

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (4), 514–527
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (4)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (4), 514–527
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.4.49

**Tomasz FALKOWSKI, Filip BUJAKOWSKI, Grzegorz WIERZBICKI,
Piotr OSTROWSKI**

Katedra Geoinżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Przydatność kryteriów litogenetycznych w konstrukcji numerycznego modelu krążenia wód podziemnych w strefie krawędziowej wysoczyzny Involving a lithogenetic analysis to the model of groundwater flow dynamics in the margin of large river valley

Słowa kluczowe: dynamika filtracji, dolina rzeczna, modelowanie przepływu wód podziemnych, system drenażowy

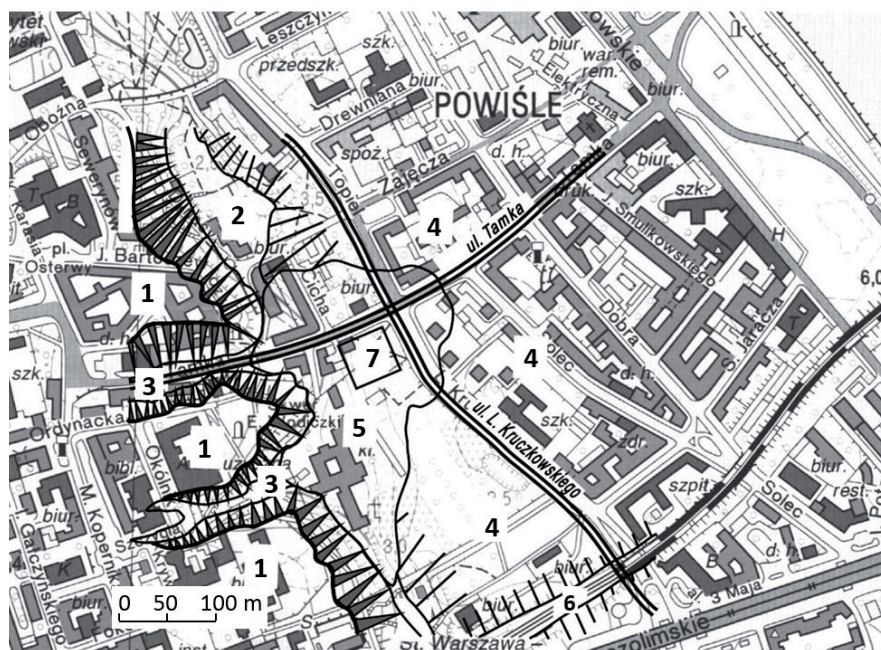
Key words: groundwater flow dynamics, river valley, groundwater flow modelling, drainage system

Wprowadzenie

Postęp technologiczny w budownictwie i dostępność nowych technologii doprowadziły do tego, że wizja urbanistyczna (a nie warunki gruntowo-wodne obszaru potencjalnej budowy) stała się podstawowym kryterium wyboru lokalizacji inwestycji (Bujakowski, Falkowski i Wierzbicki, 2012; Bujakowski, Falkowski, Wierzbicki i Żukowska, 2014). Coraz częściej więc obiekty budowlane są lokalizowane w miejscach charakteryzujących się trudnymi warunkami

posadowienia. Opisane w pracy badania dotyczyły rozpoznania warunków hydrogeologicznych w rejonie projektowanego budynku mieszkalnego zlokalizowanego w Warszawie, przy zbiegu ulic Tamka i Kruczkowskiego. Powierzchnia zabudowy (w planie) wynosi około 1030 m². Budynek składa się z ośmiu kondygnacji naziemnych i dwóch podziemnych.

Obszar inwestycji pod względem budowy geologicznej (Bażyński i in., 1999) ocenić można jako skomplikowany. Budynek został zaprojektowany w strefie skarpy wysoczyzny morenowej, na granicy z tarasem nadzalewowym doliny Wisły (tarasem praskim). Bryła budynku jest zlokalizowana w obrębie stożka deluwialnego uformowanego u wylotu dwóch suchych dolinek erozyjnych (rys. 1). Zmieniona w wyniku zabudowy prowadzonej od XVI wieku morfologia



RYСУNEK 1. Lokalizacja terenu objętego badaniami na tle szkicu geomorfologicznego: 1 – wysoczyzna morenowa, 2 – taras nadzalewowy z pokrywą deluwialną, 3 – dna dolinek erozyjnych, 4 – taras zalewowy, 5 – stożek napływowo z pokrywą koluwialno-deluwialną, 6 – nasyp kolejowy, 7 – teren badań
 FIGURE 1. Location of the investigated area displayed on a background of geomorphological sketch: 1 – moraine upland, 2 – upper terrace with the deluvial cover, 3 – bottoms of gully valleys, 4 – floodplain, 5 – alluvial cone with colluvial-deluvial cover, 6 – railway embankment, 7 – study area

terenu jest w dużej mierze zamaskowana istniejącymi tu budowlami. Dnem północnej dolinki erozyjnej biegnie obecnie ulica Tamka. Rzeźba drugiej dolinki zaznacza się na obszarze wysoczyzny od rejonu ulicy Szczygła do podnóża skarpy, w rejonie budynku klasztoru Zgromadzenia Sióstr Miłosierdzia św. Wincenta à Paulo. Na północ i południe od dolinek do skarpy przylegają wąskie listwy tarasu plejstoceniowego praskiego (Sarnacka, 1992). W strefie podskarpowej, w podłożu utworów czwartorzędu występują neogeńskie ily jeziorne serii poznańskiej (Piwocki, 2002), określane także jako ily pstre lub ily pliocenijskie. Grunty te są uznawane ze względu na

skład mineralny za grunty ekspansywne (Wysokiński i Godlewski, 2004).

Budynek posadowiono z zastosowaniem ścian szczelinowych z płytą denną, aby konstrukcja fundamentów wytrzymała obciążenie dwupoziomowego parkingu podziemnego. Część podziemna fundamentów obiektu stanowi zatem barierę, która może piętrzyć wody podziemne spływające z wysoczyzny do doliny. Potencjalnym zagrożeniem dla projektowanego budynku oraz sąsiadujących z nim konstrukcji jest zakłócenie naturalnych dróg krążenia wód podziemnych między systemem wodonośnym wysoczyzny i doliny Wisły.

Cel badań

Strefy krawędziowe wysoczyzn morenowych na granicy z dolinami rzeczynymi na obszarze Nizżu Polskiego charakteryzują się dużym skomplikowaniem budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych (Wysokiński, 1999; Falkowski, 2000; Bujakowski, Ostrowski, Sopol i Złotoszewska-Niedziałek, 2014). Jest ono efektem poligenyzy analizowanych odcinków dolin oraz powszechności występowania zaburzeń glacictonicznych w osadach czwartorzędowych i w ich bezpośrednim podłożu (Aber i Ber, 2007). Duży wpływ na reżim hydrogeologiczny takich stref miało ich zagospodarowanie, czyli zabudowa (Macioszczyk, Grochowski i Porębska, 1991). Celem przedstawianych w niniejszym artykule badań było określenie reżimu hydrogeologicznego rejonu zbocza wysoczyzny i przylegającego do niego fragmentu dna doliny Wisły. Identyfikacja elementów morfo- i litogenezy tej strefy była kluczowa dla określenia modelu warunków filtracji wód podziemnych. Zidentyfikowane na tej podstawie elementy reżimu hydrogeologicznego stały się podstawą do określenia wytycznych do projektu systemu odwodnienia, którego zadaniem jest kompensowanie wpływ projektowanego obiektu na zmiany warunków krążenia wód podziemnych.

Teren badań i ich metodyka

Teren badań znajduje się w śródmieściu Warszawy, na Powiślu, przy ulicy Tamka. Pod względem geomorfologicznym teren ten jest zlokalizowany w dolnej części stoku plejstocenijskiej wyso-

czyzny polodowcowej, który potocznie bywa nazywany skarpią warszawską. Stok ten stanowi jednocześnie granicę między Równiną Warszawską a Doliną Środkowej Wisły (Kondracki, 2001). Kluczowym elementem budowy geologicznej obszaru badań jest płytko występująca elewacja osadów jeziornych serii poznańskiej – iłów pstrych (Różycki, 1972). Utwory te tworzą w strefie skarpowej lewobrzeżnej wysoczyzny w Warszawie zespół fałdów nazywanych fałdami warszawskimi. Ich genezę wiązał Różycki (1972) z procesami spływowymi. Domosławska-Baraniecka (1961), Brykczyński i Brykczyńska (1974) wiązali ich powstanie z procesami glacictonicznymi. Brykczyński i Brykczyńska (1974) datują wiek tych zaburzeń na stadiał maksymalny Radomki zlodowacenia środkowopolskiego (według podziału Różyckiego, 1972). W zaburzeniach biorą udział utwory glacialne stadiału Radomki (według Należytego, 1972 i Watychy, 1973). Osady kolejnego stadiału – Warty (zlodowacenia Warty według Lindnera, 1988) leżą poziomo na zrównanej powierzchni osadów zaburzonych. Fałdy warszawskie generalnie zanikają w kierunkach na północ, południe wzdłuż doliny Wisły, a także zachód (Różycki i Sujkowski, 1936). W obrębie doliny Wisły strop serii zaburzonej jest ukryty pod serią współczesnych aluwiiów korytowych o zmiennych miąższościach, lub odsłania się w dnie koryta (Falkowski i Ostrowski, 2015). Wschodnie iłów serii poznańskiej występują na całym odcinku skarpy wysoczyzny od rejonu Cytadeli, Żoliborz, do rejonu Królikarni, Mokotów (Sarnacka, 1992). Sąsiedztwo skarpy wysoczyzny lodowcowej oraz parametry filtracyjne

podłoża utworów czwartorzędowych determinują w znaczącej mierze warunki filtracji wód podziemnych analizowanej strefy i nadają im specyficzny charakter. Kluczowym etapem interpretacji jest zatem odpowiednia schematyzacja warunków geologicznych. W tym celu wykonano osiem wierceń geologicznych o głębokości od 3,0 do 7,4 m. Wiercenia wykonano zestawem ręcznym firmy Eijkelkamp o średnicy 90 cm. Następnie we wszystkich otworach zainstalowano piezometry o średnicy 50 mm, wykonane z rur PVC. Część roboczą filtra piezometru o długości 0,5 m budują szczeliny o szerokości 1 mm w oplocie siatki nylonowej. W opracowaniu modelu warunków krążenia wód podziemnych wykorzystano także profile czterech wierceń archiwalnych wykonanych techniką mechaniczną z wykorzystaniem świda ślimakowego (Wysokiński, 1999; Koda i in. 2012).

Stworzony m.in. na podstawie danych z wierceń model koncepcyjny budowy geologicznej stał się następnie bazą stworzenia modelu numerycznego warunków przepływu wód podziemnych. Wartości współczynnika filtracji poszczególnych warstw określono na podstawie krzywych uziarnienia pobranych w trakcie wierceń próbek gruntów, a następnie skorygowano w trakcie procedury kalibracji modelu. Kalibrację przeprowadzono na podstawie wyników obserwacji poziomu wód gruntowych w pięciu piezometrach wykonanych w trakcie prac terenowych. Cyfrowy model krążenia wód opracowano z wykorzystaniem zasobów bibliotek programów Visual ModFlow amerykańskiej firmy Waterloo Hydrogeologic. Na obszarze badań zdykretyzowane odwzorowanie przestrzeni

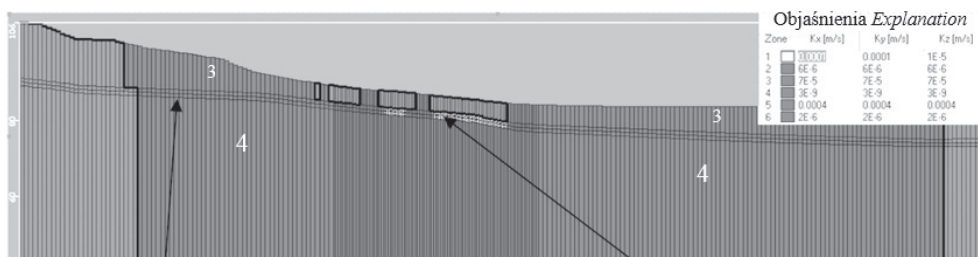
modelu koncepcyjnego w płaszczyźnie poziomej (XY) dokonano za pomocą siatki prostokątnej. Siatka dyskretyzacyjna obszaru wyznaczonego do badań modelowych składa się z 258 kolumn oraz 247 wierszy. W przypadku modelowanego obszaru przyjęto schemat czterowarstwowy. Strop pierwszej warstwy jest równy rzędnej terenu. Rzeźba terenu na potrzeby tworzenia modelu pozyskana została z zasobów GIS Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w postaci numerycznego modelu terenu (NMT) wykonanego na podstawie danych ALS. Strop kolejnych warstw odwzorowano zgodnie z przyjętą schematyzacją warunków litogenetycznych i hydrogeologicznych. Przy modelowaniu przepływu wód gruntowych w warunkach filtracji ustalonej warunkiem koniecznym do rozwiązania układu równań różniczkowych jest określenie warunków brzegowych. W przedmiotowym modelu zastosowano następujący schemat warunków brzegowych:

- Warunek I rodzaju (*constant head*) został wykorzystany do wydzielenia bryły modelowanego systemu. Na podstawie pomiarów położenia wód w tymczasowych otworach oraz danych archiwalnych określono poziom zalegania zwierciadła wód podziemnych w liniach ograniczających modelowaną strefę (rys. 1).
- Warunek II rodzaju (*recharge*) posłużył do symulacji przestrzennego rozkładu zasilania infiltracyjnego wodami opadowymi systemu wodonośnego;
- Warunek brzegowy III rodzaju (*drain*) posłużył do symulacji warunków odprowadzenia wód poprzez system drenów. Przyjmuje się zało-

zenie, że drenaże odprowadzają wodę z warstwy wodonośnej z wydatkiem proporcjonalnym do różnicy wysokości hydraulicznej między drenem a poziomem wód podziemnych, przy czym proces ten zachodzi tylko wówczas, gdy zwierciadło wód gruntowych występuje powyżej drena. Dren traktowany jest jako źródło, które może odprowadzać wodę z warstwy, ale w przeciwnym kierunku przepływ nie zachodzi. W opisywanym modelu warunek ten został zastosowany wzdłuż projektowanych ścian szczelinowych po zachodniej i południowej stronie inwestycji.

Wyniki modelowania pozwoliły na sformułowanie propozycji charakterystyki systemu drenażu, który powinien zminimalizować niekorzystny wpływ posadowienia budynku na warunki przepływu wód podziemnych. Przyjęto, że utwory wodonośne udokumentowane między innymi w pomiarach z otworów archiwalnych 3, 4, 5 i 6 wykonanych na potrzeby dokumentacji geotechnicznej (Koda i in., 2012) oraz piezometrach własnych 1, 2, 3, 4 i 7 (Falkowski i in., 2013) stanowią ciągłą warstwę wodonoś-

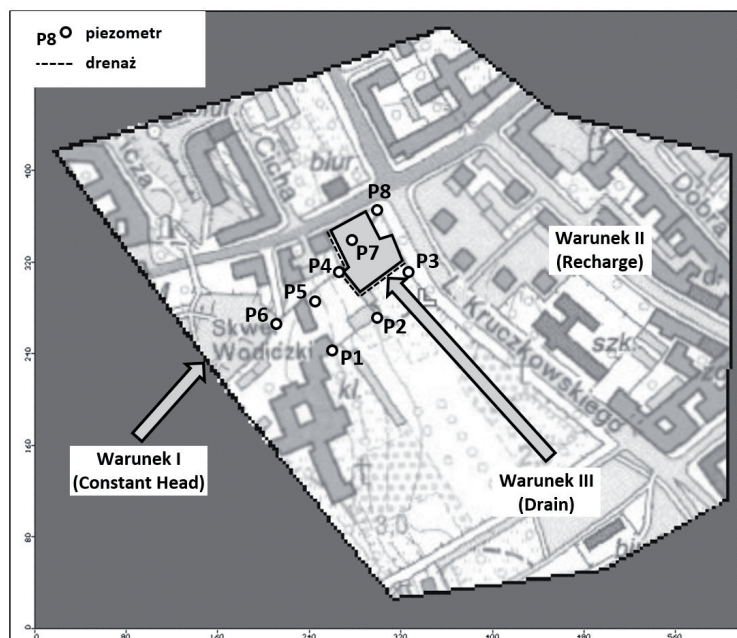
ną występującą na całym obszarze badań (rys. 2, 3). Miało to na celu zwiększenie przewodności serii utworów wodonośnych, które szczególnie w obrębie serii deluwialno-koluwalnej tworzą soczewy w różnym stopniu ze sobą skomunikowane. Nasypy antropogeniczne odwzorowano w postaci jednorodnej bryły o stosunkowo niskim współczynniku filtracji ($7 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). W rzeczywistości antropogeny z natury są bardzo niejednorodne. Przyjęta wartość współczynnika filtracji odzwierciedla niekorzystną uśrednioną opcję modelową. W celu przeprowadzenia kalibracji modelu zastosowano pakiet Head Observation Wells. Kalibrację prowadzono na podstawie pomiaru zwierciadła wód podziemnych w wykonanych piezometrach. Model uznano za wytarowany przy średnim błędzie wynoszącym 0,055 m, średnim błędzie absolutnym wynoszącym 0,11 m, średniej kwadratowej wynoszącej 0,199 m oraz średniej kwadratowej dla n wynoszącej 2,33%. Maksymalną różnicę między obliczoną a pomierzoną wysokością hydrauliczną otrzymano w piezometrze 6 (0,380 m), a minimalną różnicę wysokości w piezometrze 2 (0,012 m).



Zamodelowana ciągła warstwa wodonośna (k: zone 6 i 5) Strefa posadowienia (k: zone 1).

RYСУNEK 2. Przekrój przez bryłę modelu w strefie posadowienia z uczytelnioną przewodnością warstw

FIGURE 2. Cross-section through the model body in the area of the foundation with the guided layer of cross-section



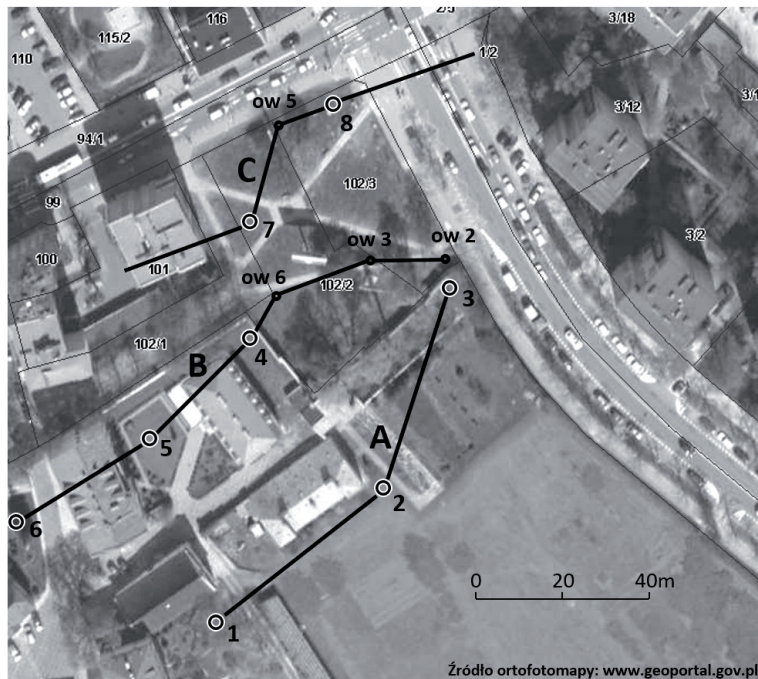
RYSUNEK 3. Warunki brzegowe zastosowane w modelu
 FIGURE 3. Boundary conditions used in the model

Wyniki i dyskusja

Jak wynika z profili wykonanych wierceń (rys. 4, 5), dominującym typem depozycji w okresie schyłku plejstocenu w tej strefie była akumulacja osadów ilastych i pylastych, pochodzących z niszczenia fałdu zbudowanego z ilastych utworów serii poznańskiej. Procesowi rozmywania kulminacji zbudowanej z gruntów spoistych sprzyjały prawdopodobnie procesy wietrzenia (głównie mrozowego), powodujące zmniejszanie strukturalnej jednorodności i spoistości tych gruntów. Spływy błotne zwietrzeliły iłów były w okresach większej wilgotności wzbogacane depozycją osadów gruboziarnistych – piasków i żwirów, przenoszonych przez okresowe ciekierozcinające skarpe wysoczyzny. Osady te zawierają przeławicenia pyłów i pia-

sków pylastych świadczące o ich genetycznym związku z procesami spłukiwania na stoku. Przeobrażenia teksturalne przemieszczanych osadów spowodowały także zwiększenie możliwości infiltracji wód. Świadectwem takich zmian jest występowanie w serii redeponowanych iłów serii poznańskiej licznych konkrekcji węglanowych. Same iły są bezwęglanowe (Różycki, 1972, Wyrwicki, 1974). Granicę między redeponowanym materiałem ilastym oraz iłami *in situ* wskazały dokładnie także wyniki badań geotechnicznych (Bajda i Falkowski, 2014).

W holocenie wraz z ociepleniem klimatu zmniejszyła się dynamika procesów stokowych (Mojski, 2005). W osadach leżących na serii deluwialno-koluwalnej, którą można wiązać ze zlodowaceniem Wisły, znajduje się seria glin piaszczystych i glin pylastych z prze-



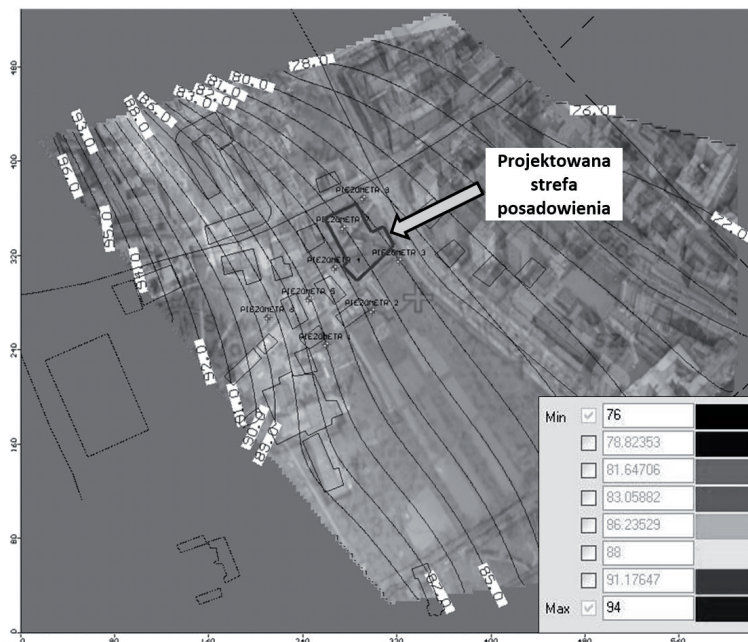
RYSUNEK 4. Otwory wiertnicze i linie przekrojów geologicznych na tle zdjęcia satelitarnego obszaru badań

FIGURE 4. Boreholes and geological cross-sections on the satellite image of the study area

ławiczeniami iłów i piasków gliniastych z domieszką substancji humusowej. Warstwa ta powstała głównie w efekcie procesu ablacji deszczowej. Powierzchnia stropowa tej części profilu została przeobrażona (wyrównana) w efekcie zalewów holocenijskiej Wisły. Ostatnim elementem profilu osadów analizowanej strefy są gliniaste nasypy antropogeniczne zawierające gruz i okruchy cegieł, będące świadectwem zniszczeń powstałych w czasie II wojny światowej (rys. 5).

Model numeryczny filtracji był kalibrowany według danych z okresu stosunkowo małych opadów (kwiecień 2013 r. wielkość opadu w Warszawie wyniosła 60 mm na miesiąc według danych IMiGW). Kształt uzyskanej w wyniku przeprowadzonych prac modelowych

powierzchni zwierciadła wód podziemnych wskazuje, że odpływ wód z omawianego obszaru odbywa się w kierunku północno-wschodnim (rys. 6). Główną bazą drenażową wód podziemnych oraz spływu powierzchniowego na omawianym terenie stanowi koryto rzeki Wisły. Zgodnie z wynikami badań modelowych przepływ wód podziemnych jest kształtowany głównie przez infiltrację opadów atmosferycznych oraz napływ z piaszczystych przewarstwień w obrębie osadów budujących wysoczyznę. Zwierciadło wód podziemnych w analizowanym obszarze ma charakter napięty i w rejonie projektowanego budynku stabilizuje się na rzędnych 81–83 m n.p.m. (rys. 6). Zwierciadło stabilizuje się 5–6 m powyżej poziomu średniego wody Wisły.

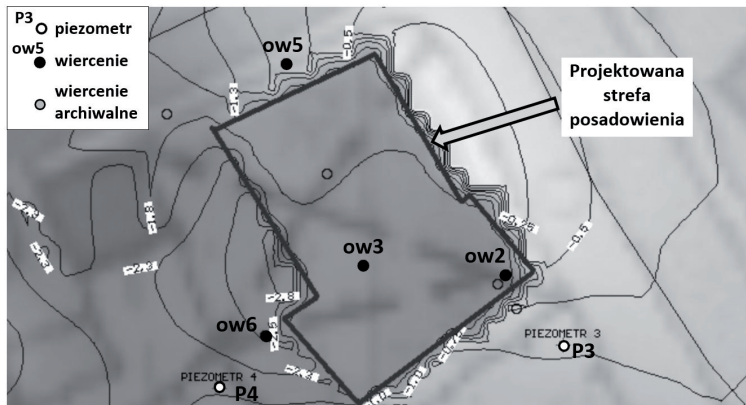


RYSUNEK 6. Mapa hydroizohips w stanie pierwotnym (przed posadowieniem obiektu)
 FIGURE 6. Water level contour lines on primary conditions (before the construction)

W związku z tym w trakcie procesu modelowania pominięto to, uznając za minimalny potencjalny wpływ zmiany stanów wody w Wiśle na warunki filtracji strefy objętej badaniami.

W kolejnym etapie badań przeprowadzono symulację wpływu posadowienia budynku bez zastosowania systemu drenażowego w ściankach szczelinowych na warunki filtracji wód podziemnych. Przy założeniu posadowienia obiektu w neogeńskich utworach nieprzepuszczalnych możliwe było wyliczenie maksymalnego spiętrzenia zwierciadła wód podziemnych na skutek realizacji inwestycji. W skrajnie niekorzystnych warunkach zwierciadło ustabilizowane wód podziemnych wzdłuż zachodniej ściany budynku może podnieść się na skutek realizacji inwestycji o 2,8 m (rys. 7). Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w

początkowej fazie modelowania przyjęto, że warstwa wodonośna występuje na całym obszarze badań, co nie pozostaje bez wpływu na podaną wcześniej wartość. W stanie rzeczywistym należy spodziewać się znacznie mniejszego spiętrzenia nieprzekraczającego wartości 2 m. W kolejnym etapie prac zasymulowano wykonanie drenażu wzdłuż południowej i zachodniej ściany szczelinowej, na poziomie spągu piaszczystych przewarstwień udokumentowanych w wierceniach. Symulacja była prowadzona metodą kolejnych przybliżeń. Jej celem było określenie wydajności pracy systemu drenażowego, przy jakiej obraz pola hydrodynamicznego będzie jak najbardziej zbliżony do stanu naturalnego. Z symulacji wynikło, że w okresach o względnie małych sumach opadów minimalizacja wpływu inwestycji na reżim

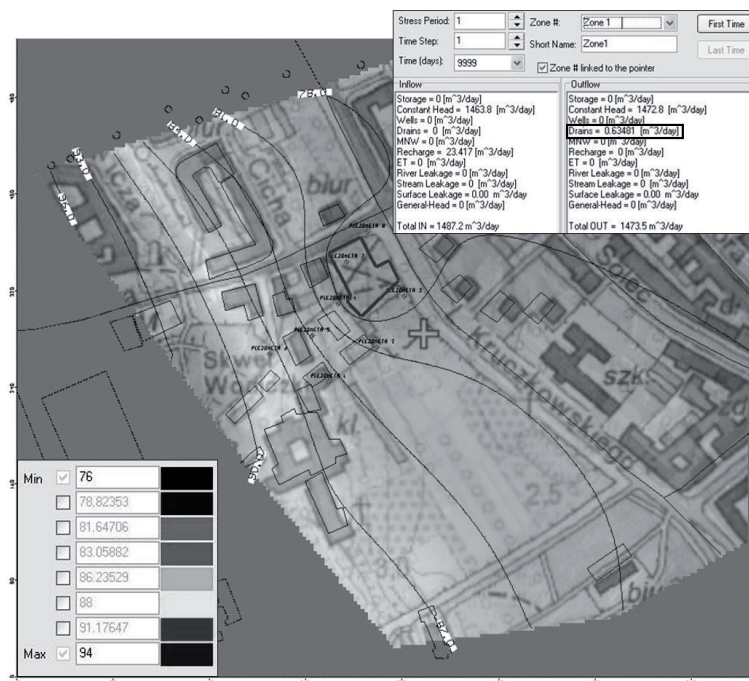


RYSUNEK 7. Mapa wpływu posadowienia budynku na wysokość hydrauliczną wód w warstwie piaszczystej (*drawndown*)

FIGURE 7. Impact of building foundation on the piezometric head within the sand layer (*drawndown*)

hydrogeologiczny obszar badań nastąpi przy odprowadzeniu $0,63 \text{ m}^3$ wód podziemnych na dobę systemem drenażu (rys. 8). W okresie badań nie zaznaczało

się zagrożenie podtopieniami okolicznych budynków na skutek realizacji inwestycji w analizowanym obszarze.



RYSUNEK 8. Mapa hydroizohips z zaznaczonym obszarem wpływu systemu drenażu

FIGURE 8. Water level contour lines impacted by drainage system

Końcowym elementem procesu modelowania była analiza reakcji systemu wodonośnego na gwałtowny wzrost sumy opadów atmosferycznych. Przyjęte wartości opadów były równe tym z maja i czerwca 2010 roku, kiedy to odnotowano gwałtowne wezbrania na całym obszarze Polski. Powodowały one powódzie i liczne podtopienia. Odzwierciedlenie na modelu obecnych warunków hydrogeologicznych występujących na omawianym obszarze zostało wykorzystane następnie do przeprowadzenia symulacji wprost odtwarzającej stan hydrodynamiczny i bilans wodny po 30-dniowym okresie z nawalnymi opadami. Dzięki tak przygotowanym symulacjom możliwe było określenie maksymalnego dopływu do systemu drenażowego. Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynika, że przepustowość drenażu powinna być tak skalibrowana, aby w skrajnie niekorzystnych warunkach miesięczne opady w wysokości 300 mm system był w stanie odprowadzić w ciągu doby 94 m^3 wody, zaś przy standardowym jego obciążeniu (miesięczne opady w wysokości 60 mm) potrafił odprowadzić w ciągu doby $0,63 \text{ m}^3$ wody).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczyły wpływu głębokiego posadowienia budynku mieszkalnego w specyficznych warunkach gruntowo-wodnych. Budynek jest zlokalizowany w silnie zurbanizowanym rejonie, u podnóża skarpy wysoczyzny lodowcowej. Działalność człowieka oraz procesy zboczowe spo-

wodowały przeobrażenie powierzchniowej warstwy osadów nawet do głębokości 4–5 m p.p.t. (otwory 3,8). Utwory te cechuje duża przestrzenna zmienność parametrów filtracyjnych. W rejonie badań do głębokości 20 m nie występuje jednorodna, ciągła warstwa wodonośna. Wody podziemne pochodzące z zasilania opadowego i napływające z utworów budujących przyległą wysoczyznę zasilają serię o dużej zmienności litologicznej. W takich warunkach wydzielenie określonych ramami przestrzennymi warstw wodonośnych dla potrzeb tworzenia modelu filtracji może być utrudnione. W przedstawionym przykładzie według kryteriów litogenetycznych przyjęto określony schemat środowiska filtracji. W przestrzeni modelu wydzielono cztery warstwy odpowiadające kolejno od spągu:

- zafałdowanym i zaburzonym otworem plejstoceniowym stanowiącym dolną, szczelną granicę modelu,
- utworom rzeczonym wykształconym w postaci piasków i żwirów budujących taras praski,
- serii gliniasto pylastych utworów zboczowych (deluwia, koluwia),
- zamykającym od góry bryłę modelu utworom antropogenicznym o znacznej miąższości.

Przedstawiona schematyzacja ułatwiła syntezę przestrzennego rozkładu parametrów filtracyjnych oraz umożliwiła stosunkowo proste wariantowanie rozwiązań inżynierskich.

Zaproponowana konstrukcja modelowa pozwoliła w dalszej kolejności na stosunkowo proste symulowanie sytuacji ekstremalnych takich jak zwiększenie dopływu do systemu na skutek

długotrwałych obfitych opadów czy występowania w obrębie utworów zboczowych stref o podwyższonej wodoprzepuszczalności nieudokumentowanych w wierceniach. W takich przypadkach modelowaniu podlegała tylko jedna warstwa, co skracało cały proces i nadawało mu transparentność. W trakcie kalibracji modelu największy wpływ na wartości dopasowania miały właśnie zmiany wprowadzane w warstwie odpowiadającej utworom koluwalno-deluwialnych, co potwierdziło występowanie dużej zmienności przestrzennej tych osadów.

Wykorzystanie technik modelowania matematycznego w badaniach hydrogeologicznych jest związane nierozłącznie z koniecznością znacznej generalizacji danych. Kluczowym etapem w trakcie tworzenia koncepcji systemu jest wydzielenie optymalnej liczby warstw modelowych. W skomplikowanych przypadkach dokładne odwzorowanie budowy geologicznej może utrudnić proces dopasowywania wartości pomierzonych i modelowanych. W przypadkach takich jak opisane powyżej (silna urbanizacja, zaburzenia glacictektoniczne, procesy zboczowe), w szczególności w zastosowaniach inżynierskich, uzasadniona wydaje się agregacja warstw zgodna z litogenezą utworów, a następnie kalibracja modelu według zmian parametrów filtracyjnych w warstwach o największej niepewności (zmienności przestrzennej). Potwierdza to zatem, że metoda modelowania hydrogeologicznego w określonych przypadkach może być traktowana jako jedna z metod określania współczynnika filtracji.

Literatura

- Aber, J.S. i Ber, A. (2007). *Glaciotectonism*. Elsevier.
- Bajda, M. i Falkowski, T. (2014). Badania geotechniczne w ocenie budowy geologicznej fragmentu Skarpy Warszawskiej w rejonie ulicy Tamka. *Landform Analysis*, 26, 77-84.
- Bażyński, J., Drągowski, A., Frankowski, Z., Kaczyński, R., Rybicki, S. i Wysokiński, L. (1999). *Zasady sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich*. Warszawa: Ministerstwo Środowiska, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Bryczyńska, E. i Bryczyński, M. (1974). Geologia przekopu Trasy Łazienkowskiej na tle problematyki osadów trzeciorzędu i czwartorzędu w Warszawie. *Prace Muzeum Ziemi*, 22, 199-218.
- Bujakowski, F., Falkowski, T. i Wierzbicki, G. (2012). Model numeryczny warunków hydrogeologicznych jako narzędzie weryfikacji założeń projektowych systemu odwodnienia. *Biuletyn PIG*, 451, 7-16.
- Bujakowski, F., Falkowski, T., Wierzbicki, G. i Żukowska, K. (2014). Using hydrodynamic modelling to assess the impact of the development on hydrogeological conditions in a polygenic river valley marginal zone. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation*, 46(1), 43-55.
- Bujakowski, F., Ostrowski, P., Sopol, Ł., Złotoszewska-Niedziałek, H. (2014). Glacitektonika krawędziowa w dolinie Wisły a dynamika wód podziemnych. *Landform Analysis*, 26, 61-69.
- Domosławska-Baraniecka, M.D. (1961). Outline of the stratigraphy of Warsaw. W: *Quaternary Abstracts of papers INQUA VI Congress* (s. 20-21). Poland.
- Falkowski, T. (2000). Deformation structures in the escarpments zones of the polygenic valleys from Polish Lowland, and their influence of the circulation of the ground water. *Annals of Warsaw Agricultural University, Land Reclamation*, 30, 91-98.
- Falkowski, T., Bujakowski, F., Ostrowski, P., Wierzbicki, G., Sieradz, A. i Kałmykowska-Piwińska, A. (2013). *Dokumentacja geologiczna określająca wpływ projektowanego*

- budynku mieszkalnego wielorodzinnego z częścią usługową na parterze i garażami podziemnymi przy ulicy Tamka w Warszawie na dynamikę przepływu wód podziemnych. Warszawa: Katedra Geoinżynierii SGGW.
- Falkowski, T. i Ostrowski, P. (2015). Wykorzystanie metod geoinformacyjnych w badaniach morfodynamiki koryta Wisły w Warszawie. *Przegląd Geologiczny*, 63 (3), 186-193.
- Koda, E., Bajda, M., Falkowski, T., Lech, L., Matusiewicz, W., Wdowska, M., Osiński, P., Bujakowski, F., Czerniszewska, M. i Wierzbicki, G. (2012). *Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki geologiczno-inżynierskie na potrzeby posadowienia budynku mieszkalnego wielorodzinnego z częścią usługową na parterze i garażami podziemnymi przy ulicy Tamka w Warszawie*. Warszawa: Katedra Geoinżynierii SGGW.
- Kondracki, J. (2001). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Lindner, L. (1988). Zarys stratygrafii plejstocenu rejonu Białej Podlaskiej wraz z próbą korelacji z przyległymi obszarami Związku Radzieckiego. *Przegląd Geologiczny*, 11, 637-647.
- Macioszczyk, A., Grochowski, D. i Porębska, G. (1991). Zanieczyszczenia antropogeniczne wód w źródłach lewobrzeżnej Warszawy. W: *Współczesne problemy hydrogeologii 48* (s. 29-39). Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Mojski, J.E. (2005). *Ziemia Polski w czwartorzędzie*. Zarys morfogenezy. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny
- Należyty, W.Z. (1972). Przekrój geologiczny trasy mostowej „Łazienkowskiej” w Warszawie. *Przegląd Geologiczny*, 2, 93-97.
- Piwocki, M. (2002). Ewolucja poglądów na stratygrafię utworów formacji poznańskiej na Niżu Polskim. *Przegląd Geologiczny*, 3, 255.
- Różycki, S.Z. (1972). *Plejstocen Polski środkowej na tle przeszłości w późnym trzeciorzędzie*. Warszawa: PWN.
- Sarnacka, Z. (1992). Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. *Prace PIG*, 138, 36.
- Watycha, L. (1973). Uwagi o budowie geologicznej „Trasy Łazienkowskiej” w Warszawie. *Przegląd Geologiczny*, 8/9, 458-465.
- Wyrwicki, R. (1974). Osady ilaste serii poznańskiej jako surowce ceramiczne. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 280, 107-121.
- Wysokiński, L. (1999). *Warszawska Skarpa Śródmiejska od Al. Jerozolimskich do ul. San-guszkii*. Aktualizacja wykonanej w 1982 r. analizy warunków geologicznych i prognozy stateczności Skarpy Warszawskiej dla celów zagospodarowania przestrzennego zabezpieczeń i ochrony środowiska w Dzielnicy Śródmieście Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej.
- Wysokiński, L. i Godlewski, T. (2004). *Parametry geotechniczne i ich wykorzystanie w projektowaniu*. Seminarium: Ily plioceńskie Warszawy (s. 51-71). Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej.

Streszczenie

Przydatność kryteriów litogenetycznych w konstrukcji numerycznego modelu krążenia wód podziemnych w strefie krawędziowej wysoczyzny. Celem badań, które prowadzono we fragmencie skarpy plejstocenijskiej wysoczyzny morenowej, na granicy z doliną Wisły w Warszawie, jest określenie wpływu projektowanego obiektu budowlanego na reżim hydrogeologiczny tej strefy. Budynek, którego posadowienie zaprojektowano w obrębie glacictonicznego fałdu iłów trzeciorzędowych uznawanych powszechnie za utwory ekspansywne, spowoduje przegrodzenie strumienia wód podziemnych piętra czwartorzędowego spływających z wysoczyzny do doliny Wisły. Przepływ ten odbywa się w obrębie serii utworów deluwialnych, koluwalnych i aluwii okresowych cieków. Zmiana reżimu hydrogeologicznego może spowodować zmianę wilgotności iłów i zagrozić stabilności już stojących obiektów. W analizowanej strefie wielokrotna przebudowa budynków mieszkalnych oraz trasy komunikacyjnej zatarła pierwotne cechy rzeźby terenu oraz czytelność granic wychodni. Wykonany w programie Visual ModFlow model krążenia wód pozwolił na opracowanie koncepcji odwodnienia, które zapewni stabilizację stosunków wodnych po wybudowaniu projektowanego obiektu.

Summary

Involving a lithogenetic analysis to the model of groundwater flow dynamics in the margin of large river valley. The aim of the study is to determine the impact of construction of a new building with deep foundations on the groundwater flow dynamics nearby. The study area is located in densely populated district of Warsaw. We analyse geomorphological features and geological setting that are seriously obliterated by the development of the big city on the margin of large river valley and its slope. We use the Visual ModFlow model. The results of our study indicate on the need of involving a drainage system to the construction site in order to

control the groundwater flow dynamics, and therefore mitigate the risk of structural failures of buildings located nearby. They have foundations built on expansive soils susceptible for volume change and landslide.

Authors' address:

Tomasz Falkowski, Filip Bujakowski,
Grzegorz Wierzbicki, Piotr Ostrowski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Katedra Geoinżynierii
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166
Poland
e-mail: tomasz_falkowski@sggw.pl