

Jacek Gurwin*, Justyna Zapart**

* Zakład Hydrogeologii Stosowanej ING (*Pracownia Modelowania Procesów Hydrogeologicznych*),
Uniwersytet Wrocławski

Pl. Maxa Borna 9, 50-205 Wrocław

** Instytut Inżynierii Środowiska

Zakład Inżynierii Wodnej i Hydrotransportu

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

ul. Pl. Grunwaldzki 24, 50-365 Wrocław

* Department of Applied Hydrogeology (*Laboratory for Modelling of Hydrogeological Processes*),
Institute of Geological Sciences, Wrocław University

** Institute of Environmental Engineering Wrocław University of Environmental and Life Sciences

ANALIZA KRAŻENIA WÓD PODZIEMNYCH NA NUMERYCZNYM MODELU FILTRACJI W REJONIE UJĘCIA „SERBY” DLA MIASTA GŁOGOWA

GROUNDWATER FLOW ANALYSIS ON NUMERICAL MODEL OF THE “SERBY” WATER INTAKE FOR THE GŁOGÓW AGGLOMERATION

Streszczenie

Ujęcie „Serby” jest położone w dolinie Odry, w odległości około $4\div 7,5$ km w kierunku północnym od Głogowa. Stanowi barierę studni rozciągających się w linii SW – NE na długości 3,5 km. Budowę ujęcia rozpoczęto w latach 1968-1969. W latach 1978-1979 odwiercono 12 studni podstawowych, a aktualnie prowadzi się przemienną eksploatację 18 studni. Dla ujęcia ustalono zasoby eksploatacyjne w wysokości $Q = 1520 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji $s = 5,7\div 11,2$ m. Celem pracy jest określenie za pomocą badań modelowych struktury bilansowej wód podziemnych na obszarze wydzielonego systemu wodonośnego, przy dobrym rozpoznaniu budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych, a także wyznaczenie strefy ochrony pośredniej tego ujęcia na bazie symulacji tempa przepływu. Wykorzystanie numerycznych metod modelowych daje możliwość dokładnego wyjaśnienia przebiegu procesu filtracji oraz przewidywania skutków planowanych działań związanych z eksploatacją wód podziemnych.

Abstract

The “Serby” water intake is located within the Odra river valley in the distance of $4\div 7,5$ km to the north from Głogów. It is a barrier of wells being elongated from SW to NE with the length of 3,5 km. Building of the intake was started in the years 1968-1969. The 12 basic wells were drilled between 1978-1979 and alternately exploitation of total 18 wells is prolonged until now. Water resources have been calculated in quantity of $Q = 1520 \text{ m}^3/\text{h}$ with depression $s = 5,7\div 11,2$ m.

The aim of research was evaluating of water balance using numerical modeling concerning a good recognition of hydrogeological and geological conditions. Additionally a protection zone was going to be established on the background of pathlines simulations. Numerical modeling gives not only an opportunity of elaborating a flow process but prediction of future changes due to groundwater pumping as well.

1. WSTĘP

Obliczenia na numerycznym modelu filtracji miały na celu określenie struktury bilansowej wód podziemnych na obszarze wydzielonego systemu wodonośnego, przy dobrym rozpoznaniu budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych oraz wyznaczenie strefy ochrony pośredniej ujęcia „Serby”. Wykorzystanie numerycznych metod modelowych dało możliwość wyjaśnienia przebiegu procesu filtracji oraz przewidywania skutków planowanych działań związanych z eksploatacją wód podziemnych na badanym obszarze.

Pierwszym etapem prac było wykorzystanie systemu informacyjnego na bazie programu ArcGis oraz Surfer wraz ze zbiorem map numerycznych do przygotowania konceptualnego modelu obszaru. Umożliwiło to zgromadzenie i ujednolicenie informacji zawartych w dostępnych dokumentacjach, bazach danych, informacji zebranych podczas obserwacji terenowych oraz z dostępnych map (topograficznych, geologicznych, sozologicznych, hydrograficznych).

2. LOKALIZACJA I ZARYS WARUNKÓW GEOLOGICZNYCH I HYDROGEOLOGICZNYCH W REJONIE UJĘCIA „SERBY”

Ujęcie „Serby” zlokalizowane jest w województwie dolnośląskim, w gminie Głogów. Położone jest w odległości około 4÷7,5 km w kierunku północnym od Głogowa. Aktualnie stanowi barierę studni rozciągających się w linii SW – NE na długości 3,5 km (rys. 1). Stanowi główne źródło zaopatrzenia gminy Głogów w wodę. Obecnie eksploatacja ujęcia jest prowadzona w 18 studniach, pracujących na przemian. Przyczyny zmian wydajności studni wynikają z przeobrażeń środowiska hydrogeochemicznego, prowadzących do kolmatacji strefy przyotworowej i filtrów studni. Spadki wydajności jednostkowych są szybkie i długotrwałe [7].

Według regionalizacji hydrogeologicznej słodkich wód podziemnych omawiany teren zlokalizowany jest w regionie wielkopolskim, w subregionie pradoliny barczyko-głogowskiej [10]. Geologicznie obszar badań położony jest w obrębie monokliny przedsudeckiej. Głębsze podłoże budują skały starszego paleozoiku. Na nich niezgodnie i monoklinalnie leżą osady permo-mezozoiczne wykształcone w postaci lądowych osadów czerwonego spągowca i morskich osadów cechsztynu oraz triasu, zbudowane z piaskowców, mułowców, iłowców, wapieni, dolomitów, anhydrytów oraz margli. Podłoże podkenozoiczne pocięte

jest uskokami. Zalegają na nim, na całym obszarze, utwory neogenu. Utwory neogeniczne reprezentowane są przez: ility, piaski, żwiry oraz pokłady węgla brunatnego. Tworzą dość monotony kompleks o miąższości do około 380 m. W profilu tym występują osady datowane od oligocenu do miocenu górnego. Utwory czwartorzędowe występują na całym omawianym terenie. Urozmaicenie reliefu stropu warstwy niżej zalegającej wpływa na zróżnicowanie miąższości utworów czwartorzędowych, która waha się od 1,5 do 92 m. Większa miąższość osadów czwartorzędowych związana jest z doliną Odry. Utwory te wykształcone są w postaci osadów piaszczysto-żwirowych, glin i pyłów. Stratygraficznie reprezentują okres zlodowaceń południowopolskich, środkowopolskich i Wisły. Dna współczesnych dolin rzecznych wyścielają osady holocenu. Są to namuły, piaski, żwiry tarasów zalewowych [8].

Na terenie badawczym rozpoznano dwa piętra wodonośne: czwartorzędowe i neogeniczne. W czwartorzędowym piętrze wodonośnym wyróżnia się przypowierzchniowy poziom wodonośny oraz głębszy poziom wodonośny o charakterze użytkowym. Pierwszy z nich jest wykształcony w postaci piasków średnioziarnistych o miąższości 1,3÷7,5 m, występujących wśród iłów zastoisowych i mułów. Zwierciadło wody ma charakter swobodny i zalega na głębokości od 1,5 do 4,5 m poniżej powierzchni terenu. Poziom ten uzależniony jest od czynników atmosferycznych i bezpośrednio narażony na zanieczyszczenia. Drugi główny użytkowy poziom wodonośny w utworach plejstocennych, występuje w postaci piaszczysto-żwirowych utworów pradolinnych. Miąższość utworów wodonośnych osiąga 50-60 m, a współczynnik filtracji 9-30 m/d. W warunkach naturalnych zwierciadło wód podziemnych występowało na głębokości 0,4-1,6 m p.p.t. [7]. Cechuje go również wysoka podatność na zanieczyszczenie.

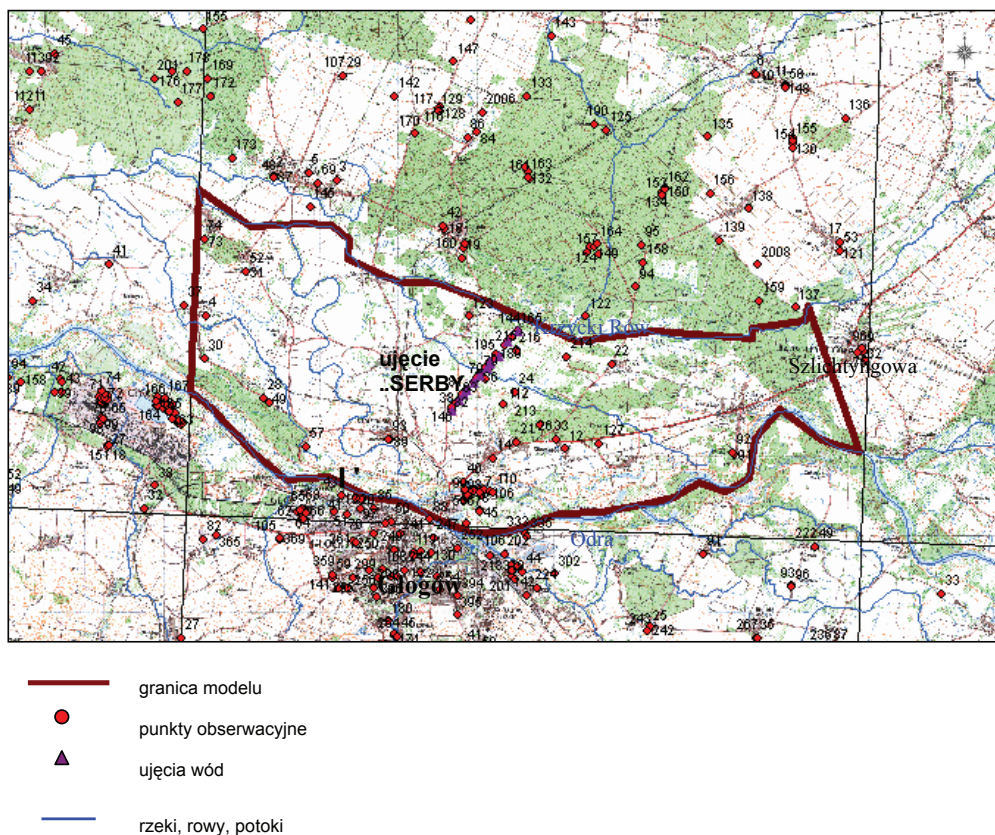
Piętro neogeniczne jest izolowane od góry kompleksem ilastym z przeławieniami osadów piaszczystych. Na omawianym obszarze wyróżnia się dwa poziomy wodonośne w utworach neogenu: miocennski i oligocennski [4]. Użytkowy charakter ma poziom miocennski, natomiast rozpoznany otworami poszukiwawczymi w południowej części obszaru oligocennski poziom wodonośny, w związku z kontaktami tektonicznymi i hydrostrukturalnymi ze skałami podłoża, jest wysokozmineralizowany i nie stanowi poziomu użytkowego [9, 11]. W dynamice wód piętra neogenicznego stwierdza się wpływ odwadniania kopalń rud miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Dotyczy to głównie warstw wodonośnych oligocenu oraz dolnego i środkowego miocenu [2, 3].

3. NUMERYCZNY MODEL FILTRACJI WÓD PODZIEMNYCH

Modelowanie numeryczne jest aktualnie najbardziej wartościowym narzędziem wykorzystywanym do rozpoznania przestrzennego układu krążenia i bilansowania wód podziemnych. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano

pakiet MODFLOW w konfiguracji GROUDWATER VISTAS w połączeniu z pakietem ArcGis. Model wykonano zgodnie ze schematem zaproponowanym przez Anderson i Woessner [1], wychodząc od modelu koncepcyjnego do budowy modelu numerycznego, który po przeprowadzonej kalibracji stał się podstawą ocen bilansowych, a także wyznaczenia strefy ochronnej ujęcia.

W celu uzupełnienia rozpoznania warunków hydrogeologicznych wykonano badania terenowe, a na podstawie profili otworów sporządzono robocze przekroje hydrogeologiczne, dzięki którym uściślono rozprzestrzenienie utworów wodonośnych. Mapami bazowymi wykorzystanymi w opracowaniu były mapy topograficzne w skali 1:50 000. Przy użyciu programów ArcMap oraz Surfer stworzono bazę danych składającą się z kilku warstw informacyjnych, tj. topografia terenu, sieć rzeczna, położenie ustabilizowanego zwierciadła wód podziemnych, spąg utworów czwartorzędowych, lokalizacja punktów pomiarowych, granice modelu.



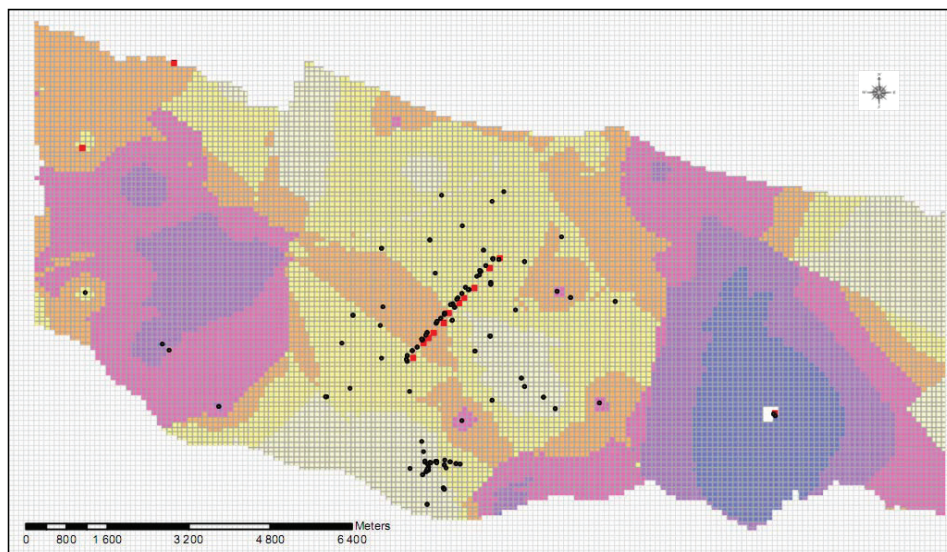
Rys. 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań

W wyniku analizy zgromadzonych materiałów wydzielono trzy warstwy modelu:

I warstwa – przypowierzchniowy poziom wodonośny obejmujący płytkie wody gruntowe, zalegający na niedużej głębokości, mający wpływ na kształtowanie dopływów wód podziemnych do użytkowego poziomu wodonośnego,

II warstwa – główny użytkowy poziom wodonośny, w postaci piaszczysto-zwirowych utworów fluwialnych i fluwiogłacjalnych,

III warstwa – słabo przepuszczalne utwory ilaste neogenu.



Objaśnienia:

- - punkty obserwacyjne
- - ujęcia wody
- - nieaktywna część modelu

współczynnik filtracji II warstwy k_x

	3,97 - 17,39
	17,39 - 25,62
	25,62 - 34,43
	34,43 - 46,55
	46,55 - 64,06
	64,06 - 107,84

Rys. 2. Mapa współczynnika filtracji II warstwy modelu

Dla pierwszego poziomu wodonośnego w utworach czwartorzędowych przyjęto swobodne zwierciadło wód podziemnych, a dla II zwierciadło napięte. Poziomy wodonośne I i II warstwy współdziałają ze sobą. Z uwagi na schemat obliczeniowy modelu wprowadzenie warstwy swobodnej dopuszcza możliwość osuszenia bloków obliczeniowych w kolejnym kroku iteracyjnym. Skutkiem tego I warstwa modelu na wysoczyznach i przy małej miąższości lub braku utworów wodonośnych przyjmuje postać nieaktywnej. Pierwszy modelowany poziom wodonośny jest zasilany na drodze infiltracji wód z opadów atmosferycznych. Zasilanie poziomu użytkowego zachodzi wskutek przesączania z warstwy pierwszej.

Przestrzenny rozkład parametrów filtracyjnych analizowano poprzez przeprowadzenie modelowania geostatystycznego. Oparto się na przygotowanych w ramach modelu hydrogeologicznego mapach rozkładu parametrów, które po przetworzeniu na postać cyfrową wprowadzono do macierzy modelu. Przyjęty ostatecznie rozkład przestrzenny parametrów filtracji ulegał niewielkim korektom w trakcie kalibracji modelu.

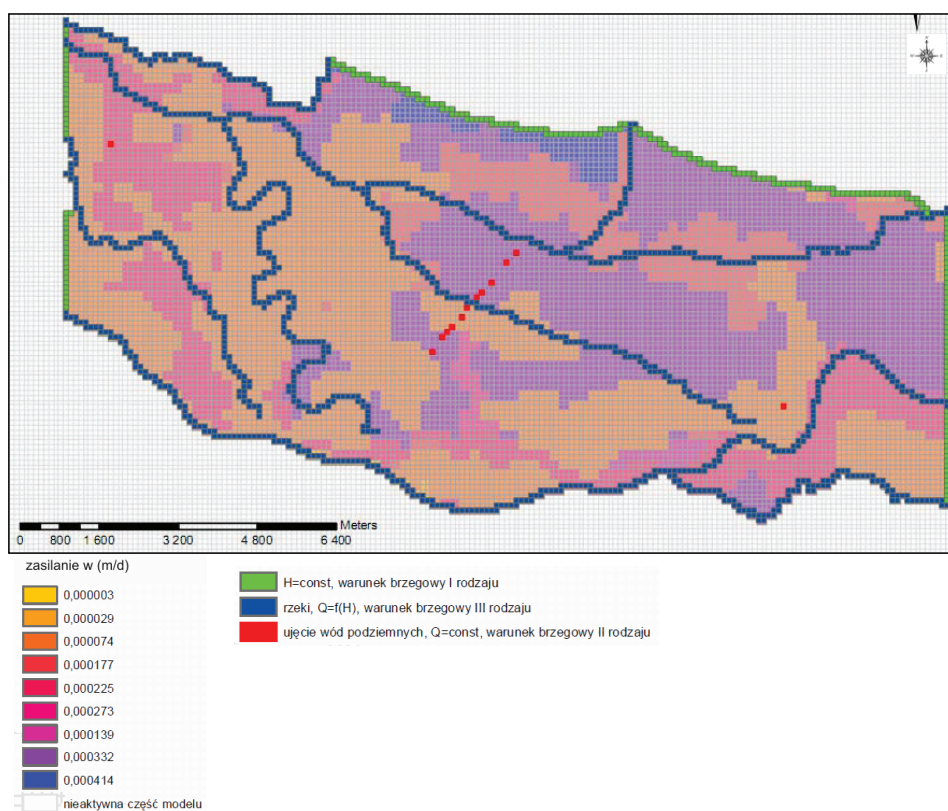
Warstwę modelu odwzorowującą użytkowy poziom wodonośny wprowadzono poprzez określenie następujących wartości:

- spąg warstwy, przyjęty na podstawie mapy powierzchni spągu poziomu wodonośnego zgodnie z modelem hydrogeologicznym i analizą geostatystyczną,
- strop warstwy, równoznaczny z obliczonym zwierciadłem wód podziemnych,
- współczynnik filtracji, zróżnicowany zgodnie z rozkładem wynikającym z analizy geostatystycznej.

W przypadku pierwszej i drugiej warstwy wartości współczynnika k zawierają się w przedziale $2\div 128$ m/d (rys. 2). Współczynnik filtracji w warstwie trzeciej słabo przepuszczalnej, z uwagi na jej jednorodność, przyjęto jednakowy na całym obszarze $0,0008$ m/d. Wartości aktualnych poborów ujęć wód podziemnych określono na podstawie danych z MPWiK w Głogowie oraz wizji lokalnych. Dane dotyczące infiltracji efektywnej, zaimportowano z regionalnego modelu utworzonego w ramach dokumentacji określającej warunki hydrogeologiczne dla ustanowienia obszaru ochronnego zbiornika wód podziemnych Pradolina Barycz-Głogów [6].

Dyskretyzację obszaru filtracji wykonano przy pomocy siatki prostokątnej o orientacji NS – EW. Aktywną część modelu, po ostatecznym ograniczeniu obszaru do powierzchni 166 km², wyznaczono za pomocą 102 wierszy i 179 kolumn, o równej szerokości x i długości y bloków 100 m. Uzyskano w ten sposób optymalnie dużą gęstość bloków, co wpłynęło na jakość obliczeń modelu. Dokonując dyskretyzacji obszaru filtracji zwrócono uwagę, by wymuszenia powodowane przez ujęcia wód podziemnych lub cieków były objęte jak najmniejszą ilością bloków obliczeniowych. Odwzorowano wszystkie główne rzeki i ich dopływy. Przy konstrukcji modelu dążono do uzyskania tzw. modelu efektywnego.

Warunki początkowe wysokości hydraulicznej zadano zgodnie z zanotowanymi pomiarami w otworach i mapami hydroizohips z modelu hydrogeologicznego (rys. 3). Określono warunki brzegowe I, II i III rodzaju. Warunki brzegowe I-go rodzaju, typu $H = \text{const}$, przyjęto zgodnie z rozpoznanymi warunkami hydrogeologicznymi. Warunek ten wykorzystano na granicach wschodniej, częściowo zachodniej i północnej. Warunek brzegowy II rodzaju, $Q = \text{const}$, zastosowano w przypadku ujęć wód podziemnych. Warunki brzegowe III rodzaju, wewnętrzne i zewnętrzne, zadano przy wykorzystaniu pakietu RIVER dla granic obszaru wyznaczonych przez koryta rzek i cieków Odra i Krzycki Rów. Zastosowanie tego modułu pozwala obliczyć przepływ wody pomiędzy ciekami, a sąsiadującą z nim warstwą wodonośną.



Rys. 3. Mapa warunków brzegowych i zasilania II warstwy modelu

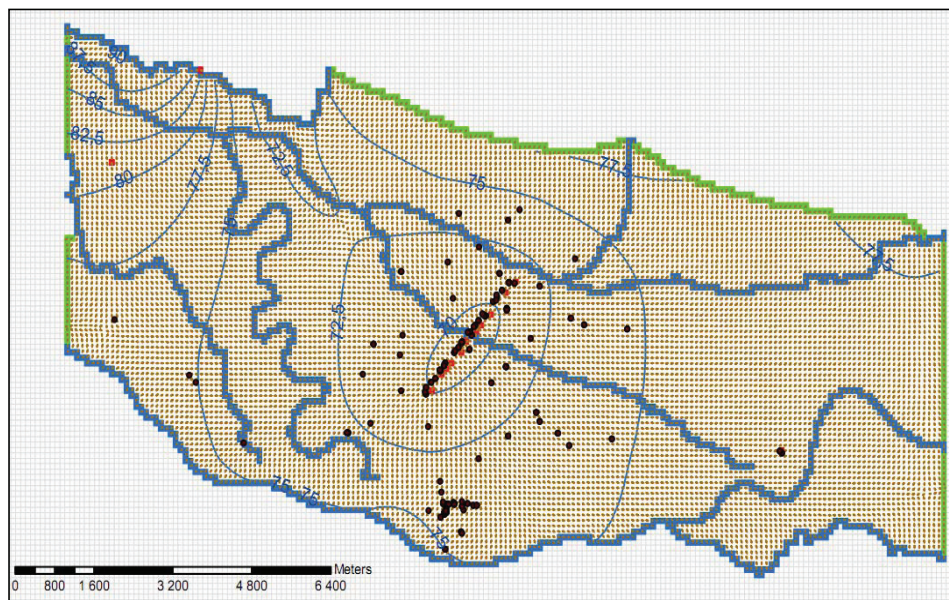
4. KALIBRACJA MODELU

Kalibrację numerycznego modelu filtracji obszaru badań wykonano zgodnie ze stanem hydrodynamicznym, wynikającym z rzędnej zwierciadła wód podziemnych w otworach hydrogeologicznych i studniach kopanych z okresu pomiarów w 2008 r. Kalibrację modelu wykonano drogą kolejnych przybliżeń, tzw. metodą prób i błędów. Przeprowadzono ją według wybranych otworów referencyjnych, kontrolując jednocześnie zgodność rozkładu wysokości hydraulicznych z mapą hydroizohips. W programach modelujących technika kalibracji jest oparta na punktach obserwacyjnych, w których były wykonane pomiary, co zostało wykorzystane w modelu [5]. W trakcie kalibracji, w oparciu o zestaw danych z rozpoznania hydrogeologicznego, dokonano stosownej korekty parametrów modelu.

Kalibracji poddano wielkość efektywnego zasilania i współczynnik poziomej i pionowej filtracji. Zmodyfikowano w niewielkim stopniu także warunki brzegowe III-go rodzaju, związane z oddziaływaniem rzek. To znaczy skorygowano parametry koryta rzeki, zmieniając najczęściej w granicach do 1,0 m położenie jego spągu, jeśli wprowadzona pierwotnie wartość była niezgodna z przyjętą dla bloku powierzchnią terenu.

5. ANALIZA KRAŻENIA I BILANS WÓD PODZIEMNYCH WEDŁUG NUMERYCZNEGO MODELU FILTRACJI

Wytarowany i zweryfikowany model posłużył do wykonania obliczeń bilansowych całego obszaru oraz poszczególnych warstw. Zgodnie z wykonanym modelem przyjęto, że wartość całkowitego dopływu do analizowanego obszaru o powierzchni 166 km² wynosi 141 553 m³/d, a w rozbiu na poszczególne składowe: zasilanie przez warunek brzegowy I rodzaju 266 m³/d, dopływ z cieków powierzchniowych 90 436 m³/d, infiltracja efektywna 50 851 m³/d. Z kolei wartość odpływu wynosi 141 555,1 m³/d, z czego 20 600 m³/d przypada na pobór ze studni i ujęć, 45 033 m³/d na odpływ przez warunek brzegowy I rodzaju, a 75 922 m³/d odpowiada drenującemu charakterowi cieków. A zatem na odcinkach rzek objętych modelem i wpływem ujęcia wielkość infiltracji z wód powierzchniowych przewyższa drenaż. Sumaryczne wielkości dopływu i odpływu w bilansie są sobie równe (błąd poniżej 0,1%).



Objaśnienia:

- - punkty obserwacyjne
- - wektory prędkości przepływu wód podziemnych
- - ujęcie wód podziemnych, $Q=\text{const}$, warunek brzegowy II rodzaju
- - hydroizohipsy
- - rzeki, $Q=f(H)$, warunek brzegowy III rodzaju
- - $H=\text{const}$, warunek brzegowy I rodzaju
- - nieaktywna część modelu

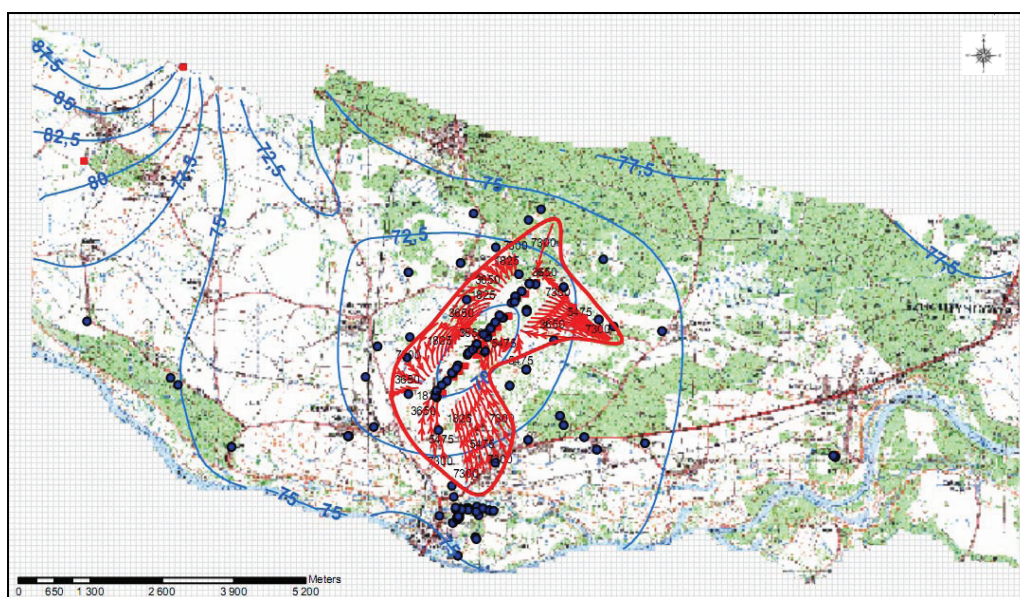
Rys. 4. Mapa hydroizohips i prędkości przepływu dla II warstwy modelu

W bilansie warstwy modelu odwzorowującej poziom użytkowy wyróżniamy dopływ z pierwszej przypowierzchniowej warstwy, który wynosi $35\,337\text{ m}^3/\text{d}$, zasilanie od dołu równe $27\,234\text{ m}^3/\text{d}$, przepływ do I warstwy $41\,969\text{ m}^3/\text{d}$, do leżącej poniżej warstwy III $1,2\text{ m}^3/\text{d}$ oraz pobór wody ze studni i ujęć w wielkości około $20\,600\text{ m}^3/\text{d}$.

Układ powierzchni piezometrycznej wskazuje, że na odcinkach rzek w centralnej części obszaru zachodzi zasilanie warstw wodonośnych z wód powierzchniowych. Wokół ujęcia następuje koncentryczny spływ strumieni wód podziemnych ku jego centrum, od stref zasilania na południu, północy, zachodzie i wschodzie (rys. 4).

6. STREFA OCHRONNA UJĘCIA „SERBY”

Na wykonanym numerycznym modelu filtracji przeprowadzono analizę tempa przemieszczania się cząstek obliczeniowych w strumieniu wód podziemnych. W tym celu wykorzystano metodę śledzenia cząstek na modelu MODPATH. Tory przepływu obliczono w kolejnych krokach czasowych (5 lat). Obliczenia wykonano wstecz, identyfikując obszar dopływów dla okresu 25 lat. Umożliwiło to wyznaczenie strefy ochronnej ujęcia „Serby” (rys. 5).



Objaśnienia:

- - punkty obserwacyjne
- - linie prądów i strefa ochronna
- - hydroizohipsy II warstwy modelu
- - ujęcia wód podziemnych
- - nieaktywna część modelu

Rys. 5. Wyznaczona strefa ochronna ujęcia „Serby” i tory przepływu cząstek

7. PODSUMOWANIE

1. Model numeryczny ujęcia „Serby” koło Głogowa jest próbą odtworzenia rzeczywistych warunków przepływu wód podziemnych w tym rejonie. Główne założenia modelu tj.: wydzielenie trzech warstw, wprowadzenie siatki dyskretyzacyjnej (gęstość $100\text{ m} \times 100\text{ m}$), dobrze określone zewnętrzne i wewnętrzne warunki brzegowe, umożliwiły odtworzenie przestrzennej struktury badanego systemu hydrogeologicznego.
2. Interpretacja danych oparta została na modelowaniu geostatystycznym. W ten sposób uzyskano przestrzenne rozkłady parametrów hydrogeologicznych niezbędnych dla obliczeń modelu.
3. Przy aktualnym rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych model uznano za zasadny dla rozwiązania bilansu przepływu wód podziemnych. Pobór z ujęć stanowi 40% zasilania z opadów, ale jedynie 15% całkowitego zasilania po uwzględnieniu zwiększonej infiltracji z cieków powierzchniowych. Po kalibracji modelu MODFLOW uruchomiono moduł MODPATH, w którym wyznaczono tory przepływu cząstek w strumieniu wód podziemnych, co pozwoliło ostatecznie na wyznaczenie strefy ochronnej ujęcia. Strefa ma wymiary 1000 – 2500 m na kierunku dopływu wód i około 750 – 800 m na odpływie.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Anderson M., Woessner W., 1992: Applied Groundwater Modeling, Academic Press.
- [2] Bocheńska T., Kalisz M., 1997: Wybrane problemy hydrogeologii górniczej lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego, Współczesne Problemy Hydrogeologii.
- [3] Bocheńska T., Poprawski L. (red.), 1998: Kenozoiczne zbiorniki wód podziemnych rejonu Lubin-Głogów, Acta Universitas Wratislaviensis.
- [4] Dąbrowski S., in., 1994: Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów zwykłych wód podziemnych z utworów trzeciorzędowych podsystemu wodonośnego wysoczyzny leszczyńskiej regionu wielkopolskiego, część województw: leszczyńskiego, legnickiego, zielonogórskiego i poznańskiego, Przedsiębiorstwo Geologiczne Proxima S.A.
- [5] Gurwin J., 2004: Problem kalibracji i analizy niepewności numerycznego modelu filtracji, Hydrogeologia. Modelowanie przepływu wód podziemnych, Acta Univ. Wratisl. N° 2729.
- [6] Gurwin J., 2007: Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne dla ustanowienia obszaru ochronnego zbiornika wód podziemnych Pradolina Barycz – Głogów (W) (GZWP nr 302), tom II.
- [7] Mądrala M., 2007: Przyczyny i zakres spadku wydajności jednostkowych studni w warunkach intensywnej eksploatacji na przykładzie ujęcia „Serby” dla miasta Głogowa, Współczesne problemy hydrogeologii, t. XIII, cz.2, 135-143.
- [8] Michalska E., 1995: Mapa geologiczna Polski 1:50 000 ark. Szlichtyngowa z objaśnieniami, PIG.

- [9] Malinowska-Pisz A., 2000: Mapa hydrogeologiczna Polski 1:50 000 ark. Szlichtyngowa z objaśnieniami, Przedsiębiorstwo Geologiczne Proxima S.A.
- [10] Sadurski A., Paczyński B.(red.), 2007: Hydrogeologia regionalna Polski, PIG.
- [11] Zaleska M., in., 1992: Dokumentacja hydrogeologiczna wód podziemnych z utworów czwartorzędowych, trzeciorzędowych i kredowych woj. legnickiego, Przedsiębiorstwo Geologiczne Proxima S.A.