

WYKORZYSTANIE NUMERYCZNEGO MODELU FILTRACJI W OCENIE WPŁYWU ROBÓT INŻYNIERSKICH NA WODY PODZIEMNE NA PRZYKŁADZIE BUDOWY PODZIEMNEGO PARKINGU W CENTRUM WARSZAWY

THE USE OF NUMERICAL FLOW MODEL FOR EVALUATION OF GEOENGINEERING INVESTMENTS IMPACT ON GROUNDWATER ILLUSTRATED ON THE EXAMPLE OF AN UNDERGROUND PARKING GARAGE IN CENTRAL WARSAW

JACEK GURWIN¹, MIROSLAW WĄSIK¹

Abstrakt. Badania modelowe przeprowadzono w celu określenia lokalnego systemu krążenia wód podziemnych, składników bilansu wodnego oraz potencjalnego oddziaływania na wody podziemne w rejonie budowy wielopoziomowego parkingu podziemnego przy ul. E. Plater w Warszawie. Inwestycja została zaplanowana wzdłuż dwujezdniowej ulicy pomiędzy skrzyżowaniami z Al. Jerozolimskimi na południu i ul. Świętokrzyską na północy. W analizie krążenia wód podziemnych wykorzystano program MODFLOW w konfiguracji GMS 6.0. Po kalibracji modelu dla warunków naturalnych, według stanu z 2008 r., przeprowadzono symulację dla przewidywanych trzech wariantów lokalizacji inwestycji. Po wykonaniu obliczeń wykazano, że prace budowlane i odwodnieniowe, w istniejących warunkach hydrodynamicznych, nie będą miały wpływu na użytkowy poziom wodonośny. Przy głębszym (III) wariantcie posadowienia możliwe jest przesączenie przez dno jedynie niewielkich ilości wód podziemnych.

Słowa kluczowe: numeryczny model filtracji, MODFLOW/MODPATH, budowa podziemnego parkingu, Warszawa.

Abstract. The investigations were conducted to establish a flow system, groundwater balance and potential influence within the area of underground parking which is likely to be constructed in the centre of Warsaw along the E. Plater Street between Jerozolimskie Av. and Świętokrzyska Street. The MODFLOW package in configuration of the GMS. 6.0 environment was used to develop a local model of the site. After model calibration for natural conditions, the simulations were done for the projected variants of parking location and its different depths. When simulating the options with the depth of 8 m, it was obvious that there is no influence due to an equal level of pressure between the pit and the aquifer. After the simulations for the depth of 11 m, it was evidenced that the groundwater surface was changed and a seepage process from the bottom began.

Key words: numerical groundwater modelling, MODFLOW/MODPATH, parking construction, Warsaw.

WSTĘP

W ramach zadań związanych z dokumentacją projektową dla przebudowy ul. Emilii Plater w Warszawie, wykonano numeryczny model warunków hydrogeologicznych, na podstawie którego określono potencjalny wpływ realizacji

robót i usytuowania wielopoziomowego parkingu na warunki hydrodynamiczne wód podziemnych czwartorzędowego poziomu wodonośnego (Gurwin, Wąsik, 2008).

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-205 Wrocław; e-mail: jacek.gurwin@ing.uni.wroc.pl, mirosław.wasik@ing.uni.wroc.pl

Autorzy zastosowali numeryczny model filtracji, który w przypadku zagadnień hydrotechnicznych i geoinżynierskich daje możliwość przestrzennej interpretacji wpływu projektowanych obiektów na wody podziemne, pod względem ilościowym oraz jakościowym. Przy tej skali modelu zwykle dysponuje się rozpoznaniem w rejonie samej budowli, które następnie zostaje uzupełnione danymi z rozpoznania regionalnego, zgromadzonymi dla innych celów.

Dokonano wyboru optymalnych narzędzi numerycznych – wykorzystano oprogramowanie oparte na modułach MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988), zintegrowane z systemem GIS.

W artykule przedstawiono: sposób odwzorowania układu hydrostrukturalnego za pomocą dyskretyzacji metodą różnic skończonych (Anderson, Woessner, 1992), przyjęte warunki brzegowe oraz strukturę modelu konceptualnego i numerycznego. Prognoza numeryczna miała na celu sprawdzenie obliczeń analitycznych oraz pomoc w wyborze sposobu przeprowadzenia prac odwodnieniowych w trakcie budowy, przy zakładanych przez inwestora wariantach wykonania i posadowienia inwestycji.

Projektowany parking podziemny zlokalizowany będzie na terenie Warszawy, w dzielnicy Śródmieście, w istnie-

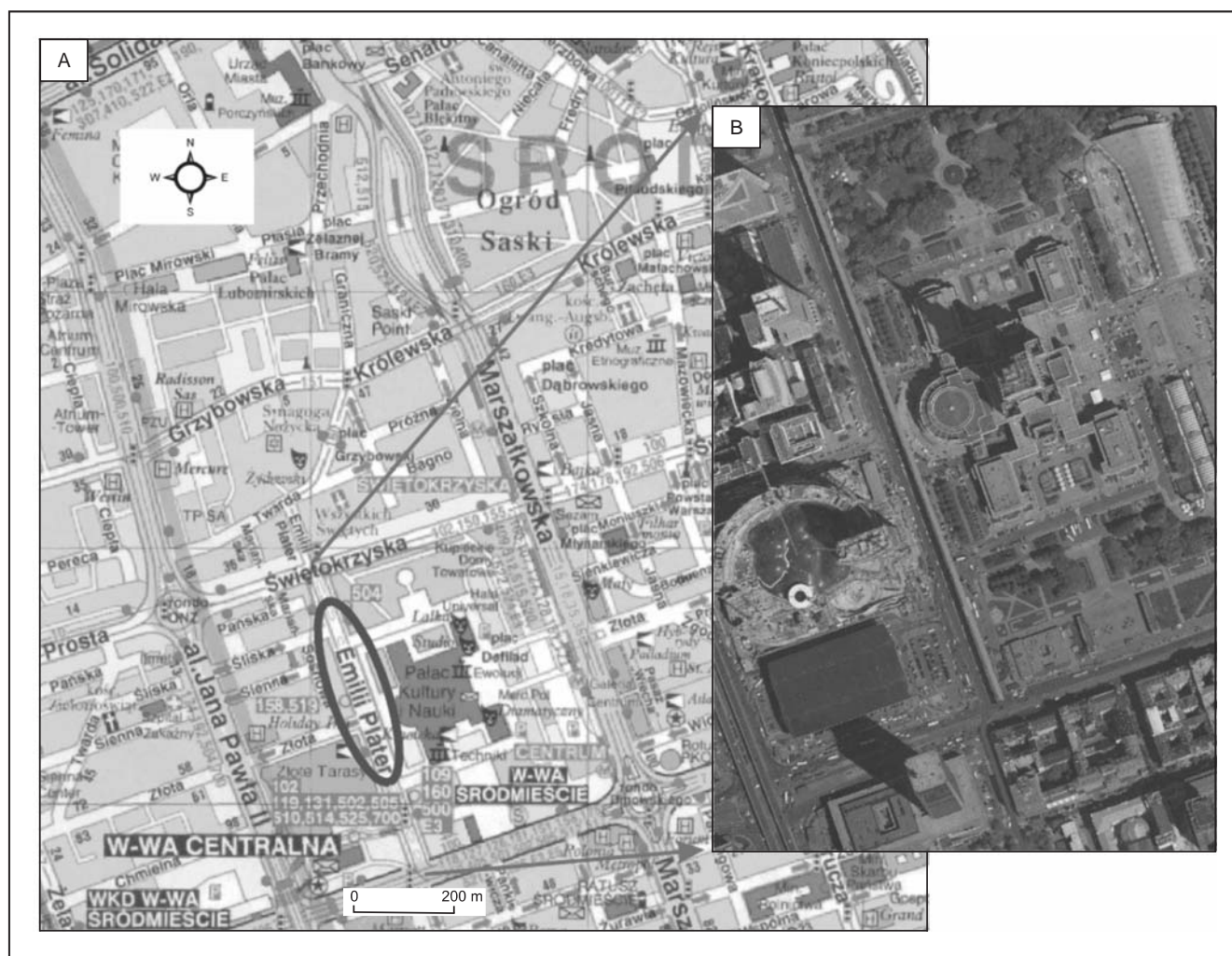


Fig. 1. Lokalizacja planowanej inwestycji

A – lokalizacja obszaru na planie miasta; B – satelitarny obraz rejonu inwestycji

Localization of the planned investment

A – location of the investment on the city map; B – satellite image of the area

jącym pasie ulicy E. Plater, pomiędzy ul. Świętokrzyską a południowym wjazdem na parking PKiN (fig. 1).

Teren planowanej inwestycji położony jest po zachodniej stronie Doliny Środkowej Wisły, w obrębie Równiny Warszawskiej, będącej częścią Niziny Środkowomazowieckiej (Kondracki, 1998). Stanowi ją zdenudowana powierzchnia akumulacji lodowcowej, o rzędnych w granicach około

114–117 m n.p.m., opadająca ku dolinie Wisły skarpą o wysokości 20–30 m.

W rejonie planowanej inwestycji nie ma żadnych cieków wodnych. Teren jest uzbrojony w kanalizację sanitarno-burzową. Roboty inżynierskie będą prowadzone w osadach czwartorzędowych, maksymalnie do głębokości 11 m p.p.t.

OPIS WARUNKÓW NATURALNYCH

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Osady pliocenские o miąższości ponad 100 m wykształcone są w postaci ilów, ilów pylastych, mułków ilastych z przewarstwieniami i soczewkami piasków drobnoziarnistych i pylastych, niebieskich i pstrych. Występują one na terenie prawie całej Warszawy. Strop osadów pliocenu jest bardzo nierówny, z charakterystycznymi kulminacjami i obniżeniami, będącymi efektem procesów glacytektonicznych. Najbliżej badanego obszaru położona jest elewacja śródmiejska, obejmująca m.in. rejon skrzyżowania Al. Jerozolimskich i ul. Marszałkowskiej oraz fragmenty ul. Świętokrzyskiej i ul. Królewskiej, o stropie wyniesionym do rzędnych 100–113 m n.p.m. W analizowanym rejonie osady pliocenu zostały nawiercone w przedziale głębokości od 40,80 do 55,00 m p.p.t.

Plejstocen reprezentowany jest przez osady preglacjalne oraz utwory wykształcone w okresach glacjałów i interglacjałów. Osady preglacjalne występują bezpośrednio na stropie osadów neogeńskich. Ich miąższość wynosi od jednego do kilkudziesięciu metrów. Pod względem litologicznym są to: piaski kwarcowe, różnoziarniste, ze żwirem, często z kilkucentymetrowymi kawałkami drewna, piaski średnioziarniste, mułki, gliny piaszczyste oraz stwierdzona w rejonie badanego obszaru 0,80 m warstwa piasków gruboziarnistych, szarych.

Bezpośrednio na osadach peryglacjalnych leżą osady interglacjału mazowieckiego, wykształcone w postaci piasków gruboziarnistych ze żwirem, średnio- i drobnoziarnistych. Największe miąższości – do ponad 50 m osady te osiągają w dolinie Wisły. Utwory interglacjalne kończy seria glin zwałowych (mułków glinopodobnych). Gliny te nie tworzą jednolitego poziomu, występują nieregularnie, a ich miąższość nie przekracza 3 m. Warstwa ta pochodzi najprawdopodobniej z transgresji lądolodu zlodowacenia odry.

Osady zlodowacenia odry na wysoczyźnie zaczynają się serią piasków wodnolodowcowych, drobno- i średnioziarnistych, ze żwirem. Ich miąższość wynosi od kilku do kilkunastu metrów (na analizowanym terenie około 10 m). Utwory te przykrywa glina lodowcowa o miąższości od kilku do kilkunastu metrów, tworząca w rejonie Warszawy ciągły poziom. Na analizowanym terenie w części stropowej osadów wodnolodowcowych stwierdzono wkładki gliny oraz piasków.

Zlodowacenie warty jest reprezentowane przez osady facji wodnolodowcowej (gliny pylaste, piaski gliniaste, mułki, pyły do ilów warwowych) oraz facji rzecznej (piaski różnoziarniste, przeważnie drobno- i średnioziarniste). W stropie osadów tego zlodowacenia występuje fragmentarycznie zachowana, charakteryzująca się zmienną miąższością glina lodowcowa. Jest ona silnie zapiaszczona, zawiera niewielką ilość materiału grubszego. W stropie jest zwietrzała i odwapniona.

Najmłodsze w profilu utwory holocenu to warstwa nasypów antropogenicznych, która może osiągać miąższości do ponad 5 m, zbudowana jest z mieszaniny gruntów rodzimych oraz pochodzenia antropogenicznego (gruz, cegły, śmieci itp.).

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Warunki hydrogeologiczne scharakteryzowano na podstawie otworów badawczych (o głębokości do 30 m), wykonanych w trakcie realizacji inwestycji Złota Centrum (Dokumentacja..., 2000a), Hotel Centrum 2000 (Dokumentacja..., 2001), a także na podstawie badań z czterech otworów wiertniczych (o głębokości do 25 m), wykonanych w ramach projektowanego parkingu podziemnego.

W obrębie piętra plejstocenkiego stwierdzono występowanie dwóch głównych poziomów wodonośnych, mających zasadniczy wpływ na posadowienie projektowanych w tym rejonie inwestycji (fig. 2).

Pierwszy poziom wodonośny występuje w osadach wodnolodowcowych zlodowacenia warty i odry, na głębokości od około 5 do 9 m p.p.t. Tworzą go osady piaszczyste, występujące w postaci przewarstwień w glinach lodowcowych, o współczynniku filtracji około $3 \cdot 10^{-6}$ m/s. Pierwszy poziom wodonośny charakteryzuje się przeważnie swobodnym zwierciadłem wód podziemnych, lokalnie naporowym, występującym na głębokości od około 2 do 8 m p.p.t. Miąższość poziomu wodonośnego nie przekracza zwykle 5 m, a często wynosi poniżej 1 m. Zasilanie tego poziomu odbywa się na drodze infiltracji wód opadowych, mocno ograniczonej w warunkach panujących w rejonie projektowanego parkingu z powodu pokrycia powierzchni terenu asfaltem i betonem. Pierwszy poziom wodonośny nie wykazuje

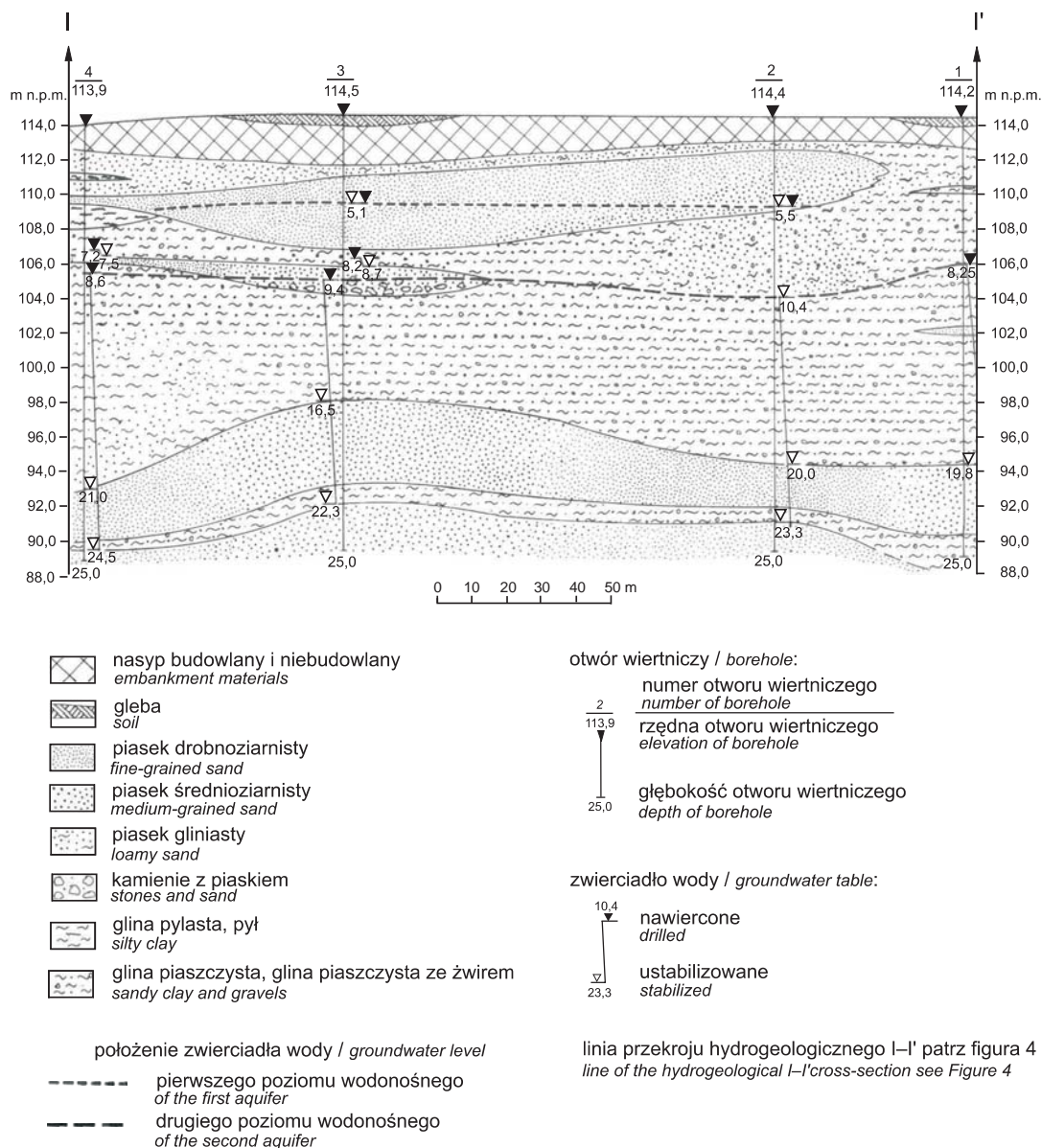


Fig. 2. Przekrój hydrogeologiczny I-I' wzdłuż ul. E. Plater w Warszawie

Hydrogeological cross-section I-I' along E. Plater Street in Warsaw

je istotnych wahań i utrzymuje się mniej więcej na tym samym poziomie, jedynie w okresach wzmożonych opadów, na skutek infiltracji wód opadowych, ma tendencję do podnoszenia się. Prowadzone przez trzy miesiące obserwacje wykazały, że poziom wody utrzymywał się na stałym poziomie nawet po opadach. Pierwszy poziom wodonośny nie jest zasobny w wodę.

Drugi poziom wodonośny występuje w obrębie piasków starszych od zlodowacenia odry i młodszych od pliocenu. Jest to główny użytkowy poziom wodonośny w rejonie Warszawy. Jest on izolowany od pierwszego poziomu wodonośnego

warstwą glin lodowcowych o miąższości od około 7 do ponad 20 m (fig. 2). Pod względem litologicznym są to gliny piaszczyste i piaski gliniaste. Strop drugiego poziomu wodonośnego występuje na głębokości od 13,3 do 27,6 m p.p.t. Tworzą go zawodnione piaski peryglacialne o miąższości około 20 m, piaski fluwialne o miąższości około 10 m oraz piaski wodnolodowcowe o miąższości od kilku do kilkunastu metrów. Charakteryzują się one wartościami współczynnika filtracji rzędu 10^{-5} – 10^{-4} m/s. Lokalnie, w obrębie tego poziomu występuje warstwa glin lodowcowych o niewielkiej miąższości, dzieląca ten poziom na dwie warstwy wodonośne, pozostające

jednak ze sobą w więzi hydraulicznej. Zwierciadło wody tego poziomu ma charakter naporowy – wody występują pod ciśnieniem przeważnie 10–15 m słupa wody. Zwierciadło wody stabilizuje się na głębokości od około 8 do ponad 10 m p.p.t. Ciśnienie wody w tym poziomie wodonośnym w latach 1989–1998 w centrum Warszawy zostało znacznie obniżone w wyniku prowadzonych odwodnień. W ciągu ostatnich dziesięciu lat zaobserwowano jednak podniesienie się zwierciadła wody o około 1,5–3,0 m. Jest to efektem odbudowy zwierciadła regionalnego poziomu piezometrycznego, związanej z likwidacją depresji wytworzonej poprzez liczne odwodnienia prowadzone w centrum Warszawy. Odpływ wód podziemnych

odbywa się w kierunku wschodnim, do doliny Wisły. Zasilanie drugiego poziomu wodonośnego następuje w wyniku infiltracji opadów atmosferycznych w strefach, w których nie występuje pierwszy poziom wodonośny oraz w wyniku przeciekania wód z wyżej leżącego poziomu wodonośnego.

Teren planowanego parkingu leży w obszarze najwyższej ochrony (ONO) Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 215A. Jest to paleogeńsko-neogeński (porowy) zbiornik wodonośny, o średniej głębokości ujęć ponad 180 m. Wody tego zbiornika są w pełni izolowane od wyżej leżących poziomów wodonośnych i od powierzchni terenu (Kleczkowski, red., 1990).

SYMULACJA POLA HYDRODYNAMICZNEGO W REJONIE INWESTYCJI NA NUMERYCZNYM MODELU FILTRACJI

W celu bliższego określenia potencjalnego wpływu inwestycji na wody podziemne wykonano numeryczny model filtracji, na którym odtworzono układ hydrodynamiczny w warunkach quasi-naturalnych, według stanu na 2008 r. Celem modelu było odtworzenie przepływu w użytkowym, czwartorzędowym poziomie wodonośnym, który podlegał w przeszłości intensywnym pracom odwodnieniowym w tym rejonie. Tak jak przewidywano, po zakończeniu tych inwestycji zwierciadło wód podziemnych niemal wróciło do stanu pierwotnego. Potwierdziły to dane z czterech otworów badawczych, wykonanych wzdłuż ul. E. Plater (Projekt..., 2008), w których ustabilizowane zwierciadło kształtuje się średnio na poziomie 105 m n.p.m.

Numeryczną symulację dynamiki wód podziemnych przeprowadzono za pomocą oprogramowania GMS, w którym modułem obliczeniowym jest pracujący w metodzie różnic skończonych MODFLOW (McDonald, Harbaugh 1988). Do obliczeń prędkości, czasu przepływu, i w konsekwencji do wyznaczenia przebiegu linii prądu, zastosowano program MODPATH (Pollock, 1988, 1994), bazujący na teorii modelu przepływu tłokowego.

Do realizacji numerycznego modelu niezbędne były informacje dotyczące wymiarów i głębokości posadowienia projektowanego parkingu. Wzięto pod uwagę trzy warianty jego budowy. Wariant I zakłada głębokość posadowienia parkingu około 11 m oraz jego wymiary 354×10 m, wariant II – głębokość posadowienia parkingu około 11 m oraz jego wymiary 50×440 m i wariant III – głębokość posadowienia parkingu około 8 m oraz jego wymiary 50×470 m.

Granice modelu, a tym samym zewnętrzne warunki brzegowe przyjęto na podstawie rozpoznania pola filtracji w znacznej odległości od samej inwestycji w następujący sposób:

- na wschodzie zgodnie z przebiegiem hydroizohips zadano warunek brzegowy $H = const.$ na odpływie strumienia wód podziemnych;
- na pozostałych granicach wprowadzono warunek brzegowy III rodzaju typu GHB, wynikający z przewodności fil-

tracyjnej bloków i różnicy wysokości hydraulicznej na granicy modelu.

W opracowaniu modeli dla potrzeb inwestycji geotechnicznych i hydrotechnicznych (np. Gurwin, Poprawski, 2001; Gurwin, Ruszkiewicz, 2009) należy przyjmować odpowiednio gęstą siatkę dyskretyzacyjną, aby zwłaszcza w metodzie MRS skutecznie odwzorować kształt planowanych wyrobisk. Z tego względu, siatka dyskretyzacyjna wykonanego modelu ma podstawowe rozmiary bloków obliczeniowych 10×10 m, a w centralnej części została zagęszczona do wymiarów 5×5 m, dając ostatecznie 148 wierszy i 149 kolumn (fig. 3).

Model zawiera pięć warstw numerycznych. Starano się bowiem możliwie dokładnie odtworzyć poziom posadowienia inwestycji. W ten sposób cztery warstwy numeryczne przypisano słabo przepuszczalnym glinom lodowcowym budującym nadkład, w których planowane jest posadowienie fundamentów konstrukcji. Jednocześnie uznano, że dla odwzorowania użytkowego poziomu wodonośnego, będącego pod wpływem odwadniania, wystarczy aproksymacja jedną warstwą modelu. Pomimo, że z punktu widzenia zmienności litologicznej model został w ten sposób uproszczony, jest on w zupełności wystarczający w zakresie obliczeń filtracji wód podziemnych w tym rejonie.

Wykształcenie hydrogeologiczne i parametry filtracji zostały określone na podstawie wyników wierceń archiwalnych i nowych otworów (Dokumentacja..., 2000a, b; Dokumentacja..., 2001; Projekt..., 2008), które wraz z planem sytuacyjnym w skali 1:1000 zestawiono jako materiał podstawowy do prac nad modelem. Zgromadzono dane z 35 archiwalnych otworów, co pozwoliło wykonać mapę spągu słabo przepuszczalnych utworów podłoża oraz mapę stropu użytkowego naporowego poziomu wodonośnego. Dane te zostały następnie wprowadzone do matrycy modelu, jako powierzchnie graniczne warstwy numerycznej.

Po wykonaniu wstępnych obliczeń dla warunków ustalonego przepływu wprowadzono do modelu granice planowanego parkingu (fig. 4), zakładając jego zagłębienie w podłożu maksymalnie na 10–11 m, jak przewidziano w wariantach I i II.

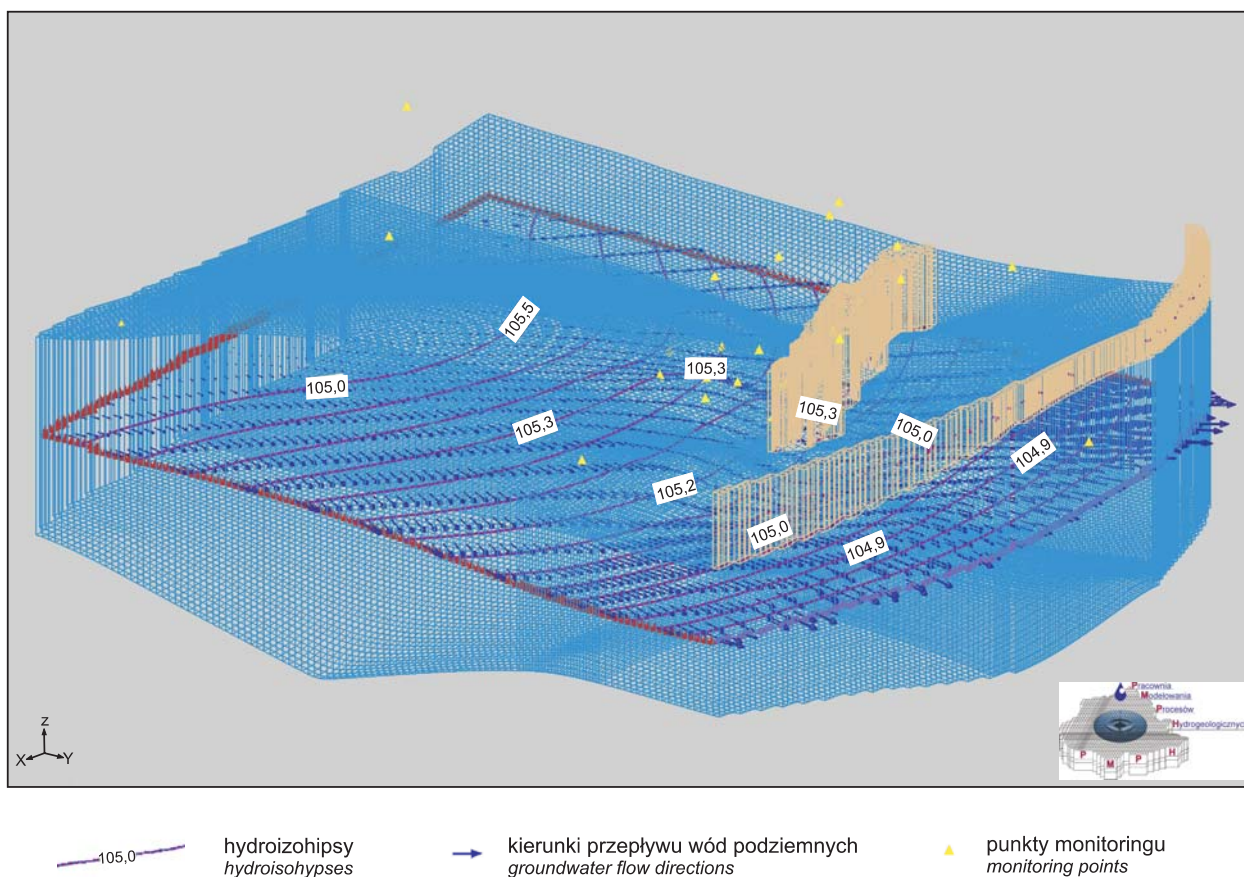


Fig. 3. Widok 3D struktury modelu z wynikami obliczeń przepływu wód podziemnych

The 3D model structure and groundwater flow simulation results

Po ostatecznym ustaleniu warunków brzegowych wykonano symulację, w wyniku której uzyskano siatkę hydrodynamiczną, o kształcie zbliżonym do koncentrycznego, rozbieżnego z głównym kierunkiem przepływu od zachodu ku wschodowi (fig. 5). Symulacje potwierdziły, że aktualna stabilizacja statycznego zwierciadła wód podziemnych jest zbliżona do posadowienia dna parkingu i tym samym nie zachodzi niebezpieczeństwo intensywnego przesączania od dołu. W trakcie kalibracji dokonano jedynie korekt warunków brzegowych, a odwzorowane zwierciadło wód podziemnych pokrywało się ze stanem obserwowanym w 2008 r., z dokładnością w granicach 0,1–0,2 m.

Wyniki bilansu wodnego dla użytkowego poziomu wodonośnego wykazały, że sumaryczne zasilanie infiltracyjne wynosi $538 \text{ m}^3/\text{d}$, co przy powierzchni $1,36 \text{ km}^2$ daje 150 mm/a . Dopływy boczne, głównie od strony zachodniej są niewielkie – na poziomie $21 \text{ m}^3/\text{d}$. Po stronie ujemnych składników bilansu odpływy boczne wynoszą $559 \text{ m}^3/\text{d}$,

z czego $328 \text{ m}^3/\text{d}$ przypada na kierunek wschodni, $108 \text{ m}^3/\text{d}$ odpływa ku północy, a $123 \text{ m}^3/\text{d}$ ku południowi.

Na przekroju poprowadzonym przez obszar planowanego parkingu (fig. 6) zaznacza się niewielki wpływ wyrobiska na rozkład wysokości hydraulicznej w pionie. Linie ekwipotencjalne ulegają lekkiemu wygięciu ku górze. Różnica gradientu hydraulicznego jest jednak mała, ponieważ zwierciadło piezometryczne kształtuje się mniej więcej na poziomie planowanego posadowienia, zatem proces ascenzyjnego przesączania, ze względu na miąższość nadkładu w postaci utworów gliniastych, jest w tych warunkach na tyle mały, że można go pominąć.

Kolejne symulacje wykonano przy założeniu posadowienia parkingu na głębokości maksymalnie 10–11 m, jak przewidziano w wariantach I i II. W takim przypadku, z uwagi na zmianę różnicy gradientu hydraulicznego, wpływ przesączania jest już wyraźny. Z bilansu dla przyjętej powierzchni parkingu wynika, że będzie to stosunkowo niewielka war-

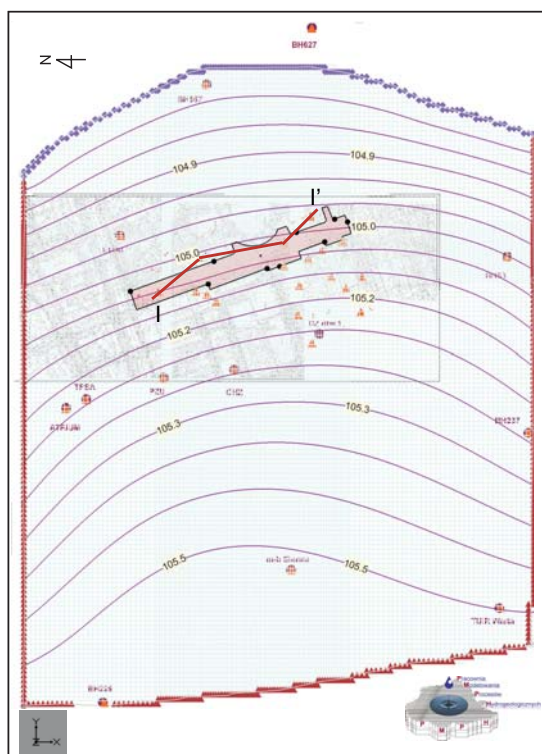


Fig. 4. Rozkład hydroizohips ustabilizowanego zwierciadła wód podziemnych według obliczeń numerycznego modelu filtracji w rejonie planowanej inwestycji

Objaśnienia na [figurze 3](#)

Head contours of the stabilized water level calculated from the model simulation in the investment area

For explanation see [Figure 3](#)

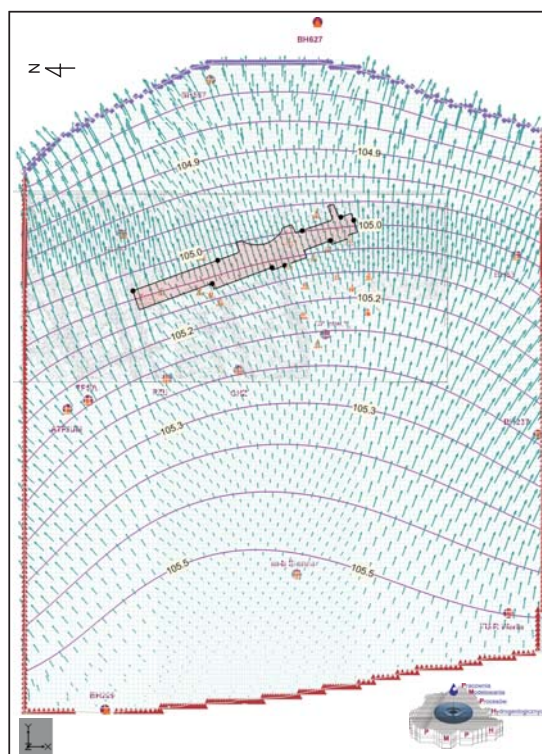


Fig. 5. Rozkład pola prędkości w strumieniu wód podziemnych według obliczeń numerycznego modelu filtracji w rejonie planowanej inwestycji

Objaśnienia na [figurze 3](#)

Groundwater flow velocity field calculated from the model simulation in the investment area

For explanation see [Figure 3](#)

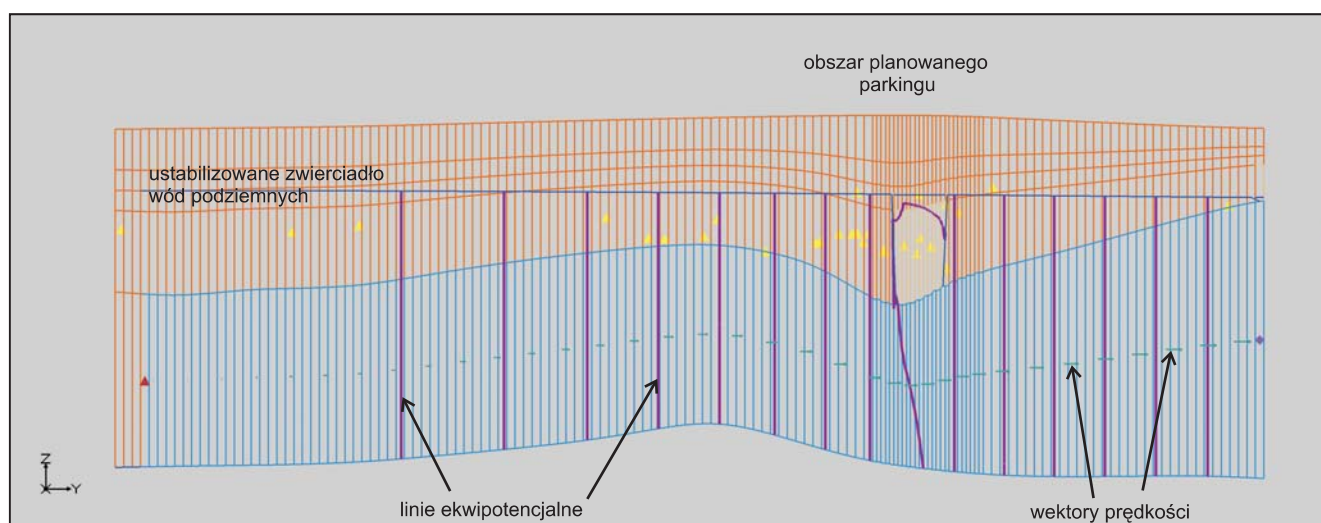


Fig. 6. Przekrój przez siatkę modelu ($j = 75$)

Cross-section through the model grid ($j = 75$)

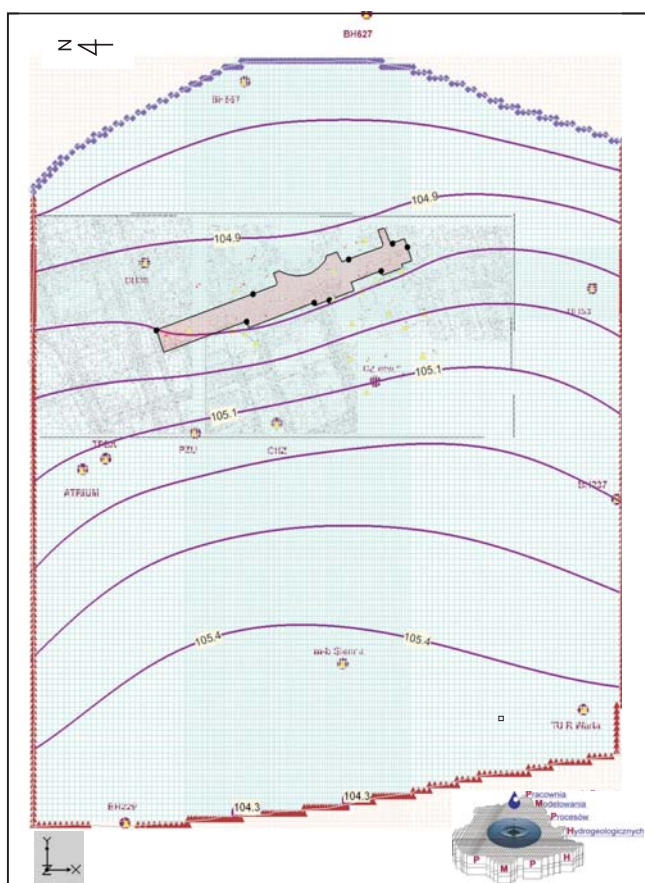


Fig. 7. Rozkład hydroizohips według obliczeń numerycznego modelu filtracji przy hipotetycznym posadowieniu parkingu na głębokości około 14 m

Head contours according to the model simulation for hypothetical parking foundation at the depth of 14 m



tość rzędu $32 \text{ m}^3/\text{d}$. Odpływ strumienia wód podziemnych w kierunku wschodnim uległ tym samym niewielkiemu zmniejszeniu do około $311 \text{ m}^3/\text{d}$, a więc o około 5%.

W przypadku ewentualnej modyfikacji projektu i związanego z tym głębszego posadowienia parkingu, na modelu można kontrolować zmiany hydrodynamiczne, zachodzące w rejonie inwestycji i oceniać wzrost dopływów do wyrobiska przesączających się z podłoża. Przykład takiej prognozy, przyjmując dno wyrobiska na głębokości około 14 m, przedstawiono na figurze 7. Widać wyraźną zmianę kształtu hydroizohips, które wyginają się wzdłuż granicy parkingu ku zachodowi. Zanotowano w tym przypadku możliwość wzrostu dopływu do wyrobiska do około $116 \text{ m}^3/\text{d}$ czyli 1,3 l/s. Odpływ ku wschodowi uległ zmniejszeniu do $267 \text{ m}^3/\text{d}$, czyli o około 19%, a odpływ przez pozostałe granice jest na poziomie $180 \text{ m}^3/\text{d}$.

WNIOSKI

1. Planowana głębokość posadowienia parkingu podziemnego wynosi, w zależności od wariantu, od 8 do 11 m p.p.t. i będzie prowadzona głównie w obrębie glin lodowcowych. W trakcie planowanych prac zostaną zdrenowane wody podziemne pierwszego poziomu wodonośnego o niewielkiej zasobności. Nie zostanie naruszony strop niżej leżącego użytkowego poziomu wodonośnego.

2. W przypadku zaistnienia łączności hydraulicznej wyrobiska z wodami drugiego poziomu wodonośnego, wystąpią dopływy około 3–4 tys. m^3/d . Jest to możliwe w przypadku realizowania I lub II wariantu inwestycji. Wówczas, zasięg oddziaływania prowadzonego odwodnienia wyniesie: maksymalnie 140–150 m – w przypadku pierwszego poziomu wodonośnego oraz około 180–190 m – w przypadku wystąpienia dopływów wody z drugiego poziomu wodonośnego.

3. Najkorzystniejszym wariantem do realizacji, biorąc pod uwagę oddziaływanie na wody podziemne, jest wariant III inwestycji. W trakcie realizacji tego wariantu nie ma możliwości wystąpienia dopływów z drugiego poziomu wodonośnego. Wielkości dopływów z pierwszego poziomu

wodonośnego oraz zasięg oddziaływania w tym poziomie będą natomiast podobne jak w I i II wariantcie inwestycji.

4. Zarówno na etapie prac budowlanych, jak też później – w toku eksploatacji, inwestycja nie będzie niekorzystnie wpływać na jakość wód głównego użytkowego poziomu wodonośnego. Izolacja w postaci kilkumetrowej miąższości warstwy gliny lodowcowej skutecznie zabezpieczy przed dopływem substancji zanieczyszczających (zwłaszcza substancji ropopochodnych) z parkingu. Niezbędny jest jednak szczelny system odprowadzania potencjalnych odcieków z obszaru wszystkich kondygnacji parkingu. Planowane wykonanie w obrębie parkingu odwodnienia liniowego lub wpustów miejscowych powinno w sposób właściwy zabezpieczyć wody podziemne przed zanieczyszczeniem.

5. Warstwy geoinformacyjne przygotowane w systemie GIS po połączeniu z numerycznym modelem terenu dały podstawę dla przestrzennego odwzorowania głównego użytkowego poziomu wodonośnego, pozostającego pod wpływem odwadniania na tym terenie. Wyniki modelu potwierdziły, że przy zaprojektowanym posadowieniu parkingu nie

ma konieczności prowadzenia odwadniania wglębnego poziomu wodonośnego, a po szcerpaniu niewielkich dopływów z poziomu przypowierzchniowego należy w trakcie prowadzonych prac kontrolować warunki hydrodynamiczne w istniejących otworach obserwacyjnych. W przypadku ewentualnych zmian założeń projektowych lub korekt technicznych w trakcie realizacji inwestycji, wykonany model numeryczny filtracji można wykorzystać do szybkiej weryfi-

kacji oddziaływań prac budowlanych na wody podziemne oraz do oceny dopływów wody do wyrobiska.

6. Wykonane dotychczas zadania potwierdziły, że program MODFLOW można zarekomendować nie tylko jako jeden z najlepszych do opracowania regionalnych modeli (Gurwin, Serafin, 2008), ale również z powodzeniem może być wykorzystywany właśnie w modelowaniu oddziaływania obiektów inżynierskich (Gurwin, Ruszkiewicz, 2009).

LITERATURA

- ANDERSON M., WOESSNER W., 1992 — Applied groundwater modeling. Academic Press, Inc., Londyn.
- DOKUMENTACJA geologiczno-inżynierska dla projektowanej inwestycji „Złota Centrum” SALGEO, Warszawa. 2000a.
- DOKUMENTACJA geologiczno-inżynierska dla projektowanego głębokiego posadowienia hotelu w ramach inwestycji „Złote Tarasy”. SALGEO, Warszawa. 2000b.
- DOKUMENTACJA hydrogeologiczna wraz z projektem odwodnienia budowlanego projektowanego obiektu „Hotel Centrum 2000”, Warszawa ul. E. Plater/ul. Śliska. Geosystem, Warszawa, styczeń 2001 r.
- GURWIN J., POPRAWSKI L., 2001 — Zastosowanie metod numerycznych w prognozowaniu dopływów do wykopów inżynierskich. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*: 10, 2: 341–348. Wyd. Sudety, Wrocław.
- GURWIN J., RUSZKIEWICZ P., 2009 — Zastosowanie numerycznego modelu filtracji w ocenie wpływu robót inżynierskich na wody podziemne na przykładzie planowanego tunelu między wyspami Wolin i Uznam. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **436**: 141–151.
- GURWIN J., SERAFIN R., 2008 — Budowa przestrzennych modeli koncepcyjnych GZWP w systemach GIS zintegrowanych z MODFLOW. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **431**: 49–59.
- GURWIN J., WĄSIK M., 2008 — Przebudowa ul. E. Plater w Warszawie na odcinku Al. Jerozolimskie–ul. Twarda wraz z budową parkingu podziemnego. Studium oddziaływania na środowisko wodne. FPP Consulting, Warszawa.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.), 1990 — Mapa obszarów głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony. AGH, Kraków.
- KONDRACKI J., 1998 — Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- McDONALD M.G., HARBAUGH A.W., 1988 — A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geol. Surv. Open-File Report. Waszyngton.
- POLLOCK D.W., 1988 — Semianalytical computation of path lines for finite difference models. *Ground Water*, **26**, 6: 743–750.
- POLLOCK D.W., 1994 — User's guide for MODPATH, version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW the U.S. Geol. Surv. finite-difference groundwater flow model. Reston, VA. U.S. Geological Survey.
- PROJEKT prac geologicznych — Parking podziemny pod ul. E. Plater. GT Projekt, Warszawa, kwiecień, 2008 r.

SUMMARY

The investigations were conducted to find out whether the construction of a multi-level underground parking lot is likely to influence the flow system of the major Quaternary aquifer in the centre of Warsaw. Developing a numerical flow model was the most advanced method to establish qualitatively and quantitatively the necessity of dewatering. The simulations performed for the projected variants of parking location at the depths of 8–9 m show that the hydraulic gradient between the aquifer and the bottom of the pit is 0.0–0.5 m. It means that the inflow across the bottom is nonsignificant in these variants. According to the water

balance calculations the total recharge from infiltration was evaluated as 538 m³/d, that means 150 mm/a. Lateral inflows mainly from the western site equals to are 21 m³/d and summarized lateral outflow is 559 m³/d, out of which 328 m³/d follow the major eastern direction. Next after the simulations for the depth of 11 m it was evidenced that the groundwater surface was changed and a seepage process from the bottom was evaluated approx. to 32 m³/d. Depending on final constructing decisions, some additional simulations can be easily done checking the new conditions of the size or depth of the parking base plate.