

NUMERYCZNA ANALIZA SKUTECZNOŚCI ŚCIAN SZCZELINOWYCH JAKO EKRANU PRZECIWFILTRACYJNEGO PODCZAS ODWADNIANIA GŁĘBOKIEGO WYKOPU

Edward Wienclaw, Eugeniusz Koda

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę wpływu głębokości ścian szczelinowych na przebieg odwodnienia głębokiego wykopu, zagłębionego do strefy zasobnego poziomu wodonośnego i realizowanego w warunkach silnej zabudowy miejskiej. Prognozę przeprowadzono dla projektowanej stacji „Rondo Daszyńskiego” drugiej linii metra w Warszawie. W rejonie tej stacji stwierdzono szczególnie trudne warunki hydrogeologiczne. Przyjęta koncepcja realizacji stacji zakłada odwadnianie wykopu studniami depresyjno-podciśnieniowymi z wnętrza wykopu, w osłonie ścian szczelinowych wykonanych do głębokości 10 m poniżej dna wykopu i stanowiących pionowy ekran przeciwfiltacyjny, otaczający wykop. Do obliczeń symulacyjnych odwodnienia wykopu stacji metra i przepływu wód podziemnych w jego rejonie wykorzystano program numeryczny FEMWATER. Pomimo symulacji różnych głębokości ścian szczelinowych, z prognozy dla wszystkich wariantów uzyskano znaczne wydatki odwodnienia wykopu i duże obniżenie ciśnienia hydrostatycznego w gruncie otaczającym wykop, co może stanowić zagrożenie dla konstrukcji pobliskich budynków, spowodowanej nadmiernym osiadaniami podłoża. Również niekorzystny wpływ odwodnienia może dotyczyć roślinności drzewiastej, znajdującej się na analizowanym terenie, wskutek okresowego przesuszenia podłoża. Wyniki prognozy mogą skłonić do podjęcia decyzji o realizacji wykopu z zastosowaniem poziomej bariery iniekcyjnej w strefie między ścianami szczelinowymi.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, przepływ wód podziemnych, ściany szczelinowe, odwodnienie głębokiego wykopu

WSTĘP

Odwodnienie głębokich wykopów w warunkach intensywnej zabudowy miejskiej i występowaniu w podłożu zasobnych warstw wodonośnych o dużej miąższości może stwarzać istotne problemy związane m.in. z wpływem tych prac na otaczające obiek-

¹Adres do korespondencji – Corresponding author: Edward Wienclaw, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: edward_wienclaw@sggw.pl

ty budowlane (zagrożenie osiadaniem podłoża wskutek zwiększenia naprężeń efektywnych) oraz znalezieniem odbiornika do odprowadzenia dużych ilości wód pochodzących z odwodnień. Wobec tego na etapie projektowania głębokich posadowień wskazane jest przeprowadzenie symulacji numerycznej procesu odwodnienia wykopu budowlanego celem określenia optymalnej głębokości ścian szczelinowych, obliczenia objętości wody i czasu odwodnienia lub też zaprojektowanie poniżej dna wykopu poziomej bariery iniekcyjnej. Przykładem takiej inwestycji, która wymaga prowadzenia odwodnień budowlanych, jest projektowana drugiej linia metra w Warszawie. Wszystkie stacje metra będą realizowane metodą odkrywkową, a większość z nich osiąga zasobne warstwy wodonośne, a więc zagadnienie odwodnienia lub izolacji od wód podziemnych będzie jednym z podstawowych problemów do rozwiązania we wstępnej fazie realizacji prac. Metoda zabezpieczenia wykopu stacji metra będzie każdorazowo analizowana w kontekście zapewnienia prawidłowej i bezpiecznej realizacji części podziemnych, przede wszystkim z uwzględnieniem warunków gruntowo-wodnych, głębokości wykopu oraz zabudowy w jej otoczeniu [Jaszczuk i Kulczycki 2001].

Długość drugiej linii metra w Warszawie wynosić ma 31 km. Wykonanych będzie 28 stacji, z których 13 zlokalizowano na terenie wysoczyzny polodowcowej, a pozostałe w dolinie Wisły. W pierwszej kolejności zrealizowany zostanie jej centralny odcinek długości 6 km, na którym zbudowanych zostanie 7 stacji: Rondo Daszyńskiego, Rondo ONZ, Świętokrzyska, Nowy Świat, Powiśle, Stadion i Dworzec Wileński (rys. 1). Budowę centralnego odcinka drugiej linii metra rozpoczęto w kwietniu 2010 roku. Oddanie tego odcinka do eksploatacji planowane jest w 2014 roku. Z uwagi na gęstą zabudowę miejską i silne zawodnienie gruntów w rejonie większości stacji roboty ziemne będą prowadzone w osłonie ścian szczelinowych. Zadaniem ścian szczelinowych, które stanowią również element konstrukcji obudowy stacji, jest zabezpieczenie stateczności ścian wy-



Rys. 1. Lokalizacja stacji B-10 „Rondo Daszyńskiego” drugiej linii metra w Warszawie

Fig. 1. Location of B-10 “Rondo Daszyńskiego” Station of the Second Subway Line in Warsaw

kopów [Grzegorzewicz i Kłosiński 2003] oraz pełnienie roli ekranu przeciwfiltracyjnego. Prowadzenie odwodnień głębokich wykopów w rejonie intensywnej zabudowy miejskiej może prowadzić do zagrożeń filtracyjnych dla istniejących budynków [Wang i in. 2009], dlatego prognoza skutków przebiegu prac odwodnieniowych powinna być przeprowadzona we wstępnej fazie projektu.

Prezentowany przykład badań modelowych przepływu wody podziemnej podczas odwodnienia wykonano na potrzeby wspomagania projektowania wykopu stacji B-10 „Rondo Daszyńskiego”. Wykop o głębokości 20 m będzie zagłębiony około 5 m poniżej stropu użytkowego poziomu wodonośnego. Wstępna koncepcja wykonania wykopu zakładała odwadnianie z jego wnętrza w osłonie ścian szczelinowych wykonanych do głębokości 10 m poniżej dna wykopu. Wyniki badań modelowych miały pozwolić odpowiedzieć na dwa podstawowe pytania: jak będzie kształtował się wydatek odwodnienia wykopu i czy ściany szczelinowe na tyle wystarczająco ograniczą lej depresji związany z odwodnieniem wykopu, że nie dojdzie do osiadania podłoża gruntowego pod istniejącymi obiektami budowlanymi?

Do obliczeń symulacyjnych odwodnienia wykopu i przepływu wód podziemnych w jego rejonie wykorzystano program numeryczny FEMWATER (A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media), z pakietu GMS – Groundwater Modeling System [EMRL 2005], oparty na trójwymiarowej symulacji przepływu wody podziemnej z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

OBIEKT BADAŃ

Założenia projektowe wykonania wykopu stacji B-10

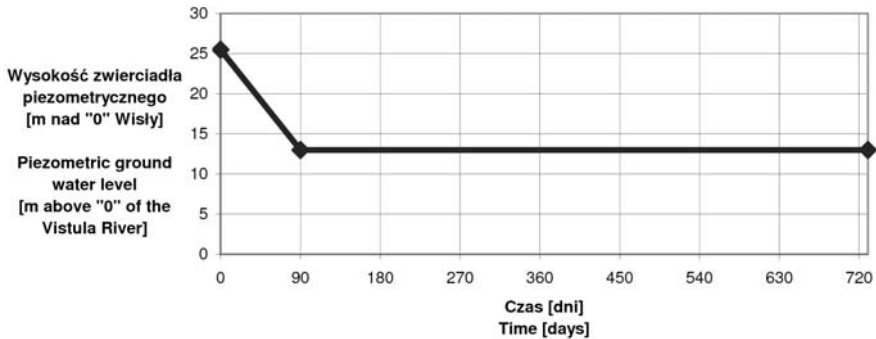
Stacja B-10 zlokalizowana jest na zachód od ronda Daszyńskiego w Warszawie. W sąsiedztwie stacji przeważa gęsta i wysoka zabudowa mieszkalno-biurowa. W odległości około 50 m od stacji znajduje się jedno z ujęć wód podziemnych z poziomu czwartorzędowego.

Stacja wykona będzie metodą odkrywkową w osłonie ścian szczelinowych. Długość wykopu będzie wynosiła 200 m, szerokość od 21 do 22 m, a głębokość 20 m. Ściany szczelinowe będą grubości 0,6 m i głębokości 30 m.

Odwodnienie wykopu będzie realizowane z jego wnętrza w taki sposób i z taką wydajnością, aby wysokość zwierciadła piezometrycznego wód występujących w dnie wykopu w okresie pierwszych 90 dni była obniżana od wartości początkowej, tj. $H \approx 25,5$ m, do $H = 13$ m n. „0” Wisły w sposób liniowy, a następnie, aby była utrzymywana na stałej wysokości $H = 13$ m n. „0” Wisły, tj. minimum 1 m poniżej dna wykopu (rys. 2).

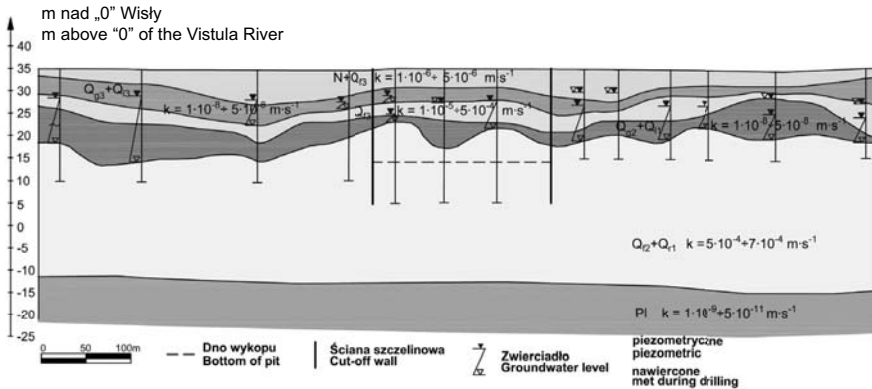
Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne

Powierzchnia terenu w rejonie stacji B-10 położona jest na wysokości od 32 do 36 m nad „0” Wisły. Jest to teren wysoczyzny polodowcowej, antropogenicznie przekształconej w wyniku miejskiego zagospodarowania. Podłoże stacji stanowią utwory plejstocenijskie o miąższości od 40 do 60 m [Morawski 1979, Wolski i in. 2003, 2004], zalegające na



Rys. 2. Założona wysokość zwierciadła piezometrycznego wód podziemnych w dniu wykopu stacji w funkcji czasu odwadniania

Fig. 2. Assumed piezometric groundwater level at the subway station pit bottom as the function of dewatering time



Rys. 3. Przekrój hydrogeologiczny wzdłuż stacji B-10 „Rondo Daszyńskiego”

Fig. 3. Hydrogeological cross-section along B-10 “Rondo Daszyńskiego” Subway Station

iłach plioceńskich. Syntetyczny profil genetyczno-stratygraficzny serii utworów plejstoceńskich obejmuje następujące warstwy (w kolejności od najmłodszych – rys. 3):

- osady fluwioglacjalne młodsze zlodowacenia Warty (Qf_3), wykształcone jako piaski średnie i drobne oraz pylaste, wymieszane z pokrywającymi je gruntami antropogenicznymi (N), opisanymi jako gliniasto-gruzowate i piaszczysto-gruzowe,
- osady zastoiskowe zlodowacenia Warty (Ql_3), opisane jako glina, glina pylasta, pyły piaszczyste, piaski pylaste i piaski drobne,
- osady morenowe zlodowacenia Warty (Qg_3), reprezentowane przez piaski gliniaste, gliny piaszczyste i gliny pylaste oraz przez pyły piaszczyste,
- osady fluwioglacjalne starsze zlodowacenia Warty (Qf_3), opisane jako piaski średnie i drobne oraz miejscami jako piaski średnie ze żwirami,
- osady zastoiskowe zlodowacenia Odry (Ql_2), opisane jako glina, glina pylasta, pyły piaszczyste i piaski pylaste z piaskami drobnymi,

- osady morenowe zlodowacenia Odry (Qg_2), reprezentowane przez glinę zwałową, która makroskopowo opisana została jako piaski gliniaste i gliny piaszczyste oraz jako gliny pylaste,
- osady fluwioglacjalne zlodowacenia Odry (Qf_2), wykształcone w postaci piasków drobnych i średnich z przewarstwieniami żwirów i pyłów,
- osady rzeczne interglacjału mazowieckiego (Qr_1), wykształcone w postaci piasków średnich z dużą zawartością żwirów i otoczków oraz piasków drobnych, piasków pylastych i pyłów.

Wartości współczynnika filtracji strefy saturacji (k_s) wydzielonych warstw utworów plejstocenijskich przedstawiono w tabeli 1. Współczynniki filtracji dla warstw wodonośnych wyznaczono metodą próbnego pompowania, na podstawie zależności empirycznych, oraz metodą zalewania otworów podczas wierceń. W tabeli 1 zamieszczono także wartości parametrów strefy aeracji, wymagane w modelu FEMWATER, to jest objętościową zawartość wody $\theta(h)$ i względną przewodność hydrauliczną $k_r(h)$, które zaczerpnięto z literatury [Carsel i Parrish 1988] i zdefiniowano następnie w modelu jako funkcje liniowe.

Tabela 1. Parametry materiałowe do modelowania numerycznego

Table 1. Material parameters for numerical model

Rodzaj materiału Material	k_s [$m \cdot s^{-1}$]	θ [$cm^3 \cdot cm^{-3}$]	k_r [-]
N+ Qf_3	$1 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}$	0,065–0,41	0,02–1
Qg_3+Ql_3	$1 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-8}$	0,1–0,38	0,036–1
Qf_3	$1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	0,045–0,43	0,0005–1
Qg_2+Ql_2	$1 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-8}$	0,1–0,38	0,036–1
Qf_2+Qr_1	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4}$	0,045–0,43	0,0005–1

Osady fluwioglacjalne zlodowacenia Warty (Qf_3) stanowią pierwszy od powierzchni terenu poziom wodonośny, charakteryzujący się zarówno zwierciadłem napiętym, jak i swobodnym, nawierconym na głębokości od 4 do 8 m p.p.t. Osady fluwioglacjalne zlodowacenia Odry (Qf_2) i rzeczne interglacjału mazowieckiego (Qr_1) stanowią drugi od powierzchni terenu poziom wodonośny, o ciągłym rozprzestrzenieniu i zwierciadle napiętym. Zwierciadło piezometryczne tego poziomu występuje na głębokości od 5 do 7 m p.p.t.

Podłoże utworów plejstocenijskich stanowią pliocenijskie ły zastoiskowe z przewarstwieniami mułków i piasków (Pl), o miąższości od 110 do 145 m. ły pliocenijskie charakteryzują się współczynnikiem filtracji $k_s = 1 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-9} m \cdot s^{-1}$.

MODEL PRZEPLYWU WÓD PODZIEMNYCH

Założenia modelu przepływu i podstawowe równanie różniczkowe

Do budowy modelu wykorzystano pakiet oprogramowania o nazwie FEMWATER [Yeh 1987, Lin i in. 1997]. Podstawą modelu komputerowego FEMWATER jest trójwymiarowe rozwiązanie zagadnienia przepływu wód podziemnych, opisanego zmodyfikowanym równaniem różniczkowym Richardsa [El-Hames i Richards 1995]:

$$\nabla [k_r k_s (\nabla h + \nabla z)] + q = F \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie: k_r – względna przewodność hydrauliczna [-],

k_s – tensor przewodności hydraulicznej strefy saturacji, $k_s = L \cdot T^{-1}$,

h – wysokość ciśnienia (L),

q – funkcja wyrażająca zasilanie lub pobór wody, odniesione do jednostkowej objętości ośrodka i jednostki czasu, $q = (1 \cdot T^{-1})$,

t – czas (T),

F – różniczkowa pojemność wodna obliczana z zależności:

$$F = \frac{d\Theta}{dh} \quad (2)$$

Θ – objętościowa zawartość wody, $\Theta = L^3 \cdot L^{-3}$.

Ogólnie przyjmuje się, że F , Θ i k_r są funkcjami h , natomiast w strefie saturacji F jest bardzo małe (dąży do zera w FEMWATER) oraz Θ równa się porowatości, a $k_r = 1$.

Powyższe równanie przepływu jest rozwiązywalne, gdy w całej przestrzeni przepływu wód podziemnych podany jest warunek początkowy:

$$h = h_i(w, y, z) \text{ na } R \quad (3)$$

gdzie: R – obszar zasilania,

h_i – określony warunek początkowy wysokości ciśnienia,

a także zdefiniowane są warunki brzegowe:

– Dirichleta

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t) \text{ na } B_d \quad (4)$$

– Neumanna

$$-n k_r k_s \nabla h = q_n(x_b, y_b, z_b, t) \text{ na } B_n \quad (5)$$

– Cauchy'ego

$$-n k_r k_s (\nabla h + \nabla z) = q_c(x_b, y_b, z_b, t) \text{ na } B_c \quad (6)$$

gdzie: x_b, y_b, z_b – współrzędne na brzegach,

n – wektor jednostkowy normalny do brzegu,

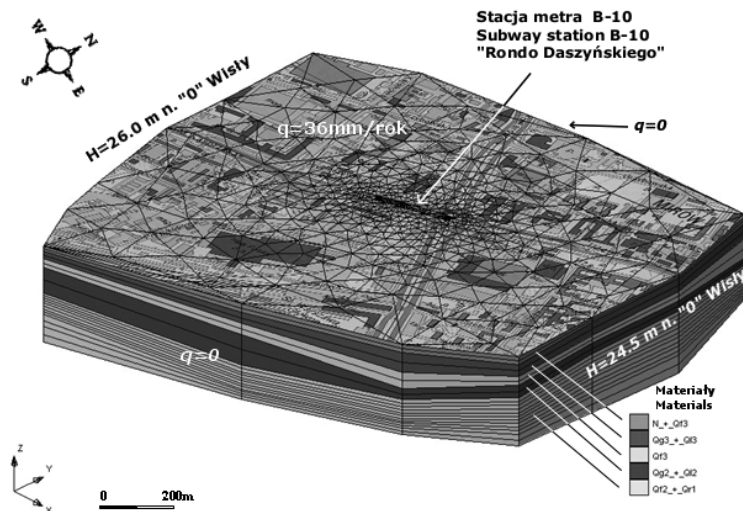
h_d, q_n, q_c – wartości funkcjonału Dirichleta, przepływu Neumanna i przepływu Cauchy'ego,

B_d, B_n, B_c – brzegi Dirichleta, Neumanna i Cauchy'ego.

W odróżnieniu od klasycznych równań filtracji przyjmowanych w zagadnieniach przepływu wód podziemnych (np. równanie Boussinesqa [Macioszczyk 1999], które opisuje ruch wody w warunkach pełnego nasycenia) równanie Richardsa opisuje ruch wody w obu strefach nasycenia, zarówno w strefie saturacji, jak i strefie aeracji. Rozwiązanie zagadnienia w modelu FEMWATER oparte jest na schemacie metody elementu skończonego. Charakter przepływu wody w rejonie wykopu podczas odwodnienia będzie w pełni trójwymiarowy.

Model przepływu dla odwodnienia analizowanego wykopu

Geometria modelu ściśle odwzorowuje geometrię wydzielonych warstw osadów i gruntów podłoża projektowanej stacji (rys. 4). Dolną granicę modelu stanowi powierzchnia stropu ilów płoceńskich, uznana w modelu za granicę nieprzepuszczalną.



Rys. 4. Bryła modelu numerycznego 3-D GMS/FEMWATER dla odwzorowania przepływu wód podziemnych w warunkach odwadniania wykopu stacji

Fig. 4. 3-D GMS/FEMWATER numerical model for simulation of groundwaters flow during dewatering of the subway station pit

Powierzchnia terenu objętego odwzorowaniem wynosi około $1,3 \text{ km}^2$. Północna i południowa granica modelu zostały przyjęte w badaniach jako granice bez przepływu ($q = 0$). Przyjęcie granic o warunku $q = 0$ wynikało z założenia, iż mogą one pokrywać się z kierunkami przepływu wód podziemnych zarówno dla obecnie rozpoznanej sytuacji hydrogeologicznej, jak i dla sytuacji w okresie odwadniania wykopu. Odległość północnej granicy od stacji wynosi 500 m, a południowej 550 m. Zachodnia granica modelu została przyjęta w odległości 550 m, a wschodnia 400 m od obrysu stacji. Granice te, wzdłuż pionowych powierzchni, należących do materiału oznaczonego symbolem $Qf_2 + Qr_1$, odwzorowano jako ograniczenia o warunkach brzegowych Dirichleta: $H = 26,0 \text{ m}$ – wzdłuż zachodniej granicy, i $H = 24,5 \text{ m}$ n. „0” Wisły – wzdłuż granicy wschodniej modelu. Przy wyznaczaniu granic modelu wykorzystano wyniki obliczeń analitycznych zasięgu leja depresji wokół projektowanego wykopu. Powierzchnię terenu odwzorowano jako obszar o warunku $q = 36,5 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$, odpowiadający natężeniu infiltracji efektywnej.

Skonstruowany model poddano kalibracji. W tym etapie badań modelowych dokonano porównania reakcji modelu, o wariantowo przyjętych wartościach współczynnika filtracji poszczególnych warstw, z rozpoznaną sytuacją hydrogeologiczną w rejonie analizowanej stacji B-10. Uzyskane wyniki rozwiązań w postaci wysokości hydraulicznej porównano z wysokościami zwierciadła piezometrycznego pomierzonymi w otworach wiertniczych.

Najlepszą zgodność pomierzonego zwierciadła piezometrycznego z wartościami obliczonymi w symulacji uzyskano dla wariantu o następujących wartościach współczynnika filtracji wyróżnionych warstw/materiałów [Wienclaw i in. 2007]: warstwa N+Qf₃ - $k_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, warstwa Qg₃+Ql₃ - $k_s = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, warstwa Qf₃ - $k_s = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, warstwa Qg₂+Ql₂ - $k_s = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i warstwa Qf₂+Qr₁ - $k_s = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Następnie odwzorowano na modelu projektowany wykop i zabezpieczające go ściany szczelinowe poprzez usunięcie z bryły modelu odpowiednich elementów siatki dyskretyzacyjnej. Uzyskane w ten sposób pionowe ściany wewnątrz bryły modelu spełniają warunek $q = 0$. Bryła modelu składa się z 20 440 elementów.

Odwodnienie wykopu odwzorowano poprzez przypisanie węzłom siatki modelu zlokalizowanym w dnie wykopu warunku brzegowego $H = H_d(t)$, odpowiednio do założeń projektowych (rys. 2). Obliczenia numeryczne wpływu odwodnienia wykopu na warunki hydrogeologiczne w rejonie stacji wykonano dla okresu od $t = 0$ (rozpoczęcie odwodnienia) do $t = 730$ dni. Jako warunek początkowy przyjęto wartości wysokości hydraulicznej uzyskane z symulacji przepływu na etapie kalibracji modelu.

Obliczenia numeryczne wykonano dla rozważanego wariantu głębokości wykonania ściany szczelinowej, wynoszącej 30 m, oraz jako warianty porównawcze – do głębokości 20 m (do dna wykopu), 25 m (do głębokości 5 m poniżej dna wykopu), 35 m (15 m poniżej dna wykopu), 40 m (20 m poniżej dna wykopu) i 45 m (25 m poniżej dna wykopu), celem oceny wpływu głębokości ścian szczelinowych na wydatek odwodnienia wykopu i ograniczenie zasięgu leja depresji oraz wyboru optymalnej głębokości ścian szczelinowych na potrzeby odwodnienia wykopu.

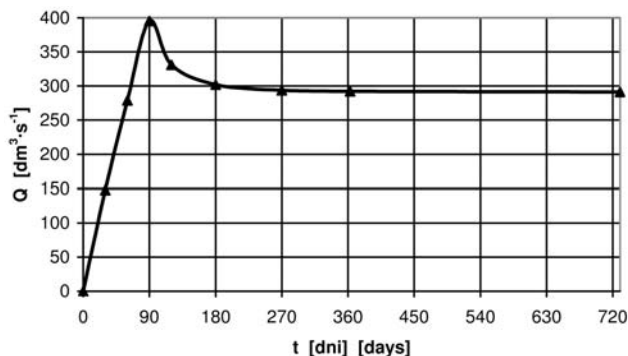
WYNIKI OBLICZEŃ

Prognozowany wydatek odwodnienia wykopu analizowanej stacji B-10 uzyskano, sumując wydatki przypisane węzłom siatki modelu, odwzorowującym przebieg odwodnienia.

Przebieg zmian wydatku odwodnienia w czasie, dla wariantu głębokości wykonania ściany szczelinowej wynoszącej 30 m, ilustruje rysunek 5. Od momentu rozpoczęcia do 90. dnia odwadniania wykopu wydatek odwodnienia wzrasta w sposób liniowy od zera do maksymalnej wielkości, wynoszącej $395 \text{ dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Ustalenie wydatku odwodnienia wykopu nastąpi po upływie 270 dni. Określony na podstawie badań modelowych ustalony wydatek odwodnienia wykopu wynosi $290 \text{ dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

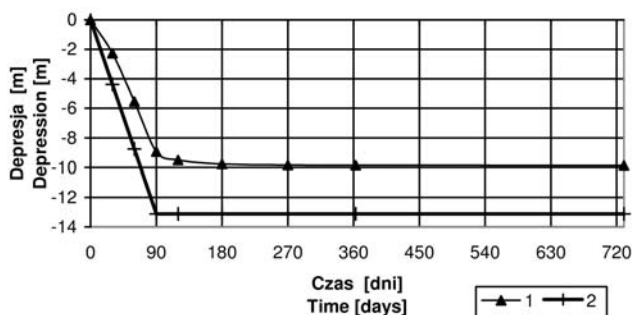
Dla wariantu głębokości wykonania ściany szczelinowej, wynoszącej 30 m, prognozowana maksymalna depresja zwierciadła piezometrycznego drugiego poziomu wodonośnego (przy ścianie szczelinowej) wynosi 9,9 m (rys. 6). W miarę oddalania się od wykopu depresja maleje, wynosi ona jednak ponad 4 m w odległości 500 m na północ i ponad 3 m w odległości 500 m na południe od wykopu (rys. 7), co nadal może stwarzać znaczne zagrożenia dla zlokalizowanych w tym rejonie obiektów.

Ściany szczelinowe wpływają ograniczająco na wydatek odwodnienia wykopu i wartość depresji wewnątrz prognozowanego leja depresji wokół wykopu (rys. 8 i 9). W miarę zwiększania głębokości ścian szczelinowych prognozowany wydatek odwodnienia i prognozowana depresja maleją, ale nadal osiągają stosunkowo duże wartości. I tak, dla wa-



Rys. 5. Prognozowany wydatek odwodnienia (Q) wykopu stacji w funkcji czasu (t) dla wariantu wykonania ściany szczelinowej do głębokości 30 m

Fig. 5. Predicted dewatering discharge (Q) from the subway station pit as the time function (t) for cut-off wall depending on the depth of 30 m

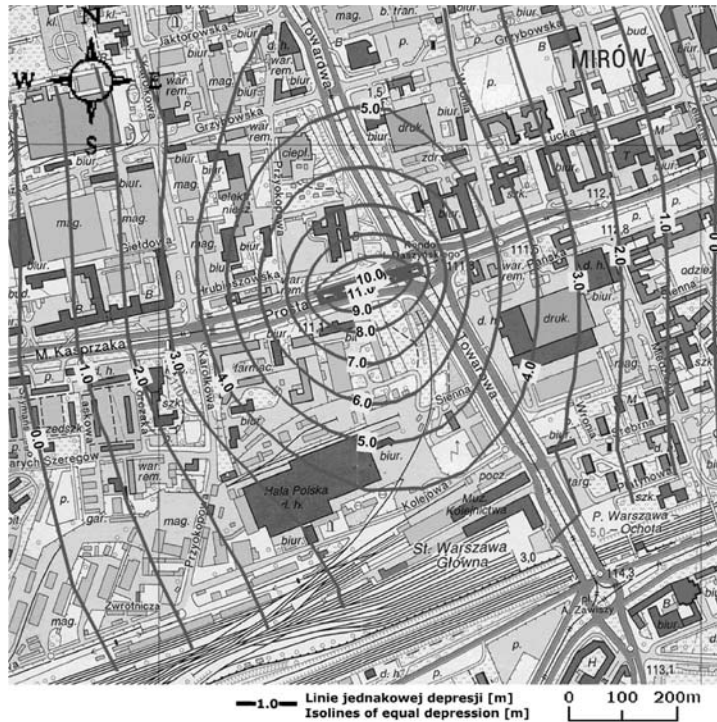


Rys. 6. Prognozowana depresja zwierciadła piezometrycznego drugiego poziomu wodonośnego przy ścianie szczelinowej na tle depresji w dnie wykopu: 1 – depresja dla wariantu wykonania ścian szczelinowych do 30 m, 2 – depresja w dnie wykopu

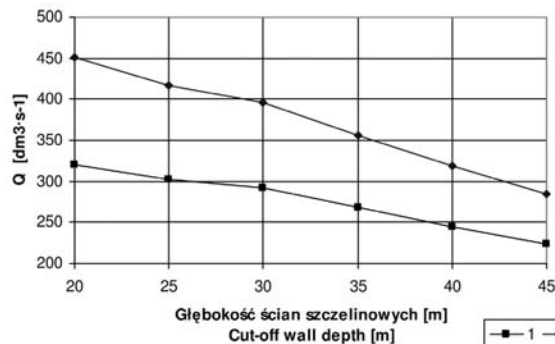
Fig. 6. Predicted depression of piezometric level of the second aquifer close to cut-off wall in comparison with the depression in the bottom of subway station pit: 1 – depression for cut-off variant to the depth of 30 m, 2 – depression in the bottom of station pit

riantu wykonania ścian szczelinowych do głębokości 45 m (tj. 25 m poniżej dna wykopu) maksymalny i ustalony wydatek odwodnienia wynoszą odpowiednio 250 i 225 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a prognozowana maksymalna depresja zwierciadła piezometrycznego drugiego poziomu wodonośnego (przy ścianie szczelinowej) wynosi 7,7 m. W miarę oddalania się od wykopu depresja maleje, nadal wynosi jednak ponad 3 m w odległości 500 m na północ i ponad 2 m w odległości 500 m na południe od wykopu (rys. 10), co wynika z dopływu wody do wykopu przez dno.

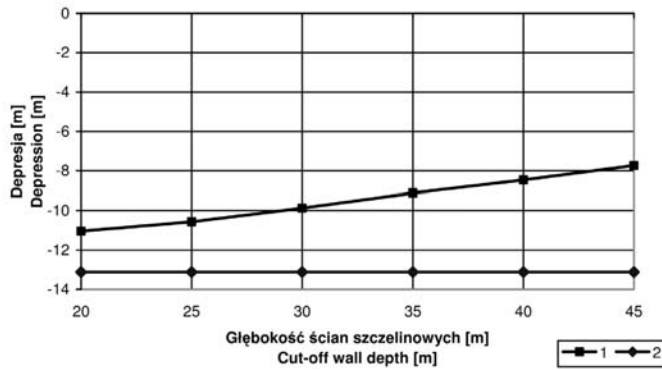
Pomimo symulacji przeprowadzonych przy różnych głębokościach ścian szczelinowych, z prognozy dla wszystkich wariantów uzyskano znaczne wydatki odwodnienia wykopu i duże obniżenie ciśnienia hydrostatycznego w gruncie otaczającym wykop, co może stanowić zagrożenie dla konstrukcji pobliskich budynków, spowodowane nadmier-



Rys. 7. Prognozowany lej depresji drugiego poziomu wodonośnego w 365. dniu odwadniania wykopu – stan dla wariantu wykonania ścian szczelinowych do głębokości 30 m
 Fig. 7. Predicted depression cone of the second aquifer at 365-th day of station pit dewatering – for the example of cut-off wall variant to the depth of 30 m

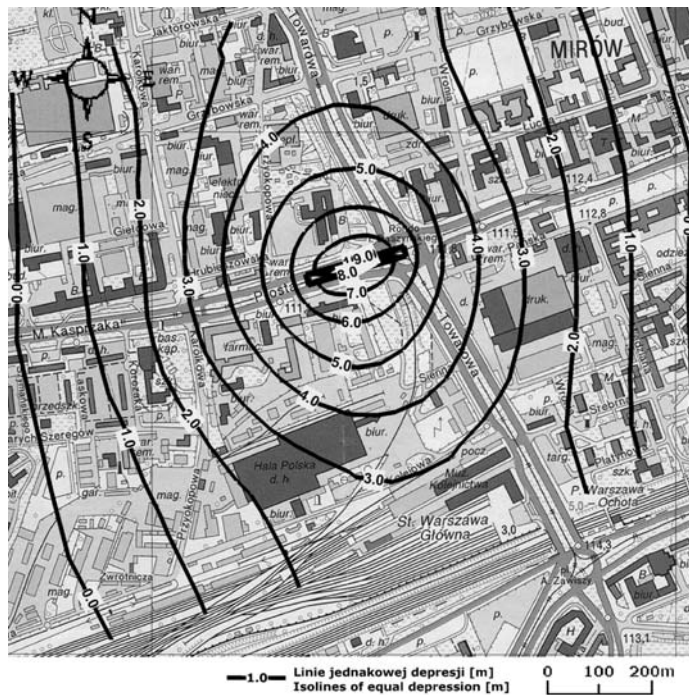


Rys. 8. Prognozowany wydatek odwodnienia (Q) wykopu stacji metra B-10 w funkcji głębokości ścian szczelinowych: 1 – wydatek ustalony (dla czasu $t = 365$ dni), 2 – wydatek maksymalny (dla czasu $t = 90$ dni)
 Fig. 8. Predicted discharge capacity (Q) of the station pit dewatering as function of cut-off wall depth: 1 – discharge capacity during steady flow for the time of $t = 365$ days, 2 – maximum discharge capacity for the time of $t = 90$ days



Rys. 9. Wpływ głębokości ścian szczelinowych na prognozowaną depresję zwierciadła piezometrycznego drugiego poziomu wodonośnego: 1 – depresja przy ścianie szczelinowej, 2 – depresja w dnie wykopu

Fig. 9. The influence of the cut-off walls depth on predicted depression of piezometric level of the second aquifer: 1 – the depression close to cut-off wall, 2 – the depression in the bottom of subway station pit



Rys. 10. Prognozowany lej depresji drugiego poziomu wodonośnego w 365. dniu odwadniania wykopu – stan dla wariantu wykonania ścian szczelinowych do głębokości 45 m

Fig. 10. Predicted depression cone of the second aquifer at 365-th day of the station pit dewatering – for the example of cut-off wall variant to the depth of 45 m

nym osiadaniem podłoża. Również niekorzystny wpływ odwodnienia może dotyczyć roślinności drzewiastej, znajdującej się na analizowanym terenie, wskutek okresowego przesuszenia podłoża. Z powyższych analiz wynika, że znaczne zwiększenie głębokości ścian szczelinowych nie wpływa znacząco na wyeliminowanie skutków odwodnienia wykopu, dlatego w takich warunkach należy przeanalizować wykonanie poziomej bariery iniekcyjnej w strefie między ścianami szczelinowymi, eliminującej lub istotnie ograniczającej dopływ wód od dna wykopu.

WNIOSKI

1. Wyniki obliczeń wskazują na przydatność metody modelowania numerycznego w rozwiązywaniu zagadnień przepływu wód podziemnych podczas odwadniania głębokiego wykopu w osłonie ścian szczelinowych. Wynika to przede wszystkim z możliwości uzyskiwania wielowariantowych rozwiązań za pomocą tego samego modelu. Cenna jest także możliwość uzyskiwania wyników dla dowolnie wybranego czasu odwadniania wykopu.

2. Pomimo uwzględnienia w badaniach różnych głębokości ścian szczelinowych, z prognozy uzyskano znaczne wydatki odwodnienia wykopu stacji i obniżenie ciśnienia hydrostatycznego w gruncie otaczającym wykop. Może to stanowić zagrożenie dla zasobów wód podziemnych poziomu wodonośnego oraz zagrożenie dla pobliskich budynków w wyniku osiadania podłoża.

3. Wyniki prognozy skłaniają do podjęcia decyzji o realizacji wykopu z zastosowaniem poziomej bariery iniekcyjnej w strefie między ścianami szczelinowymi, eliminującej lub znacznie ograniczającej dopływ wody do wykopu.

PIŚMIENNICTWO

- Carsel R.F., Parrish R.S., 1988. Developing joint probability distribution of soil-water retention characteristics. *Water Resources Research* 24, 5, 755–769.
- El-Hames A.S., Richards K.S., 1995. Testing the numerical difficulty applying Richards' equation to sandy and clayey soils. *Journ. Hydrol.* 167: 381–391.
- EMRL, 2005. Groundwater modeling system tutorial, I–IV. Brigham Young University, UT, Brigham.
- Grzegorzewicz K., Kłosiński B., 2003. Warunki techniczne wykonywania ścian szczelinowych. IBDiM, Warszawa.
- Jaszczuk K., Kulczycki A., 2001. Metody realizacji podziemnych części budowli w warunkach miejskich. *Materiały Budowlane* 3: 18–20.
- Lin H.C., Richards D.R., Yeh G.T., Cheng J.R., Cheng H.P., Jones N.L., 1997. FEMWATER: A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variably saturated media. Technical Report CHL-97-12, U.S. Army Corps of Engineers.
- Macioszczyk T., 1999. Matematyczne podstawy opisu ruchu i migracji wód podziemnych dla modelowania i sterowania ich zasobami. *Biul. PIG* 388:157–178.
- Morawski W., 1979. Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Warszawa Zachód. PIG, Warszawa.

- Wang J., Hu L., Wu L., Tang Y., Zhu Y., Yang P., 2009. Hydraulic barrier function of the underground continuous concrete wall in the pit of subway station and its optimization. *Environ. Geol.* 57: 447–453.
- Wienclaw E., Koda E., Kołanka T., 2007. Numeryczny model przepływu wód podziemnych do potrzeb odwodnienia wykopu stacji Rondo Daszyńskiego drugiej linii metra w Warszawie. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4: 232–239.
- Wolski W. i inni, 2003. Dokumentacja geologiczno-inżynierska i hydrogeologiczna dla II linii metra w Warszawie. Stacja „Rondo Daszyńskiego”. Konsorcjum „GEOTEKO – SGGW – GEOPROJEKT”, Warszawa.
- Wolski W. i inni, 2004. Zbiorcza dokumentacja hydrogeologiczna dla odcinka śródmiejskiego: stacja „Rondo Daszyńskiego” – stacja „Dworzec Wileński”. Konsorcjum „GEOTEKO – SGGW – GEOPROJEKT”, Warszawa.
- Yeh G.T., 1987. 3-D FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model of water flow through saturated-unsaturated media. PSU Technical Report. Department of Civil Engineering. The Pennsylvania State University, University Park, PA, Pennsylvania.

NUMERICAL MODELLING OF CUT-OFF WALLS EFFECTIVENESS AS VERTICAL BARRIER DURING THE DEEP PIT EXCAVATION DEWATERING

Abstract. The influence of cut-off wall depth on dewatering process of deep pit excavation, pored to the high discharged aquifer, located in urbanized metropolitan area, is presented in the paper. The simulation was performed for designed “Rondo Daszyńskiego” Station of the second line of Warsaw Subway. The most unfavorable hydrogeological conditions were found nearby this Station. The considered project of the station construction assumes dewatering with depression wells inside area protected by cut-off walls to the depth of 10 m below bottom of pit excavation. Cut-off walls will create also vertical barrier surrounding the pit excavation. FEMWATER numerical program was used for simulation of the excavation dewatering and underground waters flow. In spite of the fact that different variants of cut-off walls depth were taken into account, flow prediction results in large discharge capacity and high depression of groundwater level. That can be danger for underground water volume and finally it causes buildings subsoil settlement. The disadvantage influence of excavation dewatering on trees plant growing on surrounding area can be also analyzed. Predicted results can make consider the decision of the station construction with the use of horizontal injection barrier in the zone surrounded with cut-off walls.

Key words: numerical modeling, groundwaters flow, cut-off walls, deep pit dewatering

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 2.03.2010