony w

stosunku do rzeczywistości. Powodem mógł być wzrost gradientów hydraulicznych w okolicy bariery uszczelniającej.

Analiza numeryczna zakładająca wystąpienie awarii jednej pompy w studni depresyjnej wykazała symulację zalania wykopu fundamentowego. Gdyby taka sytuacja miała miejsce na budowie, mogłoby dojść do utraty stateczności skarp wykopu. Podczas odwadniania należy więc prowadzić ciągły monitoring działania urządzeń pompowych. Konieczne jest tutaj zasilanie elektryczne z dwóch niezależnych źródeł. Niezbędne jest zachowanie bezpieczniej głębokości poziomu wody gruntowej po obniżeniu do dna i skarp wykopu. Zbyt wysoki poziom wymaga wzmocnienia skarp i dna za pomocą geosyntetyków z dociążeniem płytami ażurowymi lub gruntami przepuszczalnymi (Sokołowski i Żbikowski, 1993).

Bliskość rzeki będącej w ścisłym powiązaniu hydraulicznym z wodą gruntową powoduje okresowe zmiany charakteru naturalnego drenażu wód. Sta-

ny niskie działają drenująco na obszar przyległy, a stany wysokie infiltrująco. Skutkuje to obniżeniem poziomu wód gruntowych oraz zwiększeniem gradientu hydraulicznego. W sprzyjających warunkach geotechnicznych może dojść do degradacji podłoża poprzez aktywację zjawisk związanych ze zniszczeniem hydraulicznym. Wisła na analizowanym odcinku w typowych stanach średnich ma charakter drenujący. W stanach wysokich (powodziowych) może okresowo zaburzać lub zmieniać kierunek dopływu wód podziemnych, zmieniając charakter na infiltrujący (ITB, 2016).

Dokładność (trafność) analizy procesu odwodnienia zależy zarówno od programu komputerowego, jak i od dokładności określenia parametrów geotechnicznych. W przypadku odwodnienia istotne znaczenie ma współczynnik filtracji. Dla tak dużego przedsięwzięcia współczynnik filtracji należy określić na drodze próbnych pompowań. Badanie te są drogie, ale najdokładniejsze i w przedstawionej sytuacji hydrogeologicznej uzasadnione.

Literatura

- Bogusz, W., Godlewski, T. i Łukasik, S. (2017). Współpraca obiektów budownictwa energetycznego z podłożem w zróżnicowanych warunkach geotechnicznych. *Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele*, 61(4), 24-29.
- Bujakowski, F. (2015). *Morfogeniczne kryteria identyfikacji zróżnicowania filtracji w warstwie aluwialnej na przykładzie doliny środkowej Wisły* (praca doktorska). Warszawa: Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Gruszczyński, W. i Małecki, J. (2006). Numeryczny model filtracji nieustalonej dla doliny Wisły w rejonie ujścia rzeki Świder. *Geologos*, 1426-8981(10), 65-73.
- HydroGeoStudio (2013a). *Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla budowy bloku energetycznego*. Warszawa: HydroGeoStudio.
- HydroGeoStudio (2013b). *Projekt wykonawczy odwodnienia budowlanego dla budowy bloku energetycznego*. Warszawa: HydroGeoStudio.
- ITB (2016). *Opinia naukowo-techniczna*. Warszawa: ITB.
- Kłobukowski, D. (2017). *Analiza procesu odwodnienia budowlanego podczas budowy nowego bloku energetycznego z wykorzystaniem symulacji numerycznej* (praca magisterska). Warszawa: Politechnika Warszawska.
- Popielski, P. (2000). *Model sufozji mechanicznej w ujęciu metody elementów skończonych*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Sokołowski, J. i Żbikowski, A. (1993). *Odwodnienia budowlane i osiedlowe*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Wieczysty, A. (1982). *Hydrogeologia inżynierska*. Warszawa: PWN.

Streszczenie

Analiza numeryczna procesu odwodnienia budowlanego wykopu zlokalizowanego w pobliżu dużej rzeki. Celem artykułu jest analiza procesu odwodnienia i sporządzeniu modelu numerycznego odzwierciedlającego warunki gruntowo-wodne podczas odwodnienia czasowego wykopu budowlanego w sytuacji dynamicznie zmiennego reżimu dużej rzeki. W publikacji przedstawiono etapową realizację modelu oraz przeprowadzenie obliczeń w programie ZSoil z użyciem metody elementów skończonych (MES). Celem obliczeń było wyznaczenie poziomu ciśnień porowych ośrodka gruntowego oraz wielkości deformacji dna wykopu w kilku etapach symulacji, uwzględniających zmienny poziom wody w pobliskiej rzece. Obliczenia zostały skalibrowane na podstawie wyników monitoringu odwodnienia. Model obejmował przeprowadzenie obliczeń dla przepływającej fali wezbrania. Wyniki otrzymanych ciśnień porowych zostały przeliczo-

ne na wysokości wody gruntowej w najbardziej charakterystycznych punktach modelu. W analizie uwzględniono istniejące piezometry w celu porównania wartości otrzymanych z symulacji z wartościami zmierzonymi na budowie. Opracowany model uwzględnił różne warianty charakteryzujące poziomy wody w rzece oraz możliwość awarii studni. Uzyskane wyniki wskazują na wpływ usytuowania wykopu i tym samym uzależnienia poziomu wody gruntowej od drenującej bądź zasilającej rzeki.

Summary

Numerical analysis of dewatering process of an excavation located close to a large river. The main aims of the paper are the analysis of a dewatering process and the preparation of a numerical model for a dewatering of an excavation located near a river with dynamically changing water level, while accounting for existing groundwater conditions. In the publication stages of the construction of the model and the calculations using ZSoil software utilising finite element method (FEM) are presented. The purpose of the calculations was to estimate the pore water pressure in the subsoil and the deformations at the bottom of the excavation in few subsequent calculation stages, while taking the variation of the Vistula river level into account. The results of the calculations

were calibrated based on the groundwater monitoring results. The increasing water level of the river has been included in the calculations. The virtual analysis reproduces the existing piezometers, allowing to compare calculated results with the values measured at the site. Additionally, the model included variants characterizing the water levels in the Vistula river and the possibility of the dewatering well failure. Obtained results suggest that the location of the excavation, in reference to the river, is a major contributing factor, as the groundwater flow is dependent on the boundary conditions assumed for the river (inflow or drainage) based on its characteristics.

Authors' addresses:

Damian Kłobukowski, Tomasz Godlewski
Instytut Techniki Budowlanej
Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki
i Betonu
02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21
Poland
e-mail: d.klobukowski@itb.pl
t.godlewski@itb.pl

Paweł Popielski
Politechnika Warszawska
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki
00-653, Warszawa, ul. Nowowiejska 20
e-mail: pawel.popielski@pw.edu.pl