

HYDROGEOLOGICZNE UWARUNKOWANIA INTENSYFIKACJI POBORU WÓD NA POTRZEBY MIASTA WROCŁAWIA W REJONIE MOKREGO DWÓRU

HYDROGEOLOGICAL ASPECTS OF INTENSIFICATION OF WATER EXTRACTION FOR THE CITY OF WROCŁAW IN THE MOKRY DWÓR REGION

MAREK WCISŁO¹, SEBASTIAN BUCZYŃSKI¹, STANISŁAW STAŚKO¹,
TOMASZ OLICHWER¹, ROBERT TARKA¹

Abstrakt. Nowa koncepcja poboru wód dla miasta Wrocławia zakłada znaczące ograniczenie dostępnej powierzchni terenów wodonośnych. W nowych uwarunkowaniach konieczna jest intensyfikacja eksploatacji wody. W celu określenia wpływu nowego poboru na warunki hydrogeologiczne stworzono model numeryczny przy zastosowaniu programu Visual ModFlow. Badaniami objęto północną część terenów wodonośnych o powierzchni 6,68 km². Sumaryczny bilans modelu wyniósł 28,3 tys. m³/d. W celu określenia optymalnej wydajności systemu i zidentyfikowania źródeł zasilania przeprowadzono symulacje prognostyczne (SYM I, SYM II, SYM III, SYM IV). Prognozy polegały na coraz dalej idącej rozbudowie systemu, uwzględniając studnie działające w ramach poprzedniej symulacji (SYM I–SYM III) oraz wprowadzeniu nowych źródeł zasilania w postaci stawów oraz drenaży poziomych (SYM IV). Nowe bariery studni pozwolą zwiększyć wydajność maksymalnie z 25,9 tys. m³/d (obecnie) do 30,1 tys. m³/d. Dopiero nowe stawy oraz drenaż poziomy (65,3 tys. m³/d) pozwalają na zaspokojenie pożądanego poboru (61 tys. m³/d). W obliczu znacznej zmiany kierunków przepływu wód i wzrostu ich zagrożenia jakościowego, nowe bezpieczne rozwiązania wymagałyby rozbudowy obecnej sieci monitoringu oraz modyfikacji źródeł zasilania.

Słowa kluczowe: tereny wodonośne, modelowanie numeryczne, zaopatrzenie w wodę.

Abstract. A new concept of water abstraction is to reduce the available surface of water-bearing areas only to the municipality of Wrocław. Under the new conditions it is necessary to intensify exploitation. To determine the impact of the new abstraction on the hydrogeological conditions a numerical model has been developed using Visual MODFLOW. The study covered the northern part of the water-bearing area of 6.68 km². The total model balance was 28.3 k m³/d. To determine the optimum system performance and identify the sources of recharge, prognostic simulations (SYM I, SYM II, SYM III, SYM IV) were carried out. The forecasts rely on both ever more far-reaching expansion of the system, taking into account the wells operating under the previous (SYM I–SYM III), and the introduction of new sources of recharge in the form of ponds and horizontal drainages (SYM IV). The new barrier wells will increase the total yield of up to 25.9 k m³/d to 30.1 k m³/d. Only new ponds and horizontal drainage (65.3 k m³/d) allow meeting the desired discharge (61.0 k m³/d). As a result, we expect significant deformation of the direction of water flow and an increase in water quality risk.

Key words: water-bearing terrain, numerical modelling, water supply.

WSTĘP

Obecny system zaopatrzenia w wodę miasta Wrocławia bazuje na ujęciu infiltracyjnym Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji (MPWiK) oraz na wodach po-

wierzchniowych rzeki Oławy. Średnia wieloletnia produkcja wody pochodzenia infiltracyjnego kształtuje się na poziomie 61 tys. m³/d (w roku 2014 – 56,4 tys m³/d) oraz wód po-

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, ul. Cybulskiego 32, 50-204 Wrocław; e-mail: marek.wcislo@uwr.edu.pl, sebastian.buczynski@uwr.edu.pl, stanislaw.stasko@uwr.edu.pl, tomasz.oliczwer@uwr.edu.pl, robert.tarka@uwr.edu.pl.

wierzchniowych 60 tys. m³/d. Obszar, na którym skupiony jest pobór wód podziemnych pochodzenia infiltracyjnego, ograniczony strefą ochrony bezpośredniej, obejmuje tzw. tereny wodonośne – 1026 ha, położonych zarówno na terenie miasta Wrocławia, jak i gminy Siechnice. Nowa koncepcja eksploatacji zakłada ograniczenie dostępnej powierzchni jedynie do gminy Wrocław, czyli ok. 3,4 km² (fig. 1).

Na ujęcie infiltracyjne składa się 213 studni, zlokalizowanych na terenie miasta Wrocławia oraz 357 – na terenach gminy Siechnice. W nowych uwarunkowaniach konieczna jest intensyfikacja eksploatacji, która wymaga szczegółowej analizy warunków geologicznych, hydrogeologicznych oraz technicznych poboru wody w rejonie Mokrego Dworu. Dane, które wykorzystano pochodziły z archiwum MPWiK, Centralnej Bazy Danych Hydrogeologicznych Bank „Hydro”, a także obejmowały wyniki wierceń oraz badania rezonansem magnetycznym (MRS). Ostateczne rozwiązanie zaimplementowano do modelu hydrogeologicznego, mającego na celu odzwierciedlenie warunków hydrogeologicznych w przestrzeni 3D dla testowania wydajności systemu infiltra-

cyjnego w różnych warunkach pracy ujęcia infiltracyjnego. Dodatkowo na modelu zasymulowano alternatywne formy zasilania i drenażu, które mają na celu optymalizację wydajności ujęcia. Do stworzenia szkieletu modelu hydrogeologicznego posłużył model geologiczny (Wojewoda i in., 2015). Do badania bilansu wodnego terenów wodonośnych wskazane jest zastosowanie modelu odzwierciedlającego układ o parametrach rozłożonych, czyli znajdujący się w ściśle określonej przestrzeni (przestrzeni filtracji definiowanej przez państwowy układ odniesienia). Wśród modeli o parametrach rozłożonych w przestrzeni 3D, do najlepiej udokumentowanych należy pakiet Visual Modflow, bazujący na kodzie Modflow (McDonlad, Harbaugh, 1988), opracowany i udostępniany przez Służbę Geologiczną Stanów Zjednoczonych (USGS). Jest to kod, który w sposób możliwie kompletny symuluje procesy odpowiedzialne za kształtowanie bilansu wodnego. Konstrukcję modelu numerycznego poprzedza etap, polegający na opracowaniu ilościowym i jakościowym koncepcji funkcjonowania systemu hydrogeologicznego (tzw. model koncepcyjny).

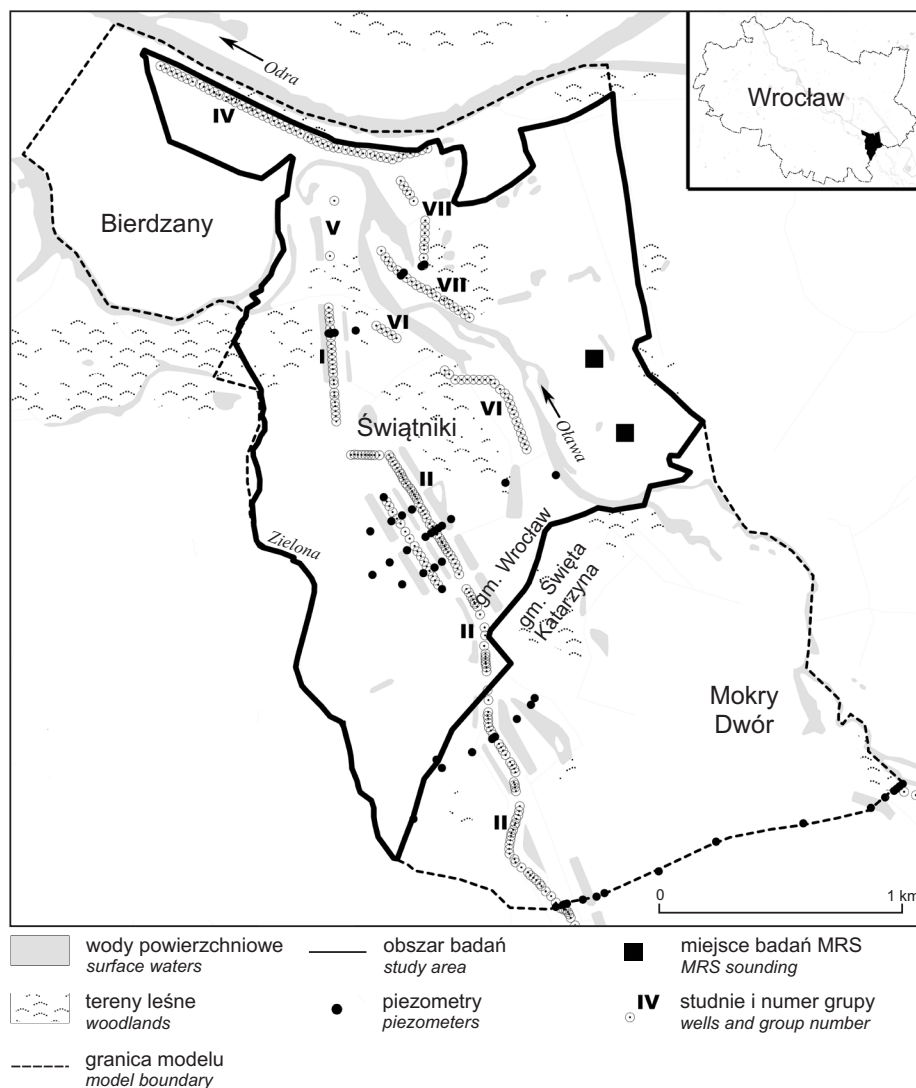


Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań

Location of the research area

MODEL KONCEPCYJNY SYSTEMU HYDROGEOLOGICZNEGO

Mianem modelu koncepcyjnego możemy określić zbiór cech, które determinują system wodonośny w zakresie podejmowanego zadania hydrogeologicznego. Model koncepcyjny stanowi preludeum konstrukcji modelu numerycznego i zawiera niejako instrukcje jego realizacji przez zdefiniowanie zakresu danych wejściowych i sposobu ich wprowadzenia. Według Andersona i Woessnera (1992) w ramach konstrukcji modelu koncepcyjnego określa się: układ zasilania przepływu i drenażu wód podziemnych, granice systemu hydrogeologicznego oraz dokonuje się schematyzacji parametrów hydrogeologicznych. Do odzwierciedlenia warunków zdecydowano się na budowę modelu jednowarstwowego.

UKŁAD ZASILANIA, PRZEPIYU I DRENAŻU WÓD PODZIEMNYCH

Obszar objęty badaniami modelowymi (6,68 km²) stanowi północną część terenów wodonośnych, obszaru intensywnej eksploatacji wód podziemnych i ich sztucznego zasilania za pośrednictwem stawów, rowów infiltracyjnych i cieków powierzchniowych (fig. 2, 3). Wyodrębniono go w taki sposób, aby objąć modelem tereny wodonośne w gra-

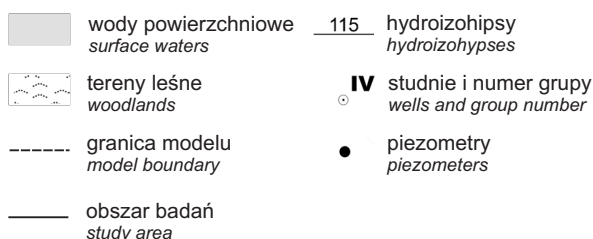
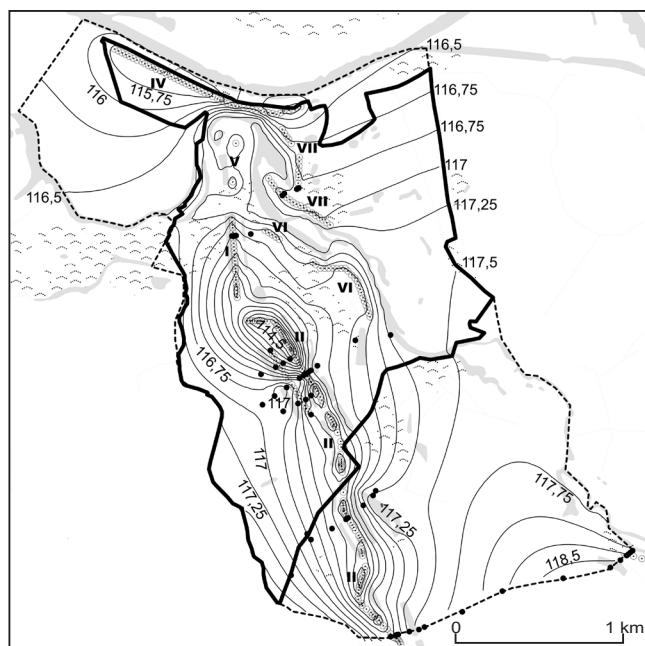


Fig. 2. Tereny wodonośne w granicach obszaru badań

Water-bearing terrain in the research area

nicach Wrocławia oraz umożliwić hydrodynamicznie uzasadnione posadowienie jego granic.

Przepływ wód podziemnych na obszarze badań związany jest z jedną czwartorzędową warstwą wodonośną o genezie aluwialnej, która jest podścielona glinami morenowymi zapewniającymi izolację od głębszych poziomów.

Na analizowanym obszarze wody podziemne występują w warstwie wodonośnej czwartorzędowej o niskiej miąższości od 6,4 m, lokalnie do 13,4 m. Zwierciadło swobodne wód podziemnych lub lokalnie napięte układa się na głębokościach od 0,8–1,2 m w dolinie Oławy, do 2,0–3,5 m w rejonach wysoczyzn. Przepływ wód podziemnych następuje zgodnie z biegiem doliny rzeki Oławy oraz ku Odrze, a wysokości hydrauliczne zmieniają się od 119,5 do 116 m n.p.m (fig. 2). Warstwa ma dwudzielny charakter: w stropie przeważnie dominują piaski średnio- i drobnziarniste, a w partiach spągowych – pospółki i żwiry. Na znacznych fragmentach powierzchni terenu występują niezbyt miąższe namuły, osady glin piaszczystych i ilaste pokrywy oraz lokalnie nasypy antropogeniczne. Ze względu na dobrą łączność hydrauliczną wód podziemnych i powierzchniowych, należy się spodziewać, że stany zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego będą kontrolowane poziomem utrzymywanym w stawach infiltracyjnych, poziomem wód Odry i Oławy oraz depresjami utrzymywanymi w studniach. Na badanym obszarze istnieją 22 stawy zasilane grawitacyjnym przepływem wód (fig. 2). Ich średnia głębokość kształtuje się na poziomie 3,05 m. Do warstwy wodonośnej infiltrują również wody Odry, Oławy oraz starorzeczy. Przesączanie odbywa się na drodze pionowego przepływu przez zespół osadów dennych, których parametry w znacznym stopniu determinują intensywność procesu zasilania (fig. 3).

Parametry stawów infiltracyjnych były badane w trakcie ich modernizacji w latach 1990–1994 (Koślacz i in., 2002), wykonanej po kilkunastoletnim okresie eksploatacji. Stworzyło to okazję do analizy uwarunkowań filtracji przez osady denne zaraz po oczyszczeniu oraz w stanie przed renowacją, stanowiąc dobrą podstawę dla parametryzacji modelu mającego reprezentować ustalone warunki filtracji. Głębokość stawów wahała się w granicach 2,12–3,54 m (średnio 3,05 m).

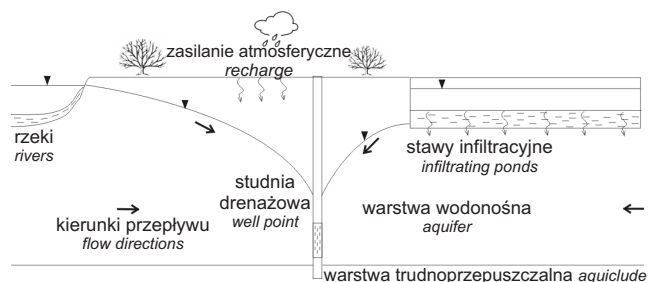


Fig. 3. Schemat modelu koncepcyjnego

Conceptual model scheme

Ustalono, że średnia miąższość osadów dennych w 39 stawach wynosiła 0,12 m. Miejscami w stawach odłożyły się osady o grubości warstwy 0,30–0,40 m. Kolmatacja strefy poddennej nie przekroczyła praktycznie 0,2 m. Średnia prędkość filtracji dna stawów po usunięciu z nich osadów wyniosła 1,92 m/d. Filtracja odbywała się w warunkach pełnego nasycenia.

Badania wykazały, że na dnie stawów powstają następujące charakterystyczne strefy:

1. Warstwa powierzchniowa osadów ma grubość od kilku do kilkunastu centymetrów i utworzona jest z luźnej, płynnej zawiesiny mineralno-organicznej.

2. Warstwa podpowierzchniowa jest utworzona z zagęszczonego, silnie uwodnionego osadu o trwałej strukturze ciała stałego, lecz niewykazujących cech diagenety. Grubość tej warstwy mieści się w przedziale od kilku do kilkunastu centymetrów.

3. Warstwa denna stawu do głębokości 20 cm wykazuje różny stopień zakolmatowania zawiesiną mineralną i organiczną.

W części stawów podczas sondowań stwierdzono duże ilości detrytusu pochodzenia roślinnego.

Pomiary prędkości infiltracji wykonane w 1990 r. na wyczyszczonych stawach wykazały, że średnia prędkość wyniosła 0,151 m/d. Wyniki badań prędkości filtracji wody w zależności od czasu trwania eksploatacji pokazały, że wartość ta cechuje się trendem malejącym. Przy obliczeniach ekstensywnej eksploatacji stawów infiltracyjnych przy ustalaniu dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych powinno się przyjmować prędkość infiltracji 0,1 m/d (Koślacz i in., 2002).

Zakładając model przepływu Darcy, można przyjąć współczynnik filtracji pionowej osadów dennych na tym samym poziomie ($k = 0,1$ m/d), a miąższość sumaryczną omawianych stref ok. 40 cm. Można również przyjąć uśredniony schemat pionowej strefowości w stawach infiltracyjnych:

- spąg osadów korytowych: 3,45 m pod poziomem lustra wody,
- miąższość osadów korytowych: 40 cm,
- współczynnik filtracji osadów korytowych: 0,1 m/d.

Zasilanie pochodzi również z infiltracji opadów atmosferycznych. Jego wielkość można oszacować na podstawie stopnia izolacji warstwy wodonośnej od powierzchni terenu,

ustalając jego wartość efektywną metodą wskaźnika infiltracji (Pazdro, Kozerski, 1990). Wartość tę wyliczono jako % opadu z 2014 r. (582 mm), który jest zbliżony do średniej dla wielolecia 2004–2014.

W zależności od litologii utworów przypowierzchniowych, przyjęto następujące wskaźniki infiltracji: piaski i żwiry: 30% (175 mm); mułki, namuły gliniaste: 10% (58 mm).

Wzdłuż stawów są rozmieszczone studnie drenujące, pracujące w grupach, w układzie lewarowym, których wydajność jest kontrolowana również sumarycznie w zespołach. W modelowanym obszarze w 2014 r. pracowało 241 studni (tab. 1, fig. 2) o łącznej wydajności 25 944,5 m³/d.

Układ hydrodynamiczny w czwartorzędowej warstwie wodonośnej kształtowany czynnikami naturalnymi uległ silnemu odkształceniu w rezultacie funkcjonowania ujęcia infiltracyjnego dla Wrocławia (studnie oraz stawy infiltracyjne). Mapa zwierciadła wód podziemnych odzwierciedla średni stan z roku kalendarzowego 2014 na podstawie miesięcznych pomiarów, łącznie w 48 dostępnych, zaniwelowanych piezometrach. Ze względu na zbieżność wyników modelu oraz stanu naturalnego, zaprezentowano układ hydrodynamiczny, stanowiący wynik kalibracji (fig. 2)

Analiza mapy hydroizohips wskazuje, że przepływ wód następuje w kierunku północno-zachodnim i w kierunku centrów drenażu, tworzonych przez studnie. Maksymalne stany zwierciadła (119,07 m n.p.m.) zanotowano w części SE, a minimalne (114,97 m n.p.m.) – w centralnej części obszaru badań. Uzyskany obraz wskazuje, że obszar obniżonego ciśnienia, związanego ze sztucznym drenażem, nie jest jednorodny i w poszczególnych studniach depresje prawdopodobnie znacznie się różnią.

OKREŚLENIE GRANIC SYSTEMU HYDROGEOLOGICZNEGO

Granice systemu hydrogeologicznego powinny zapewniać względną minimalizację wymiany wód z obszarem położonym poza systemem oraz brak sprzężeń zwrotnych przy testowaniu wymuszeń, ewentualnie stanowić obiekty, z którymi charakter wymiany wód jest rozpoznany. Obszar objęty analizą modelową obejmuje powierzchnię 6,68 km² i rozciąga się między Odrą na północy, rzeką Zieloną na zachodzie (fig. 2). Granica wschodnia ma sztuczny charakter i nawią-

Tabela 1

Parametry studni drenujących zastosowane w modelu numerycznym [m³/d]

Parameters of the wells, used for the numerical model [m³/d]

	Studnie gr I	Studnie gr II	Studnie gr III	Studnie gr IV	Studnie gr V	Studnie gr VI	Studnie gr VII	Studnie gr VIII
Liczba studni w modelu	23	109	0	49	2	27	32	0
Średnia wydajność grupy w modelu	2066,4	13 500,3	0,0	5568,6	672,9	1997,0	2139,3	0,0
Sumaryczny wydatek w 2014 r.	56 394,0							
Sumaryczny wydatek w 2014 r. w obrębie modelu (w granicach Wrocławia)	25 944,5							

zuje do zasięgu terenów wodonośnych. Granicę południową poprowadzono wzdłuż linii prądu wód podziemnych, w rejonie dobrze rozpoznanej zwierciadła za pośrednictwem piezometrów. Górną granicę stanowi powierzchnia terenu, a dolną – spąg czwartorzędowej warstwy wodonośnej.

SCHEMATYZACJA PARAMETRÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

Schematyzacja warunków hydrogeologicznych stanowi niezbędny etap realizacji badań modelowych. W jej toku określono (uogólniono) parametry warstw wodonośnych w stopniu umożliwiającym jednoznaczne określenie powierzchni strukturalnych oraz rozkładu parametrów filtracyjnych na całym obszarze modelu. Schematyzację przeprowadzono na podstawie informacji z Archiwum MPWiK we Wrocławiu, z systemów baz numerycznych Centralnego Banku Danych Hydrogeologicznych HYDRO (CBDH) oraz Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich PIG-PIB (Atlas Geologiczno-Inżynierski Wrocławia). Wykorzystano również wyniki najnowszego opracowania modelu geologicznego (Wojewoda i in., 2015) oraz sondowania MRS, pozwalające na określenie uśrednionych parametrów filtracyjnych. Informacja obejmowała wyniki wierceń i badań, przeprowadzonych w sumie w 215 otworach.

Baza danych, którą wykorzystano, jest zasilana w znacznej mierze modelem geologicznym, sporządzonym na wcześniejszym etapie niniejszego projektu. Zarówno model geologiczny, jak i hydrogeologiczny są sporządzone w państwowym układzie współrzędnych 2000 (strefa 6).

Wydzielenie i agregacja warstw wodonośnych

Na podstawie modelu geologicznego (Wojewoda i in., 2015) zidentyfikowano jedną warstwę wodonośną wieku czwartorzędowego, od spągu ograniczoną tzw. gliną szarą – pakietem glin o charakterze piaszczystym o miąższości 8–15 m. Spąg glin w analizowanym obszarze znajduje się na głęb. od 6,4 do 15,7 m. Morfologię stropu glin – kluczową ze względu na kształtowanie miąższości warstwy wodonośnej – odwzorowano na podstawie modelu geologicznego.

Agregacja polegała na zidentyfikowaniu jednej warstwy wodonośnej o jednorodnym w pionie współczynniku filtracji w obrębie utworów piaszczystych, charakteryzujących się

Tabela 2

Średnie wartości współczynnika filtracji [m/d] na podstawie wyników analiz sitowych w nowo odwierconych otworach

Averaged hydraulic conductivities [m/d] based on sieve analysis in newly drilled boreholes

Pospółka	Piasek dr.	Piasek śr.	Piasek gr.	Żwir
36,82	3,58	15,96	26,39	94,85

pewną warstwową strefowością. Warstwa zachowuje ciągłość na całym obszarze badań i jest zbudowana przeważnie z utworów o charakterze żwirów i pospółek w spągu i z piasków w stropie. Rozpoznanie współczynnika filtracji na podstawie próbnych pompowań daje najbardziej wiarygodną, uśrednioną informację. Uzupełniono ją o dane z analiz sitowych, zrealizowanych w związku z wykonaniem najnowszych wierceń. Współczynnik filtracji z przesiewu określano osobno dla obu wydzielen: piaszczystych i żwirowych.

Dla każdego otworu wykonanego w ramach opracowania liczono średnie ważone współczynników filtracji otrzymanych z analiz sitowych na podstawie wzoru „amerykańskiego” (tab. 2). Dla wydzielen, dla których wykonano analizy, przyjęto współczynnik k zgodny z ich wynikiem, a dla wydzielen analogicznych, dla których analiz nie wykonano – przyjęto średnią typową dla danej litologii uzyskaną z analiz sitowych [m/d]:

Otrzymano w ten sposób średni współczynnik filtracji, porównywalny z tym z próbnych pompowań w otworze P1 ($k_{\text{pomp}} = 40,8$ m/d, $k_{\text{sit}} = 46,8$ m/d).

Rozkład współczynnika filtracji

Informacje na temat współczynnika filtracji są stosunkowo bogate, ponieważ próbne pompowania zrealizowano w licznych studniach drenujących. Dla 127 badań otrzymano średnią 39,7 m/d, przy względnie niskim zróżnicowaniu ($k_{\text{min}} = 9,5$ m/d, $k_{\text{max}} = 76,2$ m/d).

W trakcie schematyzacji rozkładu współczynnika filtracji dokonano interpolacji współczynnika między poszczególnymi punktami, stosując metodę prostego krigingu. Analiza błędów interpolacji wskazała, że testowanie kierunkowości nie przyniosło pozytywnego efektu i nie ma podstaw do określenia anizotropii.

MODEL NUMERYCZNY

Celem badań modelowych było:

- określenie bilansu wodnego obszaru objętego opracowaniem, w szczególności zidentyfikowanie źródeł zasilania studni drenujących,
- określenie kierunków przepływu przez kompletne odwzorowanie pola hydrodynamicznego obszaru objętego analizą,

- wykonanie symulacji, mających na celu analizę alternatywnych rozwiązań systemu zasilania i drenażu antropogenicznego w celu optymalizacji pracy ujęcia.

Model numeryczny zrealizowano przy użyciu programu Visual ModFlow ver. 4.3, jednego z najlepiej zweryfikowanych pakietów wykorzystywanych do modelowania przepływu wód podziemnych w systemach porowych.

DYSKRETYZACJA PRZESTRZENI FILTRACJI I WARUNKI BRZEGOWE

Dyskretyzacji dokonano siatką o stałym kroku wynoszącym 12,5 m, tworząc układ 302 kolumn i 297 wierszy (łącznie 89 694 bloki obliczeniowe). Nie zadawano warunków początkowych, ponieważ model ma charakter stacjonarny. Model skonstruowano na bazie mapy w skali 1:10 000, w układzie odniesienia PUGW 2000 (6).

Najważniejszymi informacjami określanymi w węzłach są zewnętrzne i wewnętrzne warunki brzegowe modelu (fig. 4).

Warunek brzegowy II rodzaju (Neumana), typu $Q = 0$, przyjęto na granicy dolnej modelu (strop glin szarych). Warunek brzegowy II rodzaju, typu $Q = \text{const.}$, przyjęto w postaci stałego zasilania powierzchniowego jako infiltrację efektywną, przyjmując procentowy rozkład opadów z 2014 r. (582 mm). W zależności od litologii utworów przypowierzchniowych, przyjęto następujące wskaźniki infiltracji: piaski i żwiry: 30% (175 mm), mułki, namuły gliniaste: 10% (58 mm). Warunki brzegowe III rodzaju (mieszane)

zastosowano w celu odwzorowania wpływu zwierciadła wody powierzchniowej na poziom wód podziemnych oraz wpływu granic zewnętrznych. Warunkiem brzegowym III rodzaju odwzorowano rzeki Odra i Oława, stawy infiltracyjne i ciek Zielona.

Przy określaniu parametrów warunku brzegowego dla stawów infiltracyjnych, zastosowano uśrednione warunki filtracji podyktowane schematem nakreślonym na etapie konstrukcji modelu koncepcyjnego:

- spąg osadów korytowych: 3,45 m pod poziomem lustra wody,
- miąższość osadów korytowych: 40 cm,
- współczynnik filtracji osadów korytowych: 0,1 m/d.

KALIBRACJA MODELU

Kalibracja przeprowadzono metodą kolejnych przybliżeń. Celem kalibracji było uzyskanie zgodności zwierciadła w 42 otworach, tworzących jednolity układ hydrodynamiczny reprezentujących stan średni z 2014 r. (fig. 2). Średni bez-

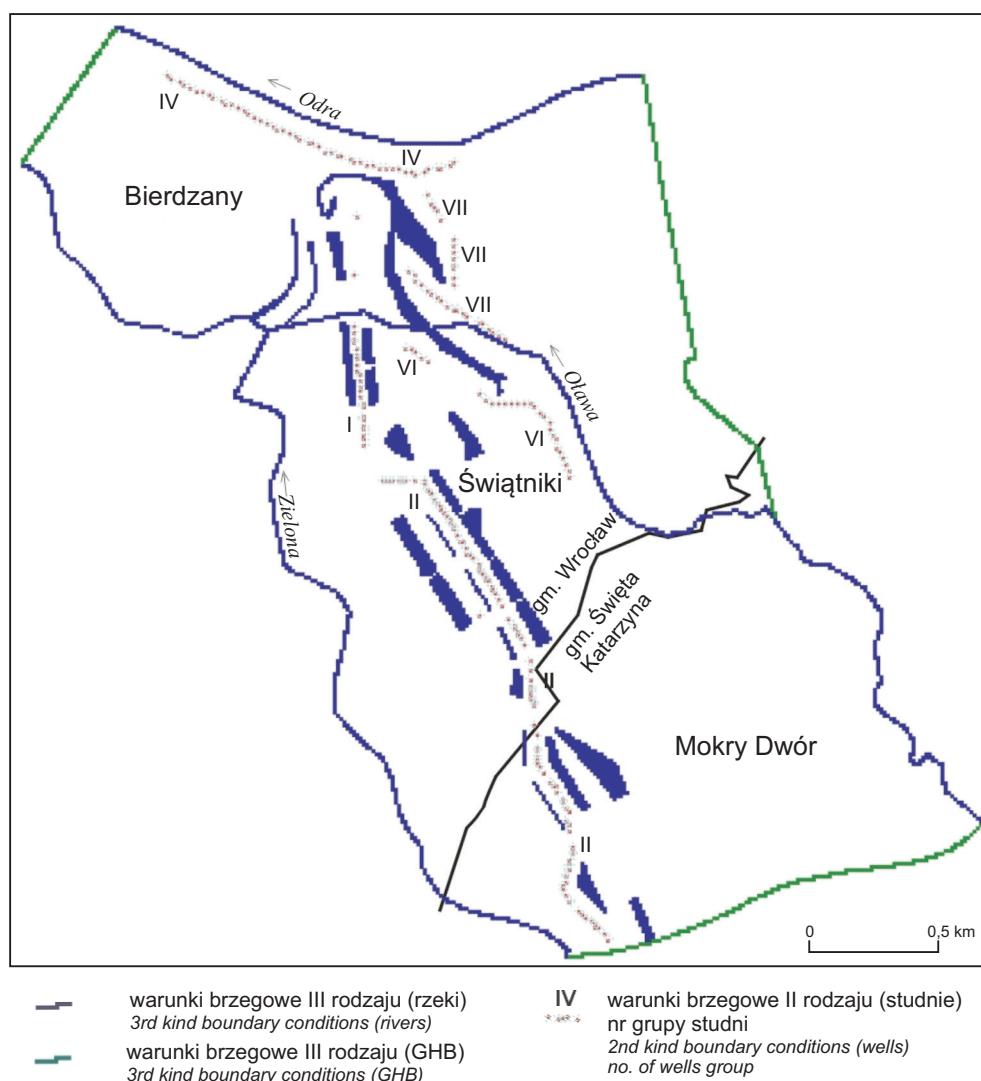


Fig. 4. Warunki brzegowe modelu numerycznego

Boundary conditions of the numerical model

względny błąd dopasowania modelu do warunków rzeczywistych wyniósł 0,22 m, maksymalny – 0,56 m (fig. 5). Uzyskaną zgodność należy uznać za zadawalającą.

W wyniku kalibracji zmieniono rozkład współczynnika filtracji (k) poziomu czwartorzędowego na obszarze dobrego rozpoznania zwierciadła. Zmiany te, ze względu na dobre rozpoznanie rozkładu „ k ”, nie były znaczne i ograniczone do zakresu typowego dla badanego obszaru. Zmiany dotyczyły rejonu piezometrów, zlokalizowanych przy południowej granicy obszaru badań. Modyfikacje polegały na obniżeniu oraz podniesieniu współczynnika filtracji. Jego wartość średnia pozostała na poziomie zbliżonym do pierwotnego.

Wynikowy rozkład zwierciadła zobrazowano na figurze 2. Najwyższe stany (ponad 118,5 m n.p.m.) otrzymano w SE części modelu. Wysokości hydrauliczne obniżają się na północ – w stronę doliny Odry. Dominującą formą drenażu stanowią zespoły studni, w których dochodzi do obniżenia do rzędnych ok. 115,7 m n.p.m. w rejonie centralnym studni grupy II. Kierunki przepływu zostały zdominowane przez studnie, co manifestuje się w powstaniu rozległego leja depresyjnego, obejmującego niemal cały obszar badań i rozciągającego się w kierunku SSE–NNW.

WYNIKOWY BILANS MODELU

Sumaryczny bilans modelu (tab. 3) wynosi ok. 28,3 tys. m³/d. Dodatnia strona bilansu jest zdeterminowana (85%, ok. 24 tys. m³/d) zasilaniem z wód powierzchniowych (w tym stawów infiltracyjnych). Po stronie ujemnej podobnie kształtuje się udział studni drenujących (92%, ok. 25,9 tys. m³/d).

Otrzymany bilans wskazuje, że granice zewnętrzne modelu o sztucznym charakterze (przepływy boczne) mają stosunkowo niski wpływ na jego bilans, co obniża niepewność obliczeń.

Poniżej przeanalizowano rolę poszczególnych rodzajów wód powierzchniowych w kształtowaniu zasilania systemu hydrogeologicznego.

Układ hydroizohips wskazuje, że depresja wywoływana przez studnie dociera niemal do wszystkich granic modelu, intensyfikując napływ wód z rzek Odry, Oławy oraz Zielonej, które definiują te granice. Należy przypuszczać, że depresja może przechodzić pod dnem koryta, szczególnie w przypadku cieku Zielona – stosunkowo płytkiego i mogącego cechować się znaczną kolmatacją koryta ze względu na powolny przepływ. Niestety, nie ma badań dostarczających wiarygodnej informacji pozwalającej na określenie przewodności osadów korytowych. W tym świetle, zasilanie z Zielonej należy traktować jako sumę infiltracji wód powierzchniowych i dopływu bocznego – spoza obszaru badań.

Najistotniejszymi źródłami zasilania z wód powierzchniowych (tab. 4) są stawy infiltracyjne (44%, 10,6 tys. m³/d) oraz Oława (40%, 9,6 tys. m³/d). Mniej istotną rolę odgrywają Odra oraz Zielona (wraz z dopływem bocznym). Infiltracja opadów atmosferycznych (2,1 tys. m³/d) stanowi wobec wód powierzchniowych znikome źródło zasilania. Opisane proporcje między poszczególnymi elementami wskazują, że sezonowość i zmiany roczne opadów nie mają bezpośredniego wpływu na wydajność studni.

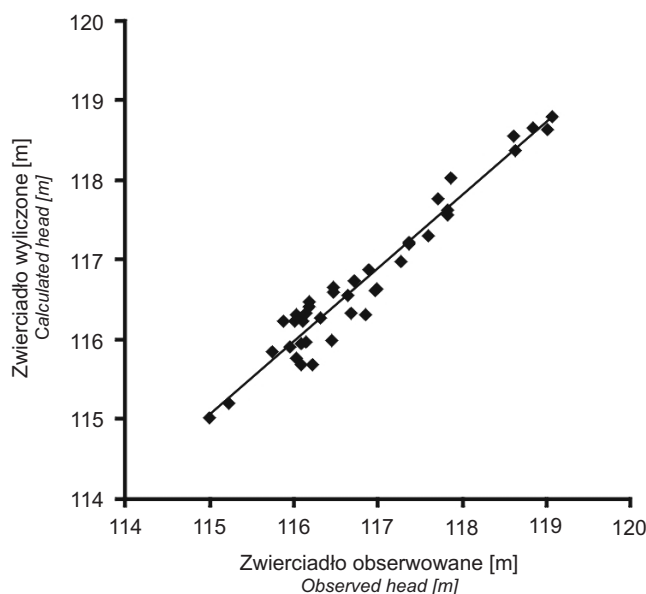


Fig. 5. Porównanie zwierciadła obserwowanego i wyliczonego

Błąd maksymalny: –0,561 [m] w II_9/A. Błąd minimalny: –0,005 [m] w II_6/A. Błąd średni bezwzględny: 0,218 [m]

Observed vs calculated hydraulic heads

Max. Residual: –0.561 [m] at II_9/A. Min. Residual: –0.005 [m] at II_6/A. Abs. Residual Mean: 0.218 [m]

Tabela 3

Bilans wodny modelu po kalibracji
Water balance of the model after calibration

	Dopływy		Odpływy	
	[m ³ /d]	[%]	[m ³ /d]	[%]
Zasilanie	2 148,5	7,6		
Wymiana z wodami pow. (w tym stawy)	24 016,4	84,9	2 352,6	8,3
Studnie	0,0	0,0	25 944,2	91,6
Przepływ boczny	2 127,0	7,5	12,9	0,0
Suma	28 292,0	100,0	28 309,7	100,0
Rozbieżność	17,7	0,1		

Tabela 4

Udział wód powierzchniowych w zasilaniu terenów wodonośnych
Surface water participation in the recharge of water-bearing terrain

Wody powierzchniowe	Zasilanie [m ³ /d]	Udział [%]
Odra	2389	10
Oława	9581	40
Zielona	1401	6
stawy	10646	44

PROGNOZY INTENSYFIKACJI EKSPLOATACJI

W celu określenia optymalnej wydajności systemu i zidentyfikowania źródeł zasilania dla nowo ukształtowanego układu hydrodynamicznego analizowanego rejonu przeprowadzono symulacje prognostyczne. Ze względu na niskie niezbędne nakłady inwestycyjne, początkowo przeanalizowano usytuowanie nowych ciągów studni drenujących przy uwzględnieniu aktualnie funkcjonujących źródeł zaopatrzenia (Odry, Oławy i stawów infiltracyjnych). Wstępnie przeanalizowano trzy warianty. W pierwszej wersji (SYM I) wzbogacono istniejącą infrastrukturę o barierę studni zlokalizowaną wzdłuż Odry (gr. IVa). W drugim z testowanych wariantów przedłużono ciąg studni wzdłuż Oławy (gr. VIa), do granic analizowanego obszaru (SYM II). Trzecia symulacja polegała na dalszej rozbudowie systemu studni (VIB) wzdłuż Oławy i południowo-wschodniej granicy modelu. Ponieważ nowo ukształtowany układ depresji wpłynie na cały bilans obszaru, nie tylko na zwiększenie zasilania, należy model przygotować na tego typu symulację. W tym celu studnie, wprowadzone jako warunek brzegowy II rodzaju (tzw. wells), zamieniono na warunek III rodzaju typu „drain”. Pierwszy z nich „wymuszał” otrzymanie określonej wydajności przy zmiennym zwierciadle, a drugi „wymusza” poziom zwierciadła, pozwalający badać dopływ do studni. Poniżej zamieszczono [tabelę 5](#), w której opisującą wydajności poszczególnych zespołów studni przy różnych wariantach symulacyjnych oraz w sytuacji aktualnej.

Każda z kolejnych symulacji uwzględnia studnie działające w ramach poprzedniej, polega więc na coraz dalej idącej rozbudowie systemu.

Dla chwili obecnej i dla systemu zaopatrzenia w wodę działającego w reżimie zgodnym ze stanem średnim w 2014 r. otrzymano wydajność wynoszącą 25 949 m³/d, czyli wynik niemal identyczny z wydajnością rzeczywistą (25 945 m³/d). Świadczy to o skutecznej implementacji warunków brzegowych modelu i jego przygotowaniu do symulacji.

Przy włączeniu do eksploatacji nowych studni, które zlokalizowane byłyby wzdłuż Odry, stanowiąc kontynuację grupy 4, przewiduje się wzrost sumarycznej wydajności o 2325 m³/d do 28 274 m³/d, czyli o ok. 9%.

Włączenie dodatkowych studni, zaprojektowanych wzdłuż Oławy (do granic modelu) pozwoliłoby osiągnąć wydajność 30 086 m³/d, co w porównaniu z 2014 r. stanowi wzrost o 4137 m³/d (ok. 16%).

Dalsze poszerzenie zasięgu eksploatacji, zgodnie z symulacją III, pozwoliłoby na uzyskanie wydajności 35 724 m³/d (wzrost o 38%).

Szczegółowe wyniki symulacji wskazują, że nowo powstałe bariery studni (IVA, VIA, VIB) wyraźnie wpływają na studnie już istniejące, wywołując spadek wydajności. Ewentualny wyższy wzrost wydajności sumarycznej wymagałby rozbudowy systemu zasilania, gdyż obecny, w połączeniu z symulowanymi wariantami rozbudowy wykorzystuje w zasadzie już wszystkie dostępne wody powierzchniowe jako źródło zasobów.

Z powodu braku zaspokojenia niezbędnej wydajności (ok. 61 tys. m³/d), przeprowadzono symulację (SYM IV) powiększenia istniejącego systemu o nowe stawy infiltracyjne oraz ciągi drenarskie, służące ujmowaniu infiltrujących wód, zgodnie z założeniami:

Tabela 5

Prognozowana wydajność [m³/d] systemu studni drenujących w różnych wariantach jego rozbudowy
Predicted discharge [m³/d] of the system of wells for different variants of its development

Grupa studni	gr I	gr II	gr III	gr IV	gr IVA	gr V	gr VI	gr VIA	gr VIB	gr VII	gr VIII	Suma
Średni wydatek w 2014 r.	2066	18 702	10596	5569	–	673	1997	–	–	2139	14 651	56 394
Liczba studni w grupie	23	151	poza modelem	49	–	2	27	–	–	32	poza modelem	
Średnia wydajność 1 studni	90	124	–	114	–	336	74	–	–	67	–	
Liczba studni w modelu	23	109	–	49	–	2	27	–	–	32	–	
Średnia wydajność grupy na obszarze objętym opracowaniem (2014)	2066	13 500	–	5569	–	673	1997	–	–	2139	–	25 944
Wyniki modelu	2083	13 508	–	5575	–	667	1997	–	–	2119	–	25 949
Wyniki modelu (SYM I)	2083	13 507	–	5433	2606	667	1976	–	–	2002	–	28 274
Wyniki modelu (SYM II)	2082	13 367	–	5434	2614	667	1859	2061	–	2002	–	30 086
Wyniki modelu (SYM III)	2082	13 287	–	5434	2613	667	1858	1743	6038	2002	–	35 724

Tabela 6

Prognozowana wydajność systemu studni drenujących w różnych wariantach jego rozbudowy (SYM IV) [m³/d]

Predicted discharge of well points system in different variants of development (SYM IV) [qm/d]

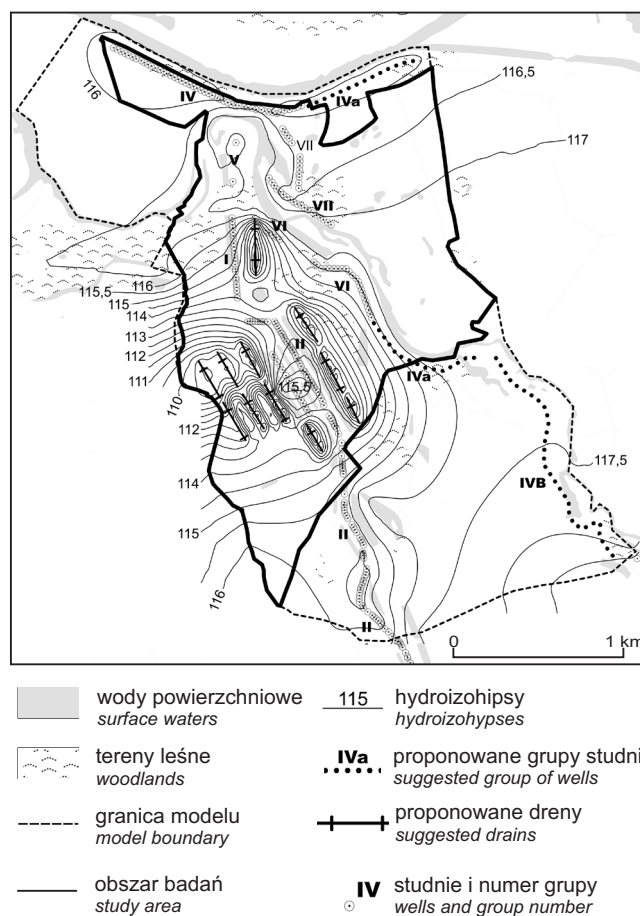
Grupa studni	gr I	gr II	gr IV	gr IVA	gr V	gr VI	gr VII	Nowy system	Suma
Średni wydatek w 2014 r.	2066	18 702	5569	–	673	1997	2139	–	31 146
Liczba studni w grupie	23	151	49	–	2	27	32	–	
Średnia wydajność 1 studni	90	124	114	–	336	74	67	–	
Liczba studni w modelu	23	109	49	–	2	27	32	–	
Średnia wydajność grupy na obszarze objętym opracowaniem (2014)	2066	13 500	5569	–	673	1997	2139	–	25 944
Wyniki modelu	2083	13 508	5575	–	667	1997	2119	–	25 949
Wyniki modelu (SYM IV)	0	4 757	5432	2612	658	329	1994	49 505	65 287

- ciągi drenarskie będą ułożone ok. 1,5 m nad spągiem warstwy wodonośnej,
- nowe dreny i stawy będą zlokalizowane w obszarach korzystnych pod względem budowy geologicznej (Wojewoda i in., 2015).

Symulacja modelowa wskazuje, że opisywana rozbudowa pozwoli na eksploatację na poziomie 65 287 m³/d. Jest to wydajność pozwalająca na zaspokojenie potrzeb MPWiK we Wrocławiu. Rozdział wód między poszczególne grupy studni przedstawia się następująco:

Rozbudowanie systemu zasilająco-drenującego MPWiK o pięć nowych stawów oraz ciągi drenarskie w efekcie pozwala na pobór wód z wysoką wydajnością (ok. 65,3 tys. m³/d). Depresje wygenerowane tą metodą doprowadzają do spadku wydatku z pozostałego (obecnie funkcjonującego) obszaru (tab. 6). W przypadku studni gr. I dochodzi nawet do spadku zwierciadła poniżej aktualnego poziomu w studniach i zaniku dopływu. Wyraźnie spada też dopływ związany z grupami nr II i VI. W symulacji funkcjonuje również projektowany ciąg studni IVA. Po osiągnięciu wymaganej wydajności, nie byłoby potrzeby również w tym rejonie prowadzić kosztownej instalacji drenażu poziomego.

Nowo ukształtowany układ przepływu (SYM IV) zobrazowano na mapie (fig. 6). Dochodzi do pogłębienia antropogenicznych odkształceń pola hydrodynamicznego z zaznaczającą się głęboką depresją rzędu 8 m w zachodniej części obszaru badań.

Fig. 6. Wynik symulacji poboru 65,3 tys. m³/d (SYM IV)Extraction prognosis for 65.3 k m³/d (SYM IV)

DYSKUSJA I WNIOSKI

Badania modelowe, poza zaletami, mają swoje ograniczenia. Do nich zalicza się głównie jakość danych wejściowych, takich jak dokładność pomiarów, np. położenia zwierciadła w sieci obserwacyjnej, stopień rozpoznania przepuszczalności osadów korytowych, tempo zasilania z opadów atmosferycznych, warunki brzegowe na granicach obszaru badań. Przeprowadzone symulacje wykazują znaczny stopień dokładności odwzorowania warunków hydrogeologicznych. Posłużono się szerokim zakresem danych wejściowych dotyczącym współczynnika filtracji, przewodności osadów dennych oraz stanów zwierciadeł. Posiadano informacje o stanach średniorocznych z licznych punktów badawczych. Mocną stroną modelu koncepcyjnego jest zastosowanie szczegółowo opracowanej budowy geologicznej. Do dyskusyjnych należy zaliczyć informacje dotyczące przewodności osadów dennych Odry oraz Oławy, jednak parametry te podlegały tarowaniu na podstawie licznych punktów kalibracyjnych, nie powinny więc znacząco wpływać na wiarygodność wyników. Ujęcia infiltracyjne stanowią skomplikowany hydrodynamicznie system blisko położonych źródeł zasilania i drenażu, dlatego modelowanie tego typu obiektów wymaga znajomości wielu parametrów. Na jakość końcowych prognoz wpływać będą parametry słabo rozpoznane. Zazwyczaj są to osady denne cieków naturalnych, ponieważ są metodycznie trudne do rozpoznania i podlegają dynamicznym zmianom w czasie.

Nie można nie wspomnieć o pewnych uwarunkowaniach i możliwych utrudnieniach, gdy rozważa się zagadnienie wzrostu poboru wód z warstwy wodonośnej.

Tereny wodonośne Wrocławia i ujęcia infiltracyjnego stanowią fragment Głównego Zbiornika Wód Podziemnych GZWP 320 „Dolina Odry”. Zasoby dyspozycyjne wód podziemnych w GZWP 320 o powierzchni 240 km², obejmujące obszary infiltracyjne MPWiK, wynoszą 41 020 m³/d (Krawczyk i in., 2015). Oznacza to, że eksploatacja wód podziemnych klasycznymi metodami (zwykłymi ujęciami) z fragmentu miasta o powierzchni 6 km² (obszar modelowania) nie może być proporcjonalnie wyższa niż kilka (2–5 tys.) m³/d. Już wcześniejsze badania modelowe wykazały, że zasoby dynamiczne wód podziemnych obszarów ujęcia infiltracyjnego wynoszą maksymalnie 15 894 m³/d (Szczepiński, 2008). Morasiewicz w dokumentacji z 1970 r. dla ujęć hory-

zontalnych podaje dokładne wyniki badań pompowań w rejonach Na Grobli (Bierdzany) i Świątniki, z których wynika, że maksymalne wydajności studni rzędu 21,3 m³/h powodowały znaczne obniżenia zwierciadła wody do 5,28 m.

Tematem opracowania są zagadnienia ilościowe, niemniej jednak, nie można pomijać jakości wód. Wody infiltracyjne wrocławskich terenów wodonośnych, dzięki kilkutygodniowemu przebywaniu w piaszczysto-żwirowych utworach, nabierają cech wód podziemnych. Czas przepływu wody przez stawy, strefę aeracji i saturacji do studni ujęcia sięga 50–110 dni (Ciężkowski i in., 1989). Dzięki temu ulega ona renaturalizacji i stanowi dobry surowiec do dalszego uzdatniania jako woda podziemna.

Wzmożona i nadmierna eksploatacja na tak ograniczonej powierzchni, wytwarzanie głębokich lejów depresji przy wysokiej eksploatacji rzędu 40–50 tys. m³/d mogą doprowadzić do negatywnych zmian jakości wód, objawiających się znacznym wzrostem zawartości żelaza, manganu i innych substancji. Głęboki lej depresji, przekraczający połowę słupa wody, stanowi potencjalne źródło zaburzenia równowagi hydrochemicznej (Macioszczyk, Dobrzyński, 2002). U uruchomienie nowych punktów poboru wzbudza nowe kierunki napływu wód z rejonów zachodnich, leżących poza terenami wodonośnymi, pokrytych zabudową mieszkalną oraz usługową. W świetle przytoczonych faktów, pozyskanie żądanej ilości zasobów (ok. 61 tys. m³/d) z badanego obszaru, przy zachowaniu systemu eksploatacji zbliżonego do obecnego, jest obciążone znacznym ryzykiem. Prawdopodobne jest pogorszenie jakości wód infiltracyjnych w wyniku ekspansji strefy aeracji oraz niekorzystne odkształcenie aktualnego układu hydrodynamicznego. Należy się liczyć z możliwością napływu wód gorszej jakości z nowo ukształtowanych obszarów alimentacyjnych, co może przyczynić się do trwałego zanieczyszczenia warstwy wodonośnej. Na obecnym etapie badań nie można wykluczyć, że pożądana wydajność z nowego, ograniczonego obszaru jest możliwa do osiągnięcia z zachowaniem bezpiecznych ograniczeń, np. za pomocą studni promienistych. Ze względu na wysoki stopień komplikacji pola hydrodynamicznego, nowe rozwiązania powinny być wstępnie weryfikowane na podstawie modelu hydrogeologicznego oraz wyników monitoringu.

LITERATURA

- ANDRESON M., WOESSNER W., 1992 — Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, New York.
- CIEŻKOWSKI W., KRYZA J., POPRAWSKI L., ROSZAK W., 1989 — Pochodzenie i wiek wód rejonu ujęć wodociągowych Wrocławia w świetle wstępnych badań izotopowych tlenu i wodoru. Materiały Konferencji nt. „Alternatywne źródła zaopatrzenia Wrocławia w wodę”, Wrocław.
- KOŚLACZ R. (red.), 2002 — Koncepcja modernizacji i rozbudowy ujęć infiltracyjnych dla miasta Wrocławia. IMS, Wrocław.
- KRAWCZYK J., MAJDRAŁA D., HORBOWY K., RUSS D., ZAWISTOWSKI K., WOJTKOWIAK A., BIEL A., 2015 — Dodatek do dokumentacji hydrogeologicznej zasobów wód podziemnych w utworach czwartorzędu, trzeciorzęd i triasu rejonu Niecki Wrocławskiej (II etap) z uwzględnieniem GZWP. PiG, Wrocław.

- MACIOSZCZYK A., DOBRZYŃSKI D., 2002 — Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych. Wydaw. Nauk. PWN, Warszawa.
- McDONALD M.G., HARBAUGH A.W., 1988 — A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1.
- MORASIEWICZ J., 1970 — Sprawozdanie z badań hydrogeologicznych na terenie projektowanych studni horyzontalnych w rejonie ujęcia wodociągów miejskich Wrocławskie Przed. Hydrogeologiczne we Wrocławiu [maszynopis].
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 — Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- SZCZEPIŃSKI J., 2008 — Model matematyczny do oceny zasobów wód podziemnych w rejonie wrocławskiego ujęcia infiltracyjnego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **431**: 209–218.
- WOJEWODA J., GOTOWAŁA R., SOBCZYK A., KOWALSKI A., 2015 — Dokumentacja i model budowy geologicznej na potrzeby intensyfikacji infiltracji na terenach wodonośnych. Raport dla MPWIK, Fundacja dla Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.

SUMMARY

Drinking water for Wrocław is derived from several hundreds of wells located in the water-bearing terrain. The source of recharge is mostly artificial and represented by surface water. There is a necessity to reduce the intake area while maintaining the current water consumption. To estimate if the new structure of water production is possible, a numerical model was constructed, based on a detailed geological model. The model allows identifying and quantifying the main sources of recharge: ponds, the Odra River and the

Oława River. The model produces also solutions for four variants of extraction levels. The highest level (65.3 k m³/d) meets the requirements, but it invokes unacceptable changes in the hydrogeological conditions: a high depression and inflow of groundwater from not recognized terrains. In this case, intensification of water production by the present-day structure of intakes is not possible without threats for the water quality.

