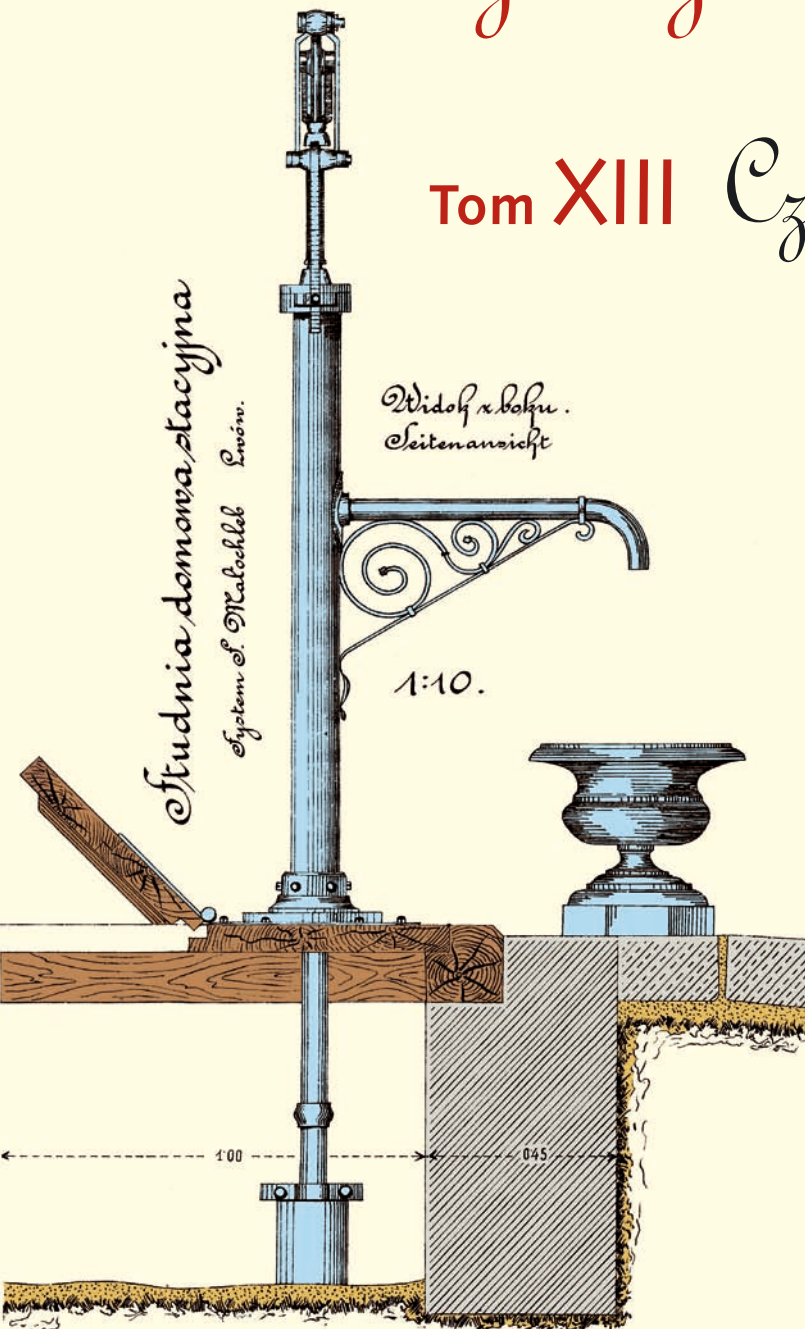


Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 3.



Copyright © Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków 2007



Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska
Wojciech Ciężkowski
Józef Górski
Andrzej Kowalczyk
Ewa Krogulec
Grzegorz Malina
Jerzy Małecki
Marek Marciniak
Jacek Motyka
Marek Nawalany
Jan Przybyłek
Andrzej Rózkowski
Andrzej Sadurski
Andrzej Szczepański
Stanisław Staško
Stanisław Witczak
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$: pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, www.pretext.com.pl

Druk: ROMA-POL, www.romapol.pl

ISBN-13 978-83-88927-16-4

**Sławomir Sitek, Konrad Miotliński,
Andrzej Kowalczyk**

**Model hydrogeologiczny fragmentu
zlewni Odry w rejonie Raciborza**

**Hydrogeological Model of the Part of the Odra's
Basin in the Racibórz Area**

Słowa kluczowe modelowanie filtracji, model hydrogeologiczny, Modflow, Racibórz

Key words groundwater flow modeling, hydrogeological model, Modflow, Racibórz

Abstract The buried valley in the Racibórz area is a very abundant aquifer with the groundwater of good quality. Groundwater has been abstracted here for many years for use of inhabitants and industry. The paper presents the results of numerical groundwater flow modeling of the said region with the use of Visual Modflow. Prior to numerical simulations, a conceptual model was defined on the basis of the set of geological data from more than hundred boreholes. The aims of modeling studies were as follows: 1. a better identification of groundwater flow and balance in the modeled system, 2. the hydrodynamic relationship between the abstracted Pleistocenian aquifer and underlying Sarmatian aquifer, 3. the relationship between the aquifers and the Oder river. The calibrated numerical model is a useful tool for predicting groundwater intakes exploitation as well as designing the detailed hydrogeochemical studies with regard to the dynamic changes of groundwater quality.

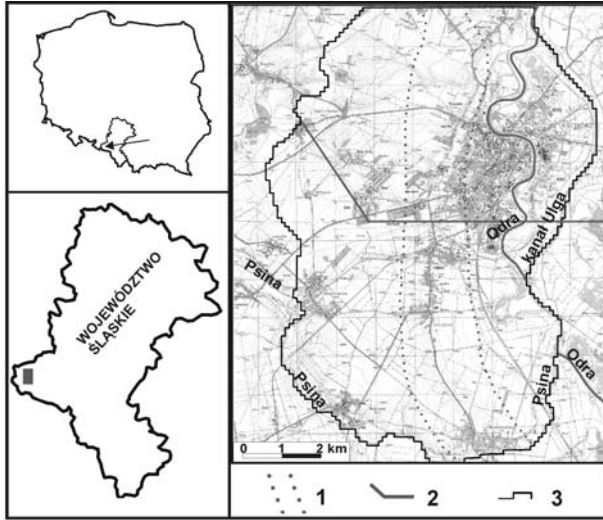
Wstęp

Plejstocieńska dolina kopalna w rejonie Raciborza wraz z niżej leżącym poziomem wodonośnym sarmatu, tworzy dwupoziomowy, zasobny zbiornik wód podziemnych. Dolina ta biegnie w odległości około 2 km od współczesnej doliny rzeki Odry (rys.1). W wyniku wieloletniej intensywnej eksploatacji wód ujęciami studziennymi na zaopatrzenie miasta ukształtował się układ krążenia wód podziemnych, obejmujący wymienione dwa poziomy wodonośne, który jest powiązany z wodami powierzchniowymi. Nieznane są wzajemne relacje pomiędzy tymi poziomami wodonośnymi, jak również jego relacje z rzekami, a przede wszystkim z Odrą. Interesująca, ale dotychczas nierozpoznana jest także rola plejstocieńskiej doliny kopalnej w drenażu wód całego wielowarstwowego systemu wodonośnego, na tle potencjalnie drenującego charakteru rzeki Odry. Istnieją przesłanki, które wskazują na możliwość okresowej infiltracji wód z Odry, przy wysokich stanach wód, do plejstocieńskiej doliny kopalnej. Na przykład po powodzi w 1997 r. nastąpiła istotna zmiana składu chemicznego i jakości wód w niektórych studniach na terenie Raciborza, ujmujących poziom wodonośny plejstocenu w dolinie kopalnej (Kowalczyk i in., 2002; Miotliński, Kowalczyk, 2007). Zatem jednym z warunków umożliwiających wyjaśnienie przyczyn obserwowanych zmian składu chemicznego wód w dolinie kopalnej jest rozpoznanie całego układu krążenia wód w wielowarstwowym systemie wodonośnym, a w szczególności roli kopalnej doliny w tym systemie i jej powiązań z niżej występującym poziomem wodonośnym sarmatu i rzeką Odrą. Tak sformułowane zadanie stanowiło cel badań, których wyniki są prezentowane w niniejszej pracy. W celu jego rozwiązania wykonano matematyczny model filtracji systemu wodonośnego, przy pomocy programu Visual Modflow. Wykonanie tego modelu stanowiło pierwszy etap realizowanych badań, których zamierzeniem jest identyfikacja czynników i procesów kształtujących skład chemiczny wód podziemnych oraz wyjaśnienie przyczyn pogarszania się jakości wód w plejstocieńskiej dolinie kopalnej w rejonie Raciborza.

Badaniami objęto fragment lewobrzeżnej zlewni Odry, o powierzchni 75 km², ograniczony rzekami Odrą na wschodzie i Psiną na południu oraz działem wód powierzchniowych na zachodzie. W ten sposób objęto badaniami fragment kopalnej doliny plejstocieńskiej, gdzie wypełniające ją osady wodonośne mają największą miąższość.

Charakterystyka hydrogeologiczna obszaru badań

W rejonie Raciborza zostały rozpoznane otworami wiertniczymi utwory karbonu, miocenu, pliocenu i holocenu (Alexandrowicz, Kleczkowski 1974; Kotlicka 1981; Haisig 2003). Użytkowe wody podziemne mające znaczenie dla zaopatrzenia w wodę przemysłową i pitną występują jedynie w poziomach wodonośnych plejstocenu i sarmatu (rys. 2). Poziom wodonośny plejstocenu budują żwiry oraz piaski eoplejstocenu i mezoplejstocenu. Największą miąższość (55 m) osiągają one w osiowej części doliny kopalnej (Kotlicka, 1978). Na pozostałym obszarze badań miąższość osadów wodonośnych plejstocenu wynosi od kilku do kilkunastu metrów. Dolina kopalna jest strukturą o przebiegu południkowym, której oś jest przesunięta na zachód w stosunku do współczesnego koryta Odry od 2,5 do 4 km (rys. 1).

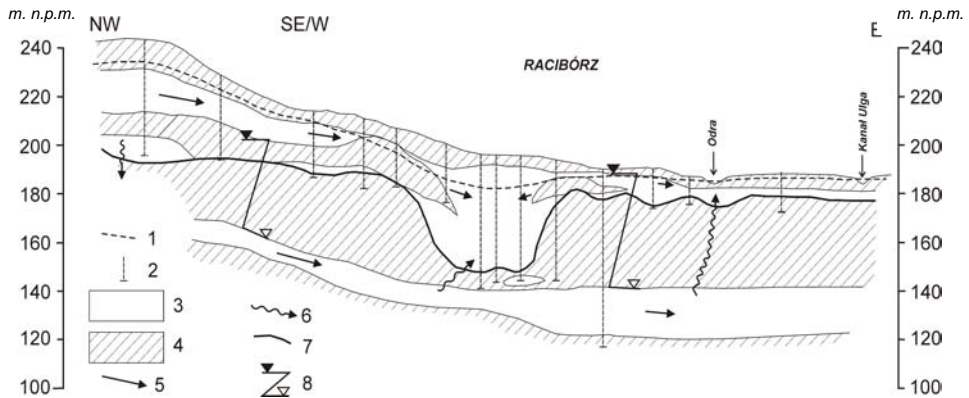


Rysunek 1. Lokalizacja obszaru badań

Objaśnienia: 1 – granice doliny kopalnej; 2 – linia przekroju hydrogeologicznego; 3 – granice obszaru modelu filtracji

Figure 1. Location of the study area

Explanation: 1 – boundary of the buried valley; 2 –hydrogeological cross-section line; 3 – boundary of the flow model domain



Rysunek 2. Przekrój hydrogeologiczny przez dolinę kopalną Odry w rejonie Raciborza

Objaśnienia: 1 – zwierciadło wody w poziomie wodonośnym plejstocenu; 2 – otwory wiertnicze; 3 – warstwy dobrze przepuszczalne; 4 – warstwy słabo przepuszczalne; 5 – kierunki przepływu wód; 6 – kierunki przesiąkania 7 – granica pomiędzy plejstocenem i miocenem; 8 – zwierciadło wody w poziomie wodonośnym sarmatu

Figure 2. Hydrogeological cross-section through the buried valley in the Racibórz area

Explanation: 1 – water table in the Pleistocene aquifer; 2 – borings; 3 – well permeable layers; 4 – confining units; 5 – directions of flow; 6 – directions of leakage; 7 – border between Pleistocene and Miocene; 8 – water table in the Sarmatian aquifer

Szerokość doliny kopalnej zmienia się od 0,5 do 2 km. W obrębie osadów piaszczysto-zwirowych plejstocenu występują przewarstwienia utworów słabo przepuszczalnych, głównie glin i pyłów, co powoduje, że lokalnie można wyróżnić więcej niż jedną warstwę wodonośną (rys. 2). Mimo tego warstwy wodonośne pozostają ze sobą w kontakcie hydraulicznym, tworząc poziom plejstoceniński. Wartości współczynnika filtracji osadów wodonośnych wahają się w zakresie od 5×10^{-5} do 5×10^{-3} m/s, a ich wartość średnia wynosi $7,2 \times 10^{-4}$ m/s (Kowalczyk i in., 1998). Poziom wodonośny plejstocenu w zasięgu doliny kopalnej jest przykryty od powierzchni terenu warstwą osadów pylasto-gliniastych, o miąższości od kilku do kilkunastu metrów. Głównym źródłem zasilania poziomu plejstocenińskiego jest infiltracja wód z opadów atmosferycznych, które przesączają się przez serię osadów słabo przepuszczalnych. Nie można wykluczyć zasilania na drodze dopływu bocznego wód, z położonego na zachód od miasta Raciborza Płaskowyżu Głubczyckiego. Przy wysokich stanach wód w Odrze potencjalnie możliwa jest także infiltracja tych wód w kierunku doliny kopalnej. Podstawę drenażu wód podziemnych stanowią współczesne doliny rzek Odry i jej dopływu, Psiny, a także ujęcia wód podziemnych, w szczególności te, które mają duży i skoncentrowany pobór wody w dolinie kopalnej. Pobór ten w ostatnich latach uległ zmniejszeniu ze średnich wartości rzędu 17 tys. m³/d (w 1998 roku) do 10 350 m³/d (w 2005 roku). W obszarach współczesnych dolin rzecznych poziom wodonośny plejstocenu występuje w ciągłości hydraulicznej z przypowierzchniowym poziomem wodonośnym w osadach holocenu. W spągu osadów wodonośnych plejstocenu lokalnie występują niewielkiej miąższości osady pliocenu. Ich występowanie ogranicza się prawdopodobnie do północnej części obszaru badań (Kotlicka, 1978; Trzepla, 2005). Charakter hydrogeologiczny osadów pliocenu na badanym terenie nie został rozpoznany. Na podstawie analogii z obszarem kopalnej doliny rzeki Rudy, występującej kilka km na N od Raciborza (Kleczkowski i in., 1972), przyjmuje się, że osady wodonośne pliocenu wraz z osadami plejstocenu tworzą w obszarze doliny kopalnej wspólny poziom wodonośny.

Poziom wodonośny sarmatu budują piaski o miąższości od kilku do 25 metrów. Ich współczynnik filtracji wynosi średnio 10^{-4} m/s. W obszarze objętym badaniami poziom ten jest słabo rozpoznany, nielicznymi wierceniami. Na większej części obszaru jest on przykryty łąkami, o miąższości od kilku do kilkunastu metrów. Jednak w niektórych otworach wierconych w osiowej części plejstocenińskiej doliny kopalnej stwierdzono występowanie piasków sarmatu bezpośrednio pod żwirami plejstocenu, co wskazuje, że wraz z osadami plejstocenu tworzą one wspólny poziom wodonośny. Zwierciadło wody poziomu sarmatu na badanym obszarze ma charakter naporowy. Zasilanie tego poziomu odbywa się bezpośrednio na wychodniach, znajdujących się poza obszarem badań, a ponadto, prawdopodobnie na drodze przesączania się wód z wyżej leżącego poziomu wodonośnego plejstocenu. Podstawową strefę drenażu stanowi współczesna dolina rzeki Odry oraz opisywana, plejstocenińska dolina kopalna. Od końca lat 90. ubiegłego wieku poziom sarmatu, będący częścią GZWP nr 332, jest w rejonie Raciborza w minimalnym stopniu eksploatowany studniami.

Model matematyczny systemu wodonośnego

Odzworowanie opisanego systemu wodonośnego przeprowadzono dla ustalonych warunków przepływu wód, za pomocą programu Visual Modflow (WHI, 2004), z zastosowaniem kodu obliczeniowego MODFLOW-2000.

Model o powierzchni 108 km² został podzielony na 120 wierszy i 90 kolumn, o wymiarach 100 m x 100 m, z czego część komórek obliczeniowych, obejmująca obszar o powierzchni 33 km² jest nieaktywna. Profil hydrogeologiczny opisanego systemu wodonośnego schematyzowano za pomocą trzech warstw modelu, wyróżniając dwie warstwy reprezentujące poziomy wodonośne i jedną, która te poziomy rozdziela. Pierwsza warstwa modelu reprezentuje wodonośne osady plejstocenu oraz mające lokalne rozprzestrzenienie i pozostające w kontakcie hydraulicznym osady holocenu. Jest to warstwa o zwierciadle swobodnym. Warstwa druga obejmuje słabo przepuszczalne osady plejstocenu oraz praktycznie nieprzepuszczalne osady miocenu. Warstwa trzecia odwzorowuje poziom wodonośny sarmatu, o zwierciadle napiętym. Schematycznie strukturę modelu badanego systemu wodonośnego oraz główne charakterystyki hydrogeologiczne warstw modelu przedstawiono na rysunku 3.

I warstwa	k - od 5×10^{-6} do 9×10^{-4} m/s (śr. $1,5 \times 10^{-4}$ m/s) miąższość - od 4 do 77 m
II warstwa	k - od 5×10^{-9} do 5×10^{-8} m/s (śr. $7,5 \times 10^{-9}$ m/s) miąższość - od 3 do 42 m
III warstwa	k - od 5×10^{-6} do 6×10^{-4} m/s (śr. 10^{-4} m/s) miąższość - od 3 do 27 m

Rysunek 3. Schematyczny profil struktury modelu z parametrami odwzorowanych warstw
Figure 3. Schematic profile of the model's structure with the parameters of the layers

Pionowe granice modelowanego obszaru na przeważającej ich długości poprowadzono zgodnie z naturalnymi granicami plejstoceńskiego zbiornika wód podziemnych. Granice wschodnią, południową i południowo-zachodnią wyznaczają koryta rzek: Odry, Kanału Ulga i Psiny. Granicę zachodnią poprowadzono wzdłuż działów wód powierzchniowych, a granica północna ma charakter arbitralny i została przeprowadzona w poprzek największego przewężenia doliny kopalnej (rys. 1). Na modelu warstwy pierwszej i trzeciej granica na Odrze i Kanale Ulgi została odwzorowana warunkiem brzegowym I rodzaju. Te dwa rozgałęzienia koryta Odry, która jest rzeką główną, stanowią niewątpliwie regionalną podstawę drenażu wód.

Granicę na rzece Psinie, która jako dopływ Odry ma charakter podrzędny w drenażu wód w zlewni (przepływ średni wynosi 2,27 m³/s) zdefiniowano w pierwszej warstwie modelu przy użyciu warunku III rodzaju (pakiet „Stream”). Pozostałe granice odwzorowano z wykorzystaniem warunku brzegowego III rodzaju, przy minimalnej wartości przewodności granicy na działach wód podziemnych w pierwszej warstwie modelu. Granicę dolną modelu odwzorowano warunkiem II rodzaju, jako nieprzepuszczalną (bez

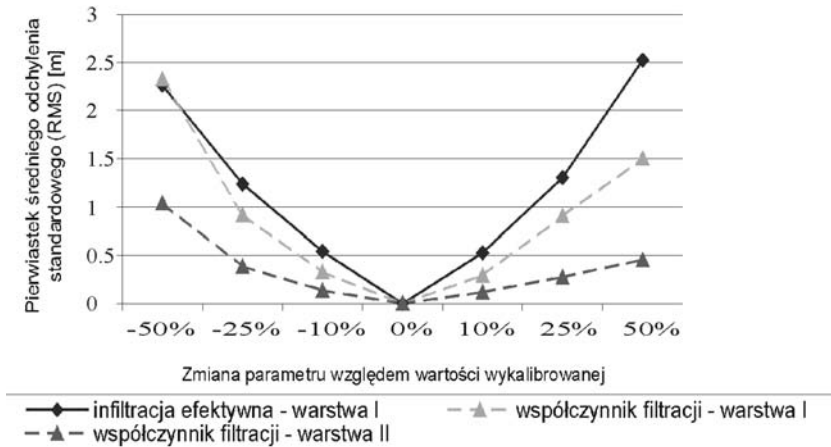
przepływu). Pobór wody studniami oraz zasilanie z infiltracji opadów atmosferycznych odwzorowano warunkiem II rodzaju.

Mapy wejściowe zróżnicowania wartości współczynnika filtracji dla pierwszej i trzeciej warstwy modelu uzyskano w oparciu o interpretację wyników próbnych pompowań studni (Kowalczyk i in., 1998). Wartość infiltracji efektywnej została wstępnie przyjęta na poziomie 10% wysokości opadów atmosferycznych, których suma roczna dla roku 2005 w posterunku meteorologicznym w Raciborzu-Studziennej wynosiła 763 mm/rok. W następnej kolejności budowy i kalibracji modelu wartość ta (76,3 mm/rok) została zróżnicowana, w zależności od wykształcenia litologicznego utworów przykrywających pierwszą warstwę modelu.

Kalibracja i badanie wrażliwości modelu

Proces identyfikacji modelu prowadzono metodą prób i błędów. Za poziom odniesienia przyjęto rozkład wysokości hydraulicznych w poziomach wodonośnych plejstocenu i sarmatu, który został określony na podstawie pomiarów terenowych przeprowadzonych w październiku 2005 roku. Okres drugiej połowy roku 2005 charakteryzował się nieznaczną ilością opadów oraz stosunkowo niewielkimi wahaniami poziomu wody w Odrze notowanego na wodowskazie w Raciborzu-Miedoni i stanów wód podziemnych. Stany te mieściły się w zakresie niskich stanów średnich. Dlatego przyjęto dopuszczalne w tej sytuacji założenie o możliwości symulacji ustalonych warunków przepływu wód w systemie (Anderson, Woessner, 1992). Proces kalibracji polegał na poszukiwaniu optymalnego rozkładu wartości współczynnika filtracji, infiltracji efektywnej, wskaźnika przewodności hydraulicznej osadów dennych rzeki Psiny oraz wielkości oporu przepływu w blokach odwzorowujących warunki brzegowe III rodzaju. Kolejne wyniki symulacji przepływu wody w postaci map obliczonych wysokości hydraulicznych dla pierwszej i trzeciej warstwy modelu porównywano z wartościami wejściowymi (pomierzonymi w terenie). Podczas procesu kalibracji kierowano się również wartościami składowych bilansu wód podziemnych, w szczególności infiltracji efektywnej oraz natężenia przepływu w blokach odwzorowujących rzeki Odrę i Psinę. Kalibrację modelu zakończono po uzyskaniu akceptowalnych miar błędów kalibracji średni błąd bezwzględny 1,38 m (I warstwa) oraz 1,54 (III warstwa); pierwiastek średniego odchylenia standardowego 1,98 m (I warstwa) oraz 2,01 (III warstwa).

Skalibrowany model został następnie poddany badaniu wrażliwości na zmianę najbardziej czułych elementów modelowanego systemu tj. wartości współczynnika filtracji i infiltracji efektywnej (Kowalczyk i in., 2004). Analiza czułości polegała na obserwacji zmian wartości pierwiastka średniego odchylenia standardowego (RMS), w związku ze zmianami wartości infiltracji i współczynnika filtracji o 10, 25, 50%, przy założeniu, że dla wykalibrowanego modelu wartość RMS jest równa 0 (rys. 4). Uzyskany w wyniku kalibracji modelu rozkład wysokości hydraulicznej w odwzorowanych poziomach wodonośnych, potwierdzony badaniem wrażliwości modelu, a także domkniętym bilansem wodnym modelu, dają uzasadnione podstawy do tego, by uznać, że model jest zasadny i w sposób prawidłowy odzwierciedla strukturę i funkcjonowanie modelowanego systemu wodonośnego.



Rysunek 4. Wrażliwość systemu wodonośnego na zmianę współczynnika filtracji i zasilania
Figure 4. Sensitivity of groundwater flow system to changes in hydraulic conductivity and recharge

Wyniki i dyskusja

Wykonane badania modelowe potwierdzają przyjętą trójwarstwową strukturę modelu hydrogeologicznego z dwoma poziomami wodonośnym – plejstocenu i sarmatu, rozdzielonymi warstwą utworów słabo przepuszczalnych. Wykonany model umożliwia prześledzenie dróg krążenia wód podziemnych, a w szczególności określenie wzajemnych relacji pomiędzy poziomami wodonośnymi plejstocenu i sarmatu, a także relacji tych poziomów z wodami powierzchniowymi rzek Odry i Psiny.

Wyniki tych badań dostarczają także informacji o wartościach parametrów modelu, takich jak współczynnik filtracji i wskaźnik zasilania oraz o ich przestrzennym zróżnicowaniu. Uzyskane na drodze modelowania średnie wartości współczynnika filtracji utworów wodonośnych poziomu plejstocenu (rys. 3) są nieco niższe od wartości punktowych, uzyskanych na podstawie próbnych pompowań, które wynoszą od 1×10^{-5} do 5×10^{-3} m/s, przy średniej geometrycznej $3,6 \times 10^{-4}$ m/s (Kowalczyk i in., 1998). Przyczyną różnicy jest prawdopodobnie fakt, że próbne pompowania były prowadzone głównie w osiowej części plejstocenijskiej doliny kopalnej, gdzie warunki dopływu do studni są lepsze, a wartości współczynników filtracji wyższe niż na pozostałym obszarze.

Wartości infiltracji efektywnej mieszczą się w zakresie od 10 do 190 mm/rok. Najwyższe wartości charakterystyczne są dla obszaru centrum Raciborza. Najniższe wartości infiltracji efektywnej występują w skrajnie południowo-zachodniej części obszaru badań, gdzie poziom wodonośny plejstocenu jest przykryty warstwą glin zwałowych osiagających miąższość do 25 m. Relatywnie wysoki wskaźnik zasilania na terenie miasta może być uwarunkowany czynnikami sprzyjającymi wzrostowi zasilania na terenach zurbanizowanych (Kowalczyk, 2005). Dyskusja tego złożonego problemu wykracza jednakże poza ramy niniejszej pracy. Średni moduł infiltracji efektywnej dla całego obszaru

badania wynosi $3,25 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{km}^2$, co stanowi 13,4% z ogólnej sumy opadów atmosferycznych w 2005 roku. Dla całego systemu wodonośnego wody pochodzące z infiltracji opadów atmosferycznych stanowią 74% całości zasobów odnawialnych (tab. 1).

Tabela 1. Bilans krążenia wód podziemnych dla stanu z 2005 r. (obszar modelu $A=75 \text{ km}^2$)
Table 1. Groundwater flow balance for year 2005 (model area $A=75 \text{ km}^2$)

Składniki bilansu	I warstwa wodonośna modelu (plejstocen)			II warstwa wodonośna modelu (sarmat)			Cały system wodonośny		
	m^3/d	dm^3/skm^2 / mm/rok	%	m^3/d	dm^3/skm^2 / mm/rok	%	m^3/d	dm^3/skm^2 / mm/rok	%
<i>infiltracja z Odry</i>	563	0,1/2,7	2	84	0,01 / 0,4	1	646	0,1/3,1	2
<i>infiltracja z opadów</i>	21051	3,2 / 102,4	77				21051	3,2/102,4	74
<i>dopływ boczny</i>	1847		7	4874		63	6741	1,0/32,8	24
<i>przesączanie z warstwy sarmatu</i>	3763	0,6 / 18,3	14						
<i>przesączanie z w-wy plejstocenu</i>				2734	0,4/13,3	36			
Suma zasilania	27224	4,2 / 132,5	100	7692	1,2 / 37,4	100	28438		100
<i>drenaż do Odry</i>	11482	1,8 / 55,9	42	1558	0,2 / 7,6	20	13022	2,0/63,4	46
<i>drenaż do Psiny</i>	1465	0,2 / 7,1	5				1465	0,2/7,1	5
<i>pobór studniami</i>	9941	1,5 / 48,4	37	408	0,1 / 2,0	5	10349	1,6/50,4	36
<i>odpływ boczny</i>	1602		6	1963		26	3602	0,6/17,5	13
<i>przesączanie do warstwy sarmatu</i>	2734	0,4 / 13,3	10						
<i>przesączanie do w-wy plejstocenu</i>				3763	0,5/10,0	49			
Suma drenażu	27224	4,2 / 132,5	100	7692	1,2 / 37,4	100	28438		100

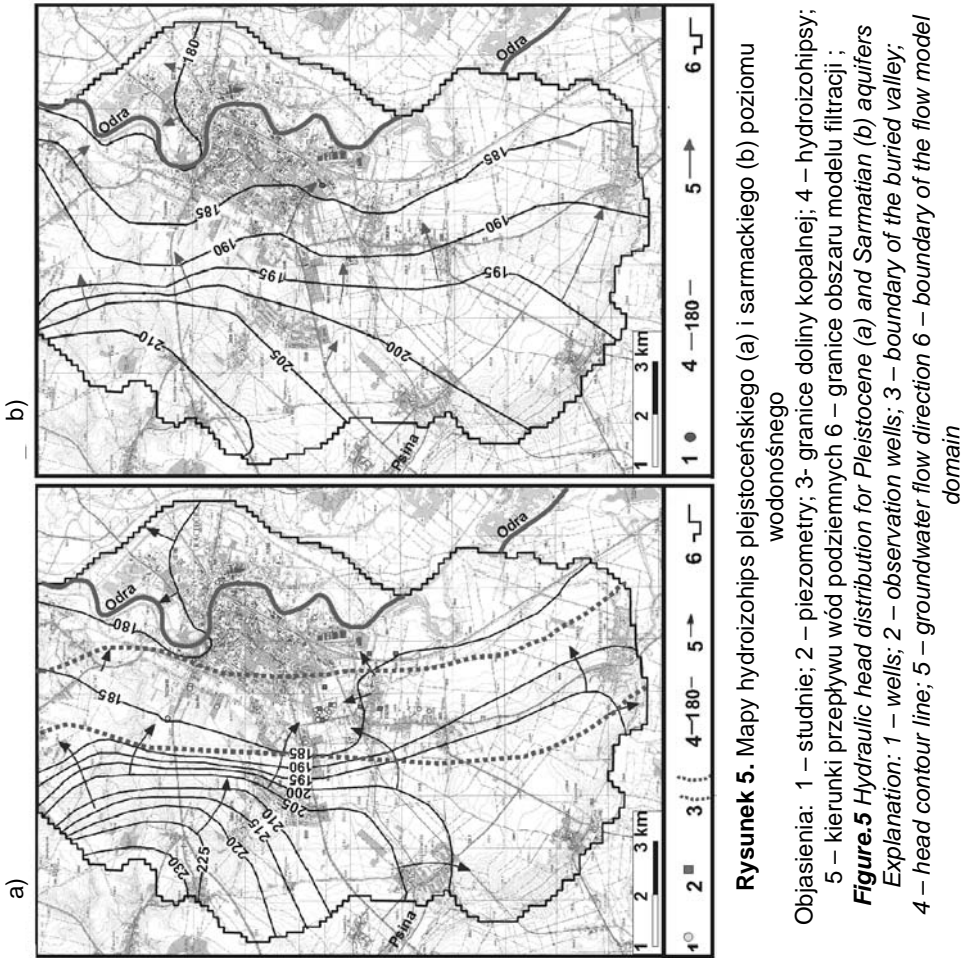
Wyróżnione w modelu hydrogeologicznym obszaru poziomy wodonośne plejstocenu i sarmatu charakteryzują się przede wszystkim różną zasobnością. Miarą tego zróżnicowania są zestawione w tabeli 1 wskaźniki odnawiania się wód w tych poziomach. Wynoszą one dla poziomu plejstocenu - $4,2 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{km}^2$ i $132 \text{ mm}/\text{rok}$, a dla poziomu sarmatu - $1,2 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{km}^2$ i $37 \text{ mm}/\text{rok}$. Większa zasobność poziomu plejstocenu jest związana z większą miąższością i przepuszczalnością osadów wodonośnych, a także z korzystniejszymi warunkami zasilania na drodze infiltracji opadów atmosferycznych. Wyniki badań modelowych wskazują na powiązanie i określają relacje poziomów wodonośnych plejstocenu i sarmatu. Z bilansu wodnego systemu wodonośnego (tab. 1) wynika, że około 36% wód zasilających poziom sarmatu dopływa na drodze przesączania z poziomu plejstocenu, oraz że 14% wód zasilających poziom plejstocenu dopływa z niżej leżącego poziomu wodonośnego sarmatu. Pomijając ilościowy aspekt tej relacji, należy

stwierdzić, że istotny jest sam fakt i kierunki przepływu wód pomiędzy tymi poziomami. Dopływ wód do poziomu plejstocenu następuje głównie w strefie osiowej doliny kopalnej. Jest to związane z większym w tym rejonie natężeniem przesączania się wody przez słabo przepuszczalne utwory miocenu, uwarunkowanym prawdopodobnie wyższą przepuszczalnością i mniejszą miąższością tych osadów, niż na pozostałej części obszaru badań. Wyższej wartości przesączania sprzyja również różnica wysokości hydraulicznych w obydwu poziomach wodonośnych, wywołana obniżeniem ciśnień w osiowej części plejstocenijskiej doliny kopalnej, w związku z poborem wody studniami.

Uzyskane na podstawie symulacji przepływu wód na modelu mapy hydroizohips dla średnich stanów wód (rys. 5) w powiązaniu z ilościowym bilansem krążenia wód (tab. 1) wskazują, że w badanym systemie wodonośnym występują generalnie 3 strefy drenażowe wód podziemnych (rys. 5a). Są to: strefa ujęć wód podziemnych zlokalizowanych w centralnej części w dolinie kopalnej, w poziomie wodonośnym plejstocenu, współczesna dolina Odry oraz dolina Psiny na południu i południowym-zachodzie obszaru. Dominującą strefą drenażu wód dla całego systemu wodonośnego jest współczesna dolina Odry, która drenuje 46% wód, z obydwu poziomów wodonośnych (tab. 1), a dodatkową strefą drenażową jest plejstocenijska dolina kopalna wraz ze studniami, znajdującymi się w jej centralnej części, w rejonie Raciborza, która drenuje 36 % wód.

Te same dwie strefy drenażowe w podobnych proporcjach drenują wody z poziomu plejstocenu, w obszarze objętym modelem matematycznym (rys. 5a). Dla poziomu wodonośnego sarmatu (rys. 5b) główną podstawę drenażu stanowi współczesna dolina Odry, a część wód jest drenowana na drodze przesączania do plejstocenijskiej doliny kopalnej (tab. 1).

Z przeprowadzonych badań modelowych wynika, że dla średnich stanów wód w zlewni Odry, takich, jakie odwzorowano na modelu, rzeka ta nie zasila wód podziemnych plejstocenijskiej doliny kopalnej w obszarze objętym modelem. Jednakże odmiennie relacja ta kształtuje się w przypadku symulacji stanów powodziowych na Odrze. Symulacja w blokach z warunkiem brzegowym I rodzaju stanów powodziowych z 1997 r., a więc wyższych od tych z 2005 r. o 850 mm, potwierdza przypuszczenie, iż możliwa jest wówczas infiltracja wody z Odry do doliny kopalnej, jednakże głównie w rejonie skoncentrowanego poboru studniami. Na pozostałym obszarze, zarówno w jego części północnej, jak i południowej, nawet przy stanach powodziowych Odry, rzeka ta spełnia drenującą rolę w stosunku do wód podziemnych. Z uwagi na ograniczenie rozmiarów niniejszej pracy nie jest możliwe zaprezentowanie wyników symulacji wariantowych, jakie wykonano dla innych stanów wód, w tym dla stanów ekstremalnych oraz bez poboru wody. Ten wniosek z wykonanych badań modelowych znajduje wsparcie w obserwacjach zmian składu chemicznego wody z ujęć zlokalizowanych w centralnej części doliny kopalnej. Zmiany te przejawiały się przede wszystkim wzrostem stężeń jonów chlorkowych od roku 1999, których głównym źródłem na badanym obszarze jest zanieczyszczona woda z rzeki Odry (Kowalczyk i in., 2002). Dla ujęć tych wykonano model geochemiczny mieszania wód, który kalibrowany w oparciu o stężenia chlorków wskazuje, że po powodzi z 1997 roku, maksymalny udział wody rzecznej w wodzie z badanych ujęć sięga 13 % (Miotliński, dane niepublikowane).



Rolę plejstocenijskiej doliny kopalnej w badanym systemie wodonośnym prześledzono w oparciu o bilans wodny, zestawiony dla fragmentu modelu, odpowiadającego zarysowi tej struktury (rys. 5a). Powierzchnia tego fragmentu wynosi 18,7 km². Jej granice boczne są otwarte dla przepływu wód podziemnych. Z tego względu jest to struktura o charakterze przepływowym, o czym świadczy wysoki udział dopływu i odpływu bocznego w bilansie tej struktury (tab. 2). Wskaźniki te wynoszą odpowiednio 63% i 46%. Dopływ boczny wód pochodzi przede wszystkim z kierunku zachodniego, od strony Płaskowyżu Głubczyckiego, a odpływ jest skierowany głównie do Odry. Strukturę tę charakteryzuje bardzo wysoki wskaźnik zasobów odnawialnych, który wynosi 11,3 dm³/s/km² (355 mm/rok), podczas gdy dla całego obszaru modelu wskaźnik ten wynosi 4,2 dm³/s/km² (132 mm/rok, tab. 1 i 2). Taka koncentracja zasobów w tej strukturze kopalnej jest niewątpliwie wymuszona poborem wody studniami, którego udział w drenażu wód z tej doliny stanowi powyżej 52% (tab. 2).

Tabela 2. Bilans krążenia wód podziemnych w dolinie kopalnej dla stanu z 2005 r (obszar doliny kopalnej $A=18,73\text{km}^2$).**Table 2.** Groundwater flow balance in the buried valley for year 2005 (the buried valley area $A=18,73\text{ km}^2$)

Składniki bilansu		m^3/d	$\text{dm}^3/\text{skm}^2 / \text{mm}/\text{rok}$	%
Zasilanie	infiltracja z opadów	6695,50	4,1/130,5	36.8
	dopływ boczny	11513,50	7,1/224,4	63.2
	Infiltracja z rzek	0	0,00/0,00	0
Suma zasilania		18209,00	11,3/354,8	100,00
Drenaż	drenaż do Odry	0,00	0,00/0,00	0,00
	drenaż do Psiny	303,03	0,2/5,9	1,7
	odpływ boczny	8353,98	5,2/162,8	45,9
	powódz studniami	9552,00	5,9/186,1	52,5
Suma drenażu		18209,01	11,3/354,8	100,00

Mimo że wyniki wykonanych badań modelowych wskazują na udział wód z poziomu wodonośnego sarmatu w zasilaniu poziomu plejstocenu, to problem ten wymaga dalszych badań. Ograniczeniem wykonanego modelu jest bowiem bardzo słabe rozpoznanie hydrogeologiczne poziomu sarmatu, ze względu na znikomą liczbę otworów obserwacyjnych ujmujących ten poziom wodonośny na badanym obszarze. Mimo szczątkowych danych, zasadnym wydaje się odwzorowanie, już na tym etapie badań, poziomu wodonośnego sarmatu jako osobnej warstwy modelu, w oparciu o przybliżone informacje o charakterze regionalnym i sporadycznie lokalnym, odnoszące się do rozprzestrzenienia osadów wodonośnych i słabo przepuszczalnych, ich miąższości i współczynnika filtracji. Nie sposób bowiem odrzucić sugestii wynikającej ze schematu systemów krążenia wód podziemnych opracowanego przez Totha (1963), że rzeka główna, a taką jest Odra, stanowi regionalną podstawę drenażu wód dla wielowarstwowego systemu wodonośnego, a nie tylko dla płytkich systemów krążenia. W celu dokładniejszego rozpoznania relacji pomiędzy poziomami wodonośnymi opisywanego systemu wodonośnego, a także związków wód powierzchniowych Odry z wodami podziemnymi zasadnym będzie wykonanie badań hydrogeochemicznych wraz z modelowaniem geochemicznym, a także badań izotopowych wód. Pożądanym byłoby także zwiększenie rozpoznania otworami wiertniczymi poziomu wodonośnego sarmatu. Wykonanie tak kompleksowych badań umożliwi ponowne wykonanie modelu przepływu wód badanego systemu wodonośnego i jego skalibrowanie w oparciu o pozyskane wyniki badań. Takie postępowanie od badań terenowych do modelu matematycznego i następnie poszerzenie rozpoznania systemu w drodze dalszych badań terenowych i laboratoryjnych dla udoskonalenia modelu matematycznego powinno być naturalną drogą prowadzącą do coraz lepszego poznania systemu wodonośnego, jego funkcjonowania oraz relacji z otoczeniem (Bredhoeft, Hall, 1995).

Wnioski

Wykonany model matematyczny fragmentu zlewni Odry w rejonie Raciborza potwierdza hipotezę o tym, że w systemie wód podziemnych w tym obszarze występują dwa poziomy wodonośne, plejstocenu i sarmatu, rozdzielone warstwą utworów słabo przepuszczalnych. Pomiedzy poziomami wodonośnymi następuje wymiana wód, polegająca na tym, że na części obszaru poziomu sarmatu jest zasilany wodami z poziomu plejstocenu na drodze przesączania poprzez warstwę utworów słabo przepuszczalnych, a w innych rejonach następuje drenaż wód z poziomu sarmatu do poziomu plejstocenu.

Przeprowadzone badania modelowe wykazały, że współczesna dolina Odry obecnie stanowi główną bazę drenażową dla badanego systemu wodonośnego, oraz że eksploatacja wód ujęciami powoduje lokalne zaburzenie układu krążenia wód, głównie w centralnej części plejstocenijskiej doliny kopalnej, gdzie jest skoncentrowany pobór wody dla Raciborza. Ujęcia te stanowią drugą pod względem ilości drenowanych wód strefę drenażową, gdyż przechwytyują część wód skierowanych z obydwu poziomów wodonośnych do Odry.

Dla średnich stanów wód powierzchniowych i podziemnych drenaż wód do rzek, głównie do Odry, stanowi 51% odpływu całkowitego wód z badanego systemu wodonośnego. Według badań modelowych przy tych stanach wód nie następuje infiltracja wód z Odry do wód podziemnych. Badania potwierdzają, że przy wysokich stanach wód infiltracja wód rzecznych w kierunku doliny kopalnej i zlokalizowanych tam ujęć jest możliwa.

Identyfikacja źródeł zasilania i układu krążenia wód w wielopoziomowym systemie wodonośnym, a w szczególności określenie związku pomiędzy poziomami wodonośnymi plejstocenu i sarmatu oraz ich relacji z wodami powierzchniowymi stwarza podstawy do określenia i prognozowania czynników i procesów kształtujących skład chemiczny i jakość wód podziemnych w dolinie kopalnej.

Rozpoznany na obecnym etapie badań model systemu krążenia wód ma charakter wstępny i wymaga potwierdzenia i udoskonalenia na drodze badań uzupełniających, głównie modelowania geochemicznego i badań składu izotopowego wód oraz badań mineralogicznych skał. Zebranie dodatkowych danych dotyczących poziomu wodonośnego sarmatu, a także zmian położenia zwierciadła wody podziemnej w powiązaniu z wahaniami wody w rzece Odrze, umożliwi opracowanie doskonalszego modelu matematycznego tego systemu wodonośnego, a w dalszej kolejności powinien to być model dla nieustalonych warunków filtracji.

Literatura

- Alexandrowicz S. W., Kleczkowski A. S., 1974 – *Osady trzeciorzędowe Opolszczyzny*. Przewodnik Zjazdu Pol. Tow. Geol. Opole, 38-48. Wyd. Geol. Warszawa.
- Anderson M.P., Woessner W.W., 1992: *Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport*. Wyd. 1., Academic Press. ISBN 0120594854.
- Bredehoeft J., Hall P., 1995: *Ground-water models*. Ground Water, 33, 4, 530-531.

- Haisig J., 2003 – *Budowa geologiczna i rzeźba powierzchni podczwartorzędowej Kotliny Raciborsko – Oświęcimskiej*. Mat. X Konf. Stratygrafia plejstocenu Polski, Rudy 1-5 września 2003, 11-147, Sosnowiec.
- Kleczkowski A.S., Dendewicz A., Dyjor S., Kowalski J., Miłkowski M., 1972: *Pliocene-Quaternary Rybnik-Koźle Trough and its Hydrogeological Properties*. Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences, XX, 1, 71-83.
- Kotlicka G.N., 1978 – *Stratygrafia osadów czwartorzędowych w dolinie Odry koło Raciborza*. Biul. Inst. Geol. nr 300, 303-387. Wyd. Geol. Warszawa.
- Kotlicka G.N., 1981 – *Neotektonika doliny górnej Odry*. Biul. Inst. Geol. nr 321. Wyd. Geol., Warszawa.
- Kowalczyk A. i in., 1998 – *Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych czwartorzędowego poziomu wodonośnego w dolinie Odry w rejonie Raciborza*. Arch. ZBU Intergeo, Sosnowiec.
- Kowalczyk A., Miotliński K., Wojtal G., 2002 – *Ekspertyza hydrogeologiczna określająca perspektywy eksploatacji wody ujęciem Bogumińska w Raciborzu*. Arch. ZBU Intergeo, Sosnowiec.
- Kowalczyk A., Miotliński K., Rubin K., 2004 – *Modelowanie przepływu wód podziemnych w wielowarstwowym systemie wodonośnym w rejonie Tarnowskich Gór*. Acta Universitatis Vratislaviensis, 2729, 105-119, Wrocław.
- Kowalczyk A., 2005 – *Zasilanie wód podziemnych w warunkach antropopresji na przykładzie triasu śląsko-krakowskiego*. Współczesne Problemy Hydrogeologii. T. 12. Wydawnictwa Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 363-370, Toruń.
- Miotliński K., Kowalczyk A., 2007: *Obecność niklu w wodach podziemnych jako wynik zmiany położenia zwierciadła wody*. Współczesne Problemy Hydrogeologii. Kraków-Krynica, 2007.
- Toth J., 1963: *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*. Journal Geophysical Research, 68, 4795-4812.
- Trzepla M., 2005: *Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski. 1:50000, arkusz Racibórz (966)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Waterloo Hydrogeologic Inc. (WHI), 2004. *Visual MODFLOW v 4.0. User's Manual*.