

ZASTOSOWANIE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO PRZY PROJEKTOWANIU ODWODNIEŃ WYKOPÓW METRA NA PRZYKŁADZIE WYKOPU STACJI A-10

UKD 556.33.072 :625.42:624.191.9(438.111)

WARUNKI GEOLOGICZNE I HYDROGEOLOGICZNE WYKOPU STACJI A-10

Przy projektowaniu i wykonywaniu głębokich wykopów metra pojawia się ważny problem zabezpieczenia otoczenia przed skutkami robót odwadniających w czasie budowy. Głębokie obniżenie zwierciadła wód (ponad 10 m) oraz długotrwałość procesu (2–3 lata) powodują, że negatywne skutki odwodnienia obejmować mogą nie tylko bezpośrednie otoczenie wykopu, ale też strefę znacznie szerszą. Najważniejsze skutki negatywne to: zmiany warunków posadowienia istniejących obiektów budowlanych oraz zmiany warunków wegetacji roślin zagrażające istnieniu miejskich zespołów zieleni. Projektowanie zabezpieczeń przed tymi zagrożeniami wymaga wykonania na etapie przedprojektowym szczegółowych badań hydrogeologicznych oraz sporządzenia prognoz zmian reżimu wód podziemnych dla różnych wariantów przebiegu odwodnienia i zabezpieczeń. Do prognozowania najskuteczniejsza jest obecnie technika badań modelowych. Stworzony model oprócz przedstawienia prognozy różnych wariantów przebiegu odwodnienia potrzebnych na etapie projektowania może też być wykorzystany na etapie realizacji samego odwodnienia, jako narzędzie optymalnego nim sterowania. W niniejszym artykule przedstawione zostaną wyniki badań modelowych, wykonanych w fazie przedprojektowej odwodnienia wykopu stacji A-10, zlokalizowanej w Al. Niepodległości pomiędzy ulicami Rakowiecką i Batorego. Odwodnienie tego wykopu zagraża zespołowi zieleni, znajdującemu się na zachodnim obrzeżeniu alei. Najbliżej ściany wykopu są dęby – pomniki przyrody, odległe o ok. 25 m. Duży zespół zieleni zwany „Arboretum” znajduje się w odległości ponad 50 m od ściany wykopu.

Badania modelowe wykonane zostały w Zakładzie Geofizyki Geologicznej UW na zlecenie „Metroprojektu” przez zespół w składzie: doc. dr hab. J. Szymanko, mgr mgr K. Nowicki, W. Poliszot, E. Kuźniar, W. Opęchowski, J. Zajdel. Model wykonano techniką cyfrową na komputerze IBM PC XT. Badania zakończono wiosną 1986 r.

Wykop zaprojektowany do głębokości ok. 10 m ppt. rozcinać będzie osady zlodowacenia środkowopolskiego, których część stropową stanowi kompleks mułków, piasków i glin zwałowych. Część środkową tworzy ciągła warstwa piasków drobno- i średnioziarnistych. Część dolną tworzy kompleks szarych glin zwałowych z soczewami mułków i drobnych piasków. W obrębie tych osadów stwierdzono dwa zwierciadła wód różniące się nieco poziomami stabilizacji. Główne – nieciągłe pojawia się w soczewach osadów wodoprzepuszczalnych górnego kompleksu. Dolne związane jest z warstwą piasków, w której formuje się główny poziom wodonośny na tym terenie. Obecnie zwierciadło dolne, naporowo-swobodne jest lekko nachylone w kierunku ul. Puławskiej i w tym to kierunku odpływają z warstwy piasków wody podziemne. Można z dużym prawdopodobieństwem przyjmować, że w głównym kompleksie przepływy poziome wód podziemnych mają tylko lokalny charakter i że kompleks taki, jako całość należy uważać za warstwę słaboprzepuszczalną o zdolnościach retencjonowania wód, drenowaną na skutek przesączeń pionowych przez podścielający poziom wodonośny.

O warunkach wegetacji roślinnej w opisanym układzie decyduje przede wszystkim wilgotność kompleksu przykrywającego, która jest funkcją trzech czynników: efektywnego zasilania opadami atmosferycznymi, drenażu przez podścielający poziom wodonośny oraz zdolności magazynowania i odsączania się wód z kompleksu przykrywającego. Dokonując operacji odwodnienia wykopu poprzez obniżenie zwierciadła wody poziomu wodonośnego (np. zczerpując wodę z jego dna albo pompując galerie studni odwadniających) bezpośrednio zmieniamy tylko drugi z tych czynników. Odwodnienie kompleksu przykrywającego jest pro-

gdzie:

- m' – miąższość warstwy słaboprzepuszczalnej
- k' – współczynnik wodoprzepuszczalności pionowej tej warstwy.

Równanie stanu takiego elementu określono w następującej postaci:

$$q_e(t) = \mu' \frac{dHd}{dt} - \frac{1}{a} \frac{dq_e}{dt} - q_i(t) \quad [3]$$

Równanie to wraz z równaniem [1] stanowiło podstawę budowy sieciowego modelu matematycznego. Model ten rozwiązywano metodą różnic skończonych na zmiennej siatce prostokątnej, przy użyciu programu ARPR wchodzącego w skład biblioteki HYDRYLIB (ryc. 4). Krok siatki wynosił: w sieci podstawowej 20×20 m i w sieci zagęszczonej 10×10 m. Na brzegach modelu zastosowano sieć rozrzedzoną 40 i 60 m. Całkowita powierzchnia modelu wyniosła $0,3 \text{ km}^2$, a liczba bloków obliczeniowych – 1401. Rozwiązywano układ równań o następującej postaci:

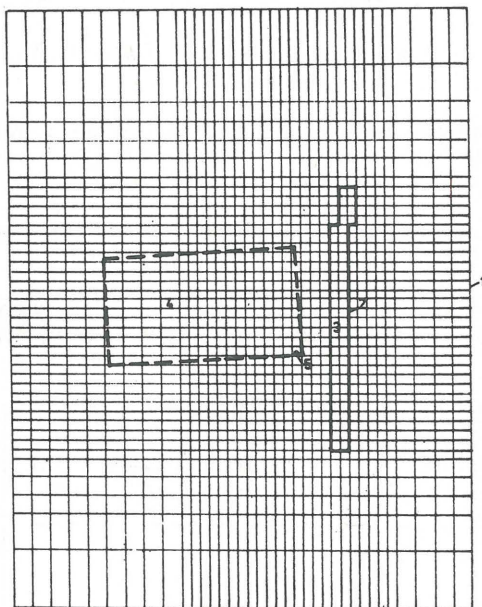
$$T Hd = \beta \frac{\partial Hd}{\partial t} + q_e \quad [4]$$

gdzie:

- T – macierz przewodnictw (pięciodiagonalna)
- β – macierz diagonalna pojemności
- $\frac{\partial Hd}{\partial t}$ – wektor zmian położenia zwierciadła wody
- q_e – wektor zasilania
- Hd – wektor stanów zwierciadła wody.

Ten układ równań rozwiązywany jest implícite względem Hd i explicitie względem q_e ; q_e obliczane jest w każdym kroku czasowym implícite z równania [3]. Jako danych do obliczeń program wymaga wprowadzenia tablic:

- współczynnika wodoprzepuszczalności warstwy wodonośnej – k



Ryc. 4. Podział modelu na bloki obliczeniowe

- 1 – warunek brzegowy trzeciego rodzaju, 2 – warunek brzegowy pierwszego rodzaju, 3 – wykop stacji A-10, 4 – Arboretum, 5 – dąb

Fig. 4. Division of the model on analytical blocks

- 1 – boundary condition of the 3rd type, 2 – boundary condition of the 1st type, 3 – the A-10 station excavation, 4 – Arboretum, 5 – oak

- rzędnych położenia spągu warstwy wodonośnej – z_s
- współczynnika opóźnienia $1/a$
- współczynnika pojemności
- zasilania wodami infiltrującymi – q_i
- informacyjnej z określonymi parametrami warunków brzegowych – inf
- początkowego położenia zwierciadła wody – Hd .

Jako bezpośredni wynik obliczeń uzyskuje się tablice zwierciadła wody Hd warstwy wodonośnej dla różnych czasów symulacji. Jako wynik pośredni uzyskuje się tablice przepływów wód w blokach oraz bilans przepływów wód w obszarze.

W przyjętym modelu nie jest obliczany bezpośrednio stan zwierciadła wód w przykrywającej warstwie słaboprzepuszczalnej, której obecność w modelu „reprezentują” tylko parametry: współczynnik opóźnienia $1/a$ i współczynnik pojemności grawitacyjnej μ' . Dla obliczenia tego stanu przyjęto następujące założenia:

- warstwa słaboprzepuszczalna zachowuje się tak jak zbiornik liniowy, w którym formuje się zwierciadło wód oznaczone jako Hg ;
- chwilowe położenie tego zwierciadła jest funkcją różnicy wydatków „wejściowego” strumienia zasilającego q_i i „wyjściowego” strumienia q_e wód spływających do warstwy wodonośnej oraz pojemności wodnej warstwy, której miarą jest współczynnik pojemności grawitacyjnej μ' ; w postaci równania założenia te można zapisać następująco:

$$q_i - q_e = \mu' \frac{dHg}{dt} \quad [5]$$

Stosując schemat explicitie w każdym kroku czasowym można, znając wielkość q_e , obliczyć stan zwierciadła wód warstwy słaboprzepuszczalnej Hg .

$$Hg^i = Hg^{i-1} + \frac{\Delta t}{\mu'} (q_i^i - q_e^i) \quad [6]$$

gdzie:

- Hg^i – stan zwierciadła wód w warstwie słaboprzepuszczalnej w i -tym kroku
- Hg^{i-1} – stan zwierciadła wód w warstwie słaboprzepuszczalnej w $i - 1$ kroku.

W programie ARPR obliczenia takie wykonuje się na końcu każdego kroku czasowego dla każdego bloku obliczeniowego.

Ze względu na duże uproszczenie przyjętych założeń opisu zachowania się warstwy słaboprzepuszczalnej w procesie filtracji wód, wykonane w opisany wyżej sposób, obliczenie położenia zwierciadła Hg należy traktować tylko jako szacunkowe, wskazujące w jakim kierunku przebiega proces odwadniania się tej warstwy. Samo zaś pojęcie zwierciadła Hg należy traktować jako umowne mające pewien związek z powierzchnią dolną strefy wzniosów kapilarnych.

PRZEBIEG BADAŃ MODELOWYCH

Badania wykonano w dwóch etapach: tarowanie modelu oraz symulacje różnych rozwiązań technicznych odwodnienia wykopu.

Tarowanie modelu. Jest to najważniejsza czynność przy tworzeniu modelu, od przebiegu której zależy jego wiarygodność. Model rejonu wykopu stacji A-10 tarowano wykorzystując dwie główne obserwacje: przebieg krzywych opadania zwierciadła wody zaobserwowanego w czasie

pompowania hydrowężła na Polu Mokotowskim oraz powierzchnię średnich stawów zwierciadła wód. Zmianami przy tarowaniu były przede wszystkim: współczynnik opóźnień $1/a$ oraz przewodność warstwy wodonośnej. Ze względu na stosunkowo niewielki zasięg oddziaływania wkopu i znaczne oddalenie brzegów modelu, warunki brzegowe nie były w istotny sposób zmieniane na modelu. Przyjęto je na całym brzegu w postaci warunku 3-ciego rodzaju. Odtwarzając przebieg próbnego pompowania stwierdzono, że uzyskuje się na modelu krzywe opadania mniej więcej zgodne z obserwowanymi, przyjmując:

- przewodności warstwy wodonośnej w granicach $0,6 - 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$;
- współczynnik pojemności sprężystej w granicach $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$;
- współczynnik pojemności grawitacyjnej warstwy słaboprzepuszczalnej w granicach $0,1 - 0,07$;
- współczynnik opóźnień (inercji) w granicach $800 - 5000 \text{ h}$.

Przyjmując te wielkości jako graniczne, model dotarowano zmieniając głównie przewodność w taki sposób, by uzyskana powierzchnia stanów średnich zwierciadła wód była mniej więcej zgodna z obserwowaną. Nie w całości modelu było to jednak możliwe, a to ze względu na brak wiarygodnych obserwacji stanu zwierciadła wód szczególnie na obszarach nie bezpośrednio przylegających do trasy metra.

Symulacje na modelu. Dysponując wytarowanym modelem zasymulowano na nim obecność wkopu ustalając na rzędnej odpowiadającej rzędnej jego docelowego dna warunek 1-go rodzaju (w realizowanym modelu szerokość bloku odpowiada rzeczywistej szerokości wkopu). Przeprowadzono trzy dwuletnie symulacje różnych przebiegów odwodnienia przy identycznym przebiegu zasilania wodami atmosferycznymi (tab.).

Czas w godz.	q_{inf} w $\text{m}^3/\text{h}/1 \text{ m}^2$ pow. terenu	opad w $\text{mm}/\text{tydzień}$
0 – 700	—	—
700 – 1000	$1,5 \times 10^{-5}$	25
1000 – 1200	—	—
1200 – 1400	$1,9 \times 10^{-5}$	30
1400 – 1600	—	—
1600 – 2016	$1,5 \times 10^{-5}$	25
2016 – 2328	—	—
2328 – 2688	$1,5 \times 10^{-5}$	25
2688 – 3360	—	—
3360 – 3528	$1,9 \times 10^{-5}$	30
3528 – 4032	—	—
4032 – 4200	$1,9 \times 10^{-5}$	30
4200 – 4368	—	—
4368 – 5376	$1,5 \times 10^{-5}$	25
5376 – 6048	—	—
6048 – 7000	$1,5 \times 10^{-5}$	25
7000 – 7500	—	—
7500 – 8000	$1,5 \times 10^{-5}$	25
8000 – 8500	—	—
8500 – 8700	$1,5 \times 10^{-5}$	25
8700 – 9000	—	—
9000 – 9700	$1,5 \times 10^{-5}$	25
9700 – 10000	—	—
10000 – 10700	$1,5 \times 10^{-5}$	25
10700 – 11400	—	—
11400 – 12000	$1,5 \times 10^{-5}$	25
12000 – 12350	—	—
12350 – 13000	$1,5 \times 10^{-5}$	25
13000 – 14400	—	—
14400 – 14700	$1,5 \times 10^{-5}$	25
14700 – 15100	—	—
15100 – 15800	$1,5 \times 10^{-5}$	25
15800 – 16300	—	—
16300 – 17000	$1,5 \times 10^{-5}$	35

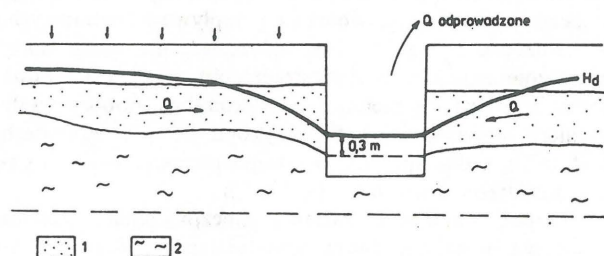
Razem $1261 \text{ mm}/2 \text{ lata}$

Symulacja 1. Przeprowadzono ją przy założeniu swobodnego dopływu wody do wykopu (ryc. 5). Stwierdzono, że:

- zasięg oddziaływania odwodnienia głównej warstwy wodonośnej znacznie „wyprzedza” zasięg odwodniania się przykrywającej warstwy słaboprzepuszczalnej; po 2,5 miesiącach nie stwierdzono w tej ostatniej istotnych zmian zagrażających wegetacji roślinnej;
- wpływ odwodnienia, który może być groźny dla kompleksów zieleni zaznacza się dopiero po ok. 1 roku trwania odwodnienia;
- średnie dopływy do wykopu są nieznaczne i mieszczą się w granicach $7 - 4 \text{ m}^3/\text{h}$;
- odwodnienie warstwy słaboprzepuszczalnej może ulec zintensyfikowaniu w czasie długotrwałych okresów suchych.

Symulacja 2. Przeprowadzono ją przy założeniu częściowego ograniczenia dopływu wody do wykopu od strony parku, uzyskanego przez zbudowanie zapory iniekccyjnej (ryc. 6). Stwierdzono, że:

- zapora taka może skutecznie zapobiec rozprzestrzenianiu się leja na teren parku;
- przy jej istnieniu pojawi się jednak problem piętrzenia się wód podziemnych, nawet ewentualnych podpiętrzeń w rejonie parku;
- ze względu na to niebezpieczeństwo dla wegetacji roślinnej istnieje konieczność wybudowania na zapleczu zapory galerii studni odwadniających, wyrównującej stan zwierciadła; taka galeria musiałaby być czynna przez cały czas funkcjonowania zapory;

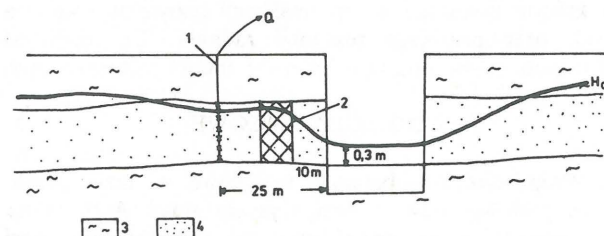


Ryc. 5. Schemat swobodnego dopływu wody do wykopu

1 – warstwa wodonośna, 2 – warstwa słaboprzepuszczalna

Fig. 5. Diagram of free water inflow into the excavation

1 – water bearing layer, 2 – slightly permeable layer

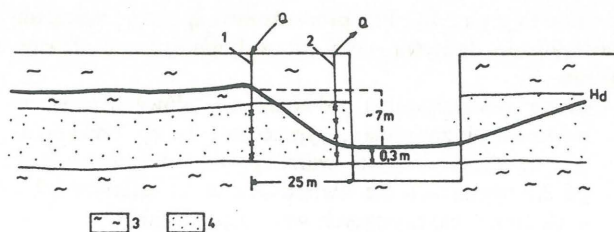


Ryc. 6. Schemat częściowego ograniczenia dopływu wody do wykopu poprzez zbudowanie zapory iniekccyjnej

1 – galeria odwadniająca, 2 – przesłona iniekccyjna, 3 – warstwa słaboprzepuszczalna, 4 – warstwa wodonośna

Fig. 6. Diagram of partly limited water inflow into the excavation by construction of on injection dam.

1 – dewatering gallery, 2 – injection cut-off wall, 3 – slightly permeable layer, 4 – waterbearing layer



Ryc. 7. Schemat bariery hydrodynamicznej

1 – studnie zasilające, 2 – studnie odwadniające, 3 – warstwa słaboprzepuszczalna, 4 – warstwa wodonośna

Fig. 7. Diagram of hydrodynamic barrier

1 – intake well, 2 – absorbing well, 3 – slightly permeable layer, 4 – waterbearing layer

– przeprowadzona symulacja obecności zapory + wyrównująca galeria studni odwadniających potwierdziła skuteczność takiego zabezpieczenia; pojawia się jednak problem techniczny skutecznej likwidacji zapory iniekcyjnej po zakończeniu robót w wykopie.

Symulacja 3. Przeprowadzono ją zakładając istnienie tzw. bariery hydrodynamicznej od strony parku. Bariera ta składa się z dwóch galerii studni (igłofiltrów), wewnętrznej – usytuowanej 5 m od ściany wykopu, czerpiącej wodę i zewnętrznej – przez którą zatłaczana jest woda tak, by zwierciadło utrzymywało się na stałym poziomie (ryc. 7). Odległość pomiędzy galeriami przyjęto 25 m. Przy tej odległości spadki hydrauliczne pomiędzy galeriami są mniejsze od spadku krytycznego i nie istnieje niebezpieczeństwo pojawienia się przepływów nieliniowych. Stwierdzono, że ten wariant zabezpieczenia może także skutecznie zapobiec rozprzestrzenianiu się leja na rejon parku i że jest on technicznie wykonalny. Pobory wody z galerii wewnętrznej i dna wykopu będą w granicach 6–8 m³/h, a dla utrzymania stałego poziomu wody w galerii zasilającej potrzeba 1,5–2 m³/h.

Rozpatrywane dwa warianty zabezpieczenia: „zapora iniekcyjna + galeria studni odwadniających” oraz „bariera hydrodynamiczna” wymagają przy ich realizacji prowadzenia odwodnienia w sposób w pełni kontrolowany. Odwadniany wykop staje się w tym przypadku obiektem sterowanym, w którym to sterowaniu realizowana jest funkcja celu w postaci minimalizacji zmian położenia zwierciadła wód na obszarze strzeżonym (park). Odwodnienie wykopu jest więc zadaniem optymalnego sterowania, w którym dokonuje się optymalizacji rozwiązań technicznych oraz przebiegu realizacji zadania. Dla realizacji obu tych celów podstawę stanowi model matematyczny.

UWAGI KOŃCOWE

1. Przeprowadzone badania modelowe w fazie przedprojektowej odwodnienia wykopu stacji A-10 metra wykazały pełną przydatność tej techniki badawczej przy rozwiązywaniu tego typu zadań. Praktycznie nie ist-

nieją inne metody, które mogłyby dostarczyć równorzędnych wyników przy istniejącej komplikacji warunków hydrogeologicznych.

2. Przeprowadzenie badań modelowych wymaga jednak zmian sposobu projektowania badań hydrogeologicznych dla obiektów metra. Badania te nie mogą ograniczać się do wąskiego pasa trasy metra, ponadto w większym niż dotychczas zakresie powinny być wykonywane badania hydrowęzłowe. Te ostatnie będąc badaniami dynamicznych charakterystyk systemu wodonośnego dostarczają głównych informacji umożliwiających budowę wiarygodnego modelu.
3. Istnieją pełne możliwości wykorzystania modeli zbudowanych w fazie przedprojektowej do optymalnego sterowania przebiegiem odwodnienia.

LITERATURA

1. Boulton N. S. – Analysis of data from nonequilibrium pumping test allowing for delayed yield from storage. Proc. Inst. Civil Engrs. 1963 vol. 26.
2. Metroprojekt – Obserwacje zwierciadła wód gruntowych i opracowanie wyników obserwacji dla I linii metra za 1984 r. Arch. Metroprojektu.
3. Paczyński B., Perek M. – Warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne na trasie pierwszej linii metra w Warszawie. Mat. „Metro a środowisko przyrodnicze”. Gener. Dyr. Bud. Metra 1986.
4. Szymanko J. – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geol. 1980.

SUMMARY

Construction of deep underground railway excavations and drainage operations make risk to the surrounding buildings and greens complexes. The paper presents results of modelling research carried out in a predesigning phase of the A-10 station drainage operations. Alternative designs of protection the greens complex lying in a 25 m distance from the wall of the excavation are analysed. There were following designs: „injection barrier” and „hydrodynamic barrier”. Remarkable usefulness of modelling research in designing the deep excavation drainage is stated.

РЕЗЮМЕ

Постройка глубоких выемок метро и проводимые осушительные работы угрожают находящимся вблизи зданиям и городским зелёным зонам. В статье описаны результаты модельных исследований проведенных в допроектной фазе осушения выемки станции A-10. Проведен анализ вариантов предохранения зелёных зон находящихся ок. 25 м от стены выемки. Это были варианты: „инъекционного барьера” и „гидродинамического барьера”. Определена большая пригодность модельных исследований для проектирования осушения глубоких выемок.