

## Numeryczny model przepływu wód podziemnych na potrzeby oceny zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych i zwykłych na przykładzie zlewni potoków Milika i Andrzejówki

Kamila Buszta<sup>1</sup>, Tadeusz Szklarczyk<sup>1</sup>

**The numerical model of groundwater flow for the assessment of disposable resources of therapeutic and fresh water: Milik and Andrzejówka catchment case study.** Prz. Geol., 63: 628–634.

*Abstract.* Model investigations were performed to determine the groundwater circulation system in the catchment area Andrzejówka and Milik streams. The results of these studies allowed to assess the renewability of groundwater resources. Documentation of disposable resources was prepared in the separate units water balance area for fresh and therapeutic water. These measures allowed to define the conditions of groundwater use in the analyzed area. This object was achieved through the development of a multi-layer mathematical model using the software package "Visual MODFLOW", v. 4.3. According to the authors, the main advantage of the model is its ability to provide a coherent concept for the conditions of circulation and exchange of water with using most of the available direct and indirect data. The model in this present form is suitable for regional assessment of water circulation conditions including more than ever precise definition of renewable and disposable resources and water management balance, both fresh and therapeutic water.

**Keywords:** numerical model, disposable resources, therapeutic water, fresh water, water management

Sformułowanie zasad racjonalnej gospodarki wodnej wymaga określenia warunków krążenia i wymiany oraz bilansów wodnych w badanych zlewniach. Ze względu na skomplikowany system krążenia wód w zlewniach Milika i Andrzejówki jest konieczne sprawdzenie hipotez dotyczących związków wód leczniczych ze zwykłymi. Model numeryczny przygotowano na podstawie koncepcyjnego modelu hydrodynamicznego, opracowanego na miarę stanu rozpoznania i możliwości obliczeniowych. W realizacji tego zadania wykorzystano dane i materiały archiwalne oraz wyniki kartowania hydrogeologicznego.

### MODEL KONCEPCYJNY

Badaniami modelowymi, na potrzeby bilansowania wód podziemnych, objęto fragment prawostronnej zlewni Popradu ze zlewniami potoków Milik oraz Andrzejówka o powierzchni 27,645 km<sup>2</sup>. Występują tu następujące obszary górnicze (OG) złóż wód leczniczych: cały OG „Muszynianka” oraz północno-zachodni fragment OG „Szczawnik Cechini” i wschodni OG „Żegiestów Zdrój”. Obszar bilansowy stanowi natomiast cały OG „Muszynianka” (zlewnia dolnego Szczawnika i Andrzejówki z prawostronnym dopełnieniem zlewni Popradu) oraz północno-zachodni fragment OG „Szczawnik Cechini” (zlewnia górnego Milika). Granice wyznaczające zewnętrzny zarys modelowanego zbiornika mają naturalny charakter i są związane z granicami hydrodynamicznymi opartymi głównie na ciekach powierzchniowych oraz częściowo na działach wód podziemnych.

Na badanym obszarze wyróżnia się dwa piętra wodonośne występujące w związku hydraulicznym z wodami powierzchniowymi – czwartorzędowe oraz paleogeńskie, które jest wykształcone w szczelinowo-porowych utworach fliszowych.

Jako podstawę budowy i identyfikacji modelu matematycznego przyjęto schemat warunków hydrogeologicznych

otrzymany na podstawie kartowania hydrogeologicznego z września 2013 r. oraz dane geologiczne i hydrogeologiczne z dokumentacji, publikacji i materiałów archiwalnych. Istniejący układ krążenia wód podziemnych przedstawiono jako strukturę ciągłą o stałych lub zmiennych parametrach hydrogeologicznych. Zasadniczym i eksploatowanym poziomem wodonośnym jest szczelinowo-porowy poziom utworów fliszowych. Wszystkie rzeki i ich dopływy mają bezpośredni lub pośredni kontakt hydrauliczny z przypowierzchniową, czwartorzędową lub fliszową warstwą wodonośną. W warunkach naturalnych ciek te mają charakter drenujący, a tylko lokalnie – zasilający. Główną bazę drenażową badanego obszaru stanowi rzeka Poprad i jej większe dopływy (Milik i Andrzejówka) oraz liczne ujęcia wód, eksploatujące wody lecznicze i zwykłe z fliszowego poziomu wodonośnego. Zasilanie czwartorzędowego poziomu wodonośnego następuje głównie przez bezpośrednią infiltrację opadów atmosferycznych oraz lokalnie z cieków powierzchniowych, a także z poziomu fliszowego. Zasilanie szczelinowego, fliszowego poziomu wodonośnego odbywa się bezpośrednio z opadów atmosferycznych, na wschodniach lub pośrednio przez przesączanie się wód przez utwory słaboprzepuszczalne (utwory zwietrzelinowe).

### MODEL NUMERYCZNY

Obszar badań zdyskretyzowano siatką kwadratową o boku 50 m. Na wschód i zachód granice modelu odsunięto poza wododziały zlewni Milika i Andrzejówki, do najbliższych cieków powierzchniowych występujących poza granicami tych zlewni (ryc. 1). W zakresie właściwości filtracyjnych warstw wodonośnych przyjęte wielkości są podane na podstawie wyników badań terenowych i laboratoryjnych oraz danych zestawionych w dokumentacjach hydrogeologicznych i literaturze. Modelem zdecydowano się objąć profil geologiczny do rzędnej 500 m n.p.m., a istniejący układ

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; buszta@agh.edu.pl, tszklarcz@agh.edu.pl.

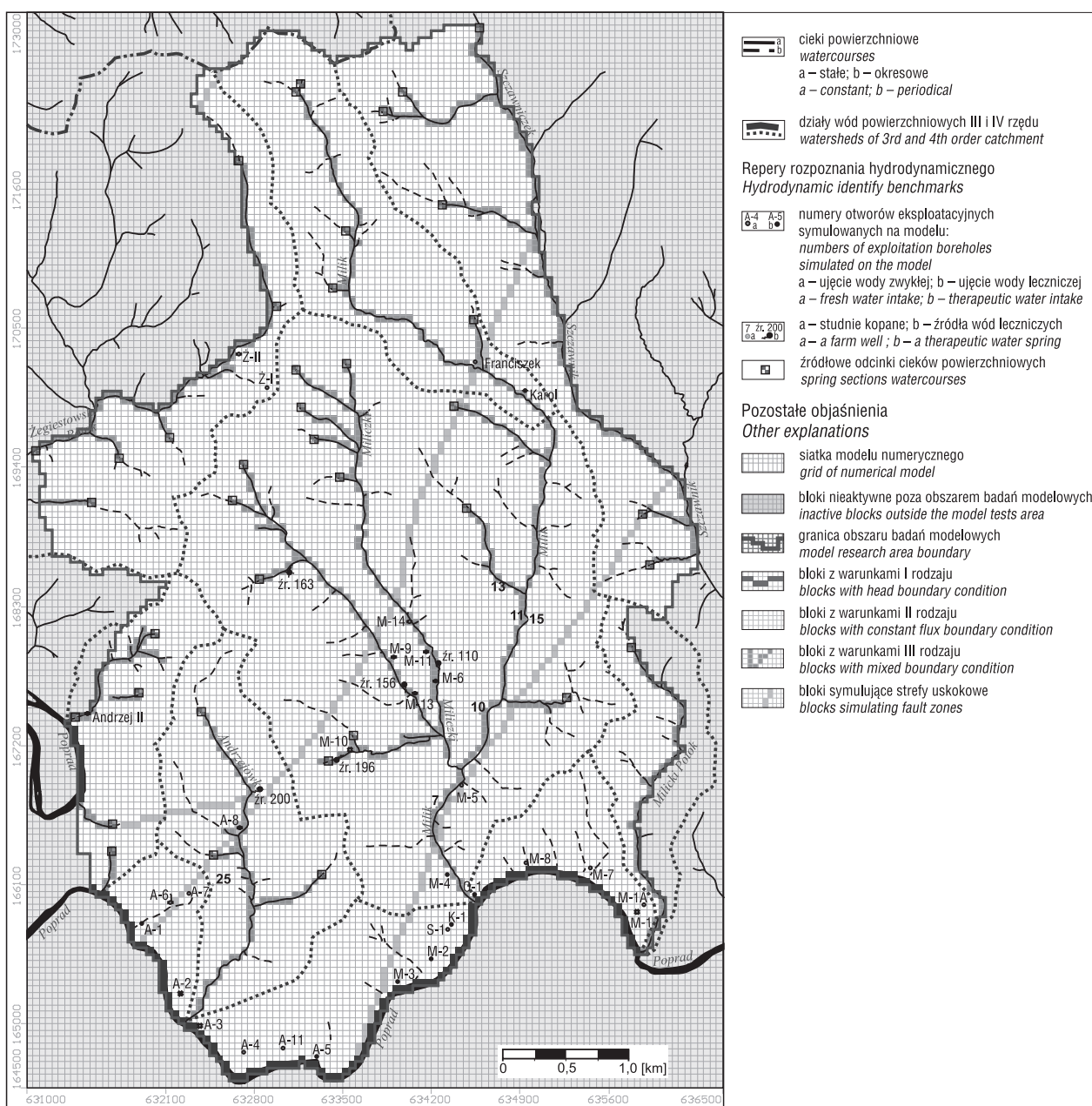
krążenia wód podziemnych sprowadzono na modelu matematycznym do układu dziesięciowarstwowego, który stanowił szkielet wyjściowy do dalszych prac. Przy podziale kierowano się zmiennością przepuszczalności skał fliszowych wraz z głębokością. Każdej z 10 warstw modelu przypisano określony typ warunków hydrodynamicznych: warstwa nr 1 – swobodny, warstwy nr 2 i 3 – mieszany (swobodno-naporowy), warstwy nr 4–10 – naporowy.

Charakterystykę warunków krążenia wód oraz parametry warstw wodonośnych niezbędne do konstrukcji regionalnego modelu badanej zlewni przyjęto, wzorując się na modelach rejonów Krynicy (Witczak i in., 2002) i Muszyny (Kania i in., 2009a, b). Na badanym obszarze zmienność współczynnika filtracji jest bardzo duża i sięga nawet czterech rzędów wielkości od  $1,5 \cdot 10^{-8}$  do  $1,25 \cdot 10^{-4}$  m/s. Zmniejsza się on wraz ze wzrostem głębokości badanych utworów.

Odrębnym zagadnieniem jest przepuszczalność stref uskokowych oraz ich rozległość. Ze względu na słabe rozpoznanie uskoków w obszarze badań, na modelu symulowano tylko główne uskoki (ryc. 1), zakładając w nich wzrost przepuszczalności zarówno wzdłuż, jak i w poprzek dyslokacji.

Oddziaływanie cieków powierzchniowych na wody pierwszej zawodnionej warstwy uwzględniono w obliczeniach symulacyjnych w postaci warunków brzegowych III rodzaju, z wyjątkiem rzeki Poprad, głównej bazy drenażowej przepływu regionalnego, na której zadano warunek I rodzaju. Istniejące źródła wód leczniczych były symulowane warunkami III rodzaju, w tych samych blokach, co ciekі powierzchniowe (ryc. 1).

Warunek II rodzaju zastosowano wewnątrz badanego obszaru, symulując nim zasilanie z infiltracji opadów atmosferycznych do pierwszej zawodnionej warstwy wodo-



Ryc. 1. Mapa dokumentacyjna badań modelowych  
Fig. 1. Documentation map of model research

nośnej oraz ujęcia wód podziemnych eksploatujące warstwę wodonośną z określoną wydajnością (ryc. 1).

W trakcie badań modelowych wykonano trzy warianty symulacyjne przy założeniu średnich niskich i średnich stanów wody w ciekach powierzchniowych:

**Wariant 1** polegał na rekonstrukcji położenia zwierciadła wody w warunkach utrzymania wielkości poboru wód podziemnych z września 2013 r. na obszarze badań. Obliczenia prognostyczne wykonano dla opadów z 2013 r. Wariant ten objęto procesem kalibracji modelu numerycznego.

**Wariant 2** polegał na odtworzeniu naturalnego położenia zwierciadła wód podziemnych, jakie zostałyby osiągnięte na całym obszarze badań w warunkach całkowitego braku poboru wody z ujęć wód podziemnych. W tym celu na modelu wyłączono wszystkie ujęcia wody. Obliczenia prognozowanych wysokości hydraulicznych wykonano dla średnich opadów atmosferycznych z wielolecia 1955–2013. Wariant ten wykorzystano do oceny zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych wód zwykłych i leczniczych badanego obszaru.

**Wariant 3** polegał na rekonstrukcji położenia zwierciadła wody w warunkach utrzymania wielkości poboru wód podziemnych o ilości aktualnie zatwierdzonych lub wnioskowanych do przyjęcia zasobów eksploatacyjnych dla rejonu badań. Obliczenia prognostyczne wykonano, przyjmując takie same warunki, jak w wariantcie 2. Miały one na celu wykazanie niedoboru lub rezerw zasobów dyspozycyjnych w obszarze bilansowym.

## KALIBRACJA MODELU NUMERYCZNEGO

Największe poprawki w stosunku do wartości przyjmowanych przy tworzeniu tablic wejściowych dotyczyły

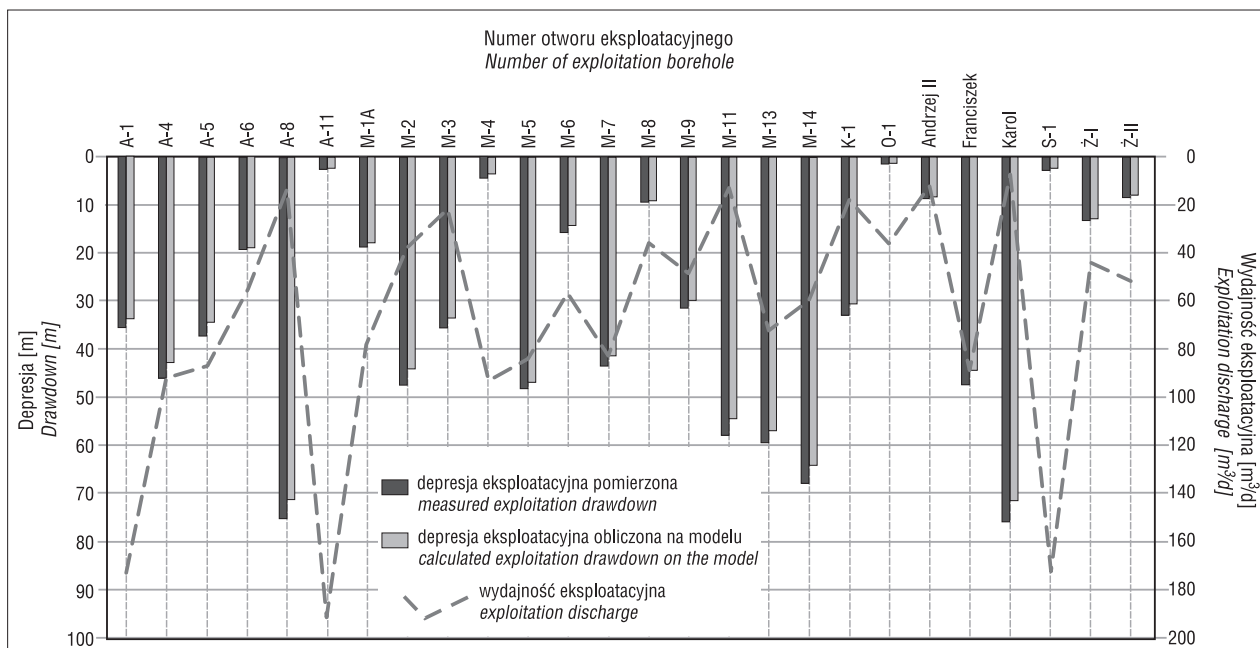
przede wszystkim współczynników filtracji większości warstw symulowanych na modelu. Uzyskano dzięki temu zadowalające dopasowanie zwierciadła wody na modelu do położenia źródłowych odcinków cieków (39 punktów reperowych) oraz w odniesieniu do 31 punktów reperowych (otwory hydrogeologiczne i studnie kopane), dla których istniały informacje o położeniu piezometrycznego zwierciadła wody.

W procesie weryfikacji modelu w mniejszym stopniu ulegało zmianie zasilenie infiltracyjne z opadów atmosferycznych do pierwszej zawodnionej warstwy, gdzie zanotowano jego wzrost o 8%.

W drugim etapie kalibracji modelu dokonano bardziej szczegółowej korekty współczynnika filtracji dla rejonów ujęć wód podziemnych, odtwarzając w nich wyniki próbnych pompowań wykonanych dla każdej studni osobno. Porównanie wielkości depresji, uzyskanej zgodnie z symulacją na modelu, z ustalonymi depresjami dla poszczególnych odwiertów wskazuje na zadowalającą zgodność modelu z danymi doświadczalnymi (ryc. 2).

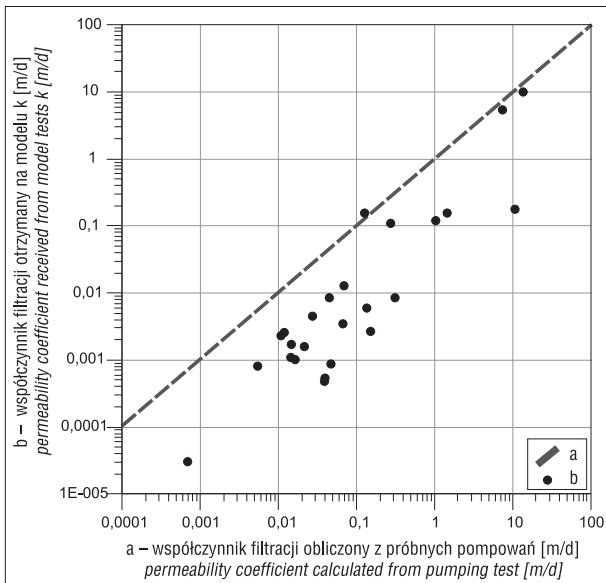
W wyniku tej kalibracji na modelu numerycznym uzyskano inne wartości współczynników filtracji w otworach eksploatacyjnych niż obliczone na podstawie wyników próbnych pompowań badawczych (ryc. 3). Współczynniki filtracji uzyskane z pompowań są znacznie wyższe od regionalnych wartości otrzymanych np. z wieków trytowych. Dzieje się tak zarówno wskutek oczyszczania się strefy przyotworowej w czasie pompowań, jak i utrudnień regionalnych przepływów wywołanych niejednorodnością warstw i tektoniką (Porwisiński i in., 1999; Nałęcz i in., 2002).

W trzecim etapie tarowania modelu dopasowano odpływ podziemny ze zlewni cząstkowych symulowanych na modelu z odpływem podziemnym, ocenionym metodą



**Ryc. 2.** Symulacja eksploatacji wód podziemnych – porównanie depresji obliczonej na modelu, przy symulacji poboru na poziomie zatwierdzonych zasobów eksploatacyjnych, z zatwierdzoną depresją eksploatacyjną – kalibracja modelu, stan na wrzesień 2013 r. (wariant 1)

**Fig. 2.** Simulation of groundwater exploitation – a comparison of the drawdown calculated on the model with the approved operating drawdown – calibration model for the state to September 2013 (option 1)



**Ryc. 3.** Wykres kalibracyjny modelu, stan na wrzesień 2013 r. (wariant 1). Porównanie wartości współczynników filtracji; a – obliczonych na podstawie wyników próbnych pompowań badawczych oraz b – otrzymanych na modelu numerycznym  
**Fig. 3.** The calibration graph model for the state to September 2013 (option 1). Comparison of the permeability coefficients; a – calculated on the basis of results pumping tests with b – received with a numerical model

hydrologiczną w pomierzonych punktach na ciekach powierzchniowych we wrześniu 2013 r.

Przyjęty podział obszaru filtracji na bloki obliczeniowe o wymiarach 50×50 m okazał się w zupełności wystarczający do schematycznego odwzorowania na modelu matematycznym istotnych szczegółów budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych oraz elementów zagospodarowania terenu i techniczno-eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych. Wyniki kalibracji modelu przedstawiono graficznie na rycinie 4.

### KRYTERIA PRZYJĘTE DO WYDZIELENIA OBSZARÓW BILANSOWYCH

Obszar bilansowy wyznaczono na podstawie wyników badań modelowych oraz istniejącego rozpoznania warunków hydrogeologicznych badanego obszaru. W wydzielonym na podstawie podziału zlewniowego obszarze bilansowym (ryc. 5), o powierzchni 20,19 km<sup>2</sup>, znalazły się zlewnie Potoków: Milik, Andrzejówka, prawostronna zlewnia Milickiego Potoku oraz Popradu, między Milickim Potokiem a potokiem bez nazwy na zachodzie obszaru.

W każdej z jednostek bilansowych obszaru wydzielono dwa podobszary zasobowe (ryc. 5) – ważniejszy, w obrębie którego występują zasoby odnawialne i dyspozycyjne wód leczniczych oraz uzupełniający, zawierający zasoby wód zwykłych.

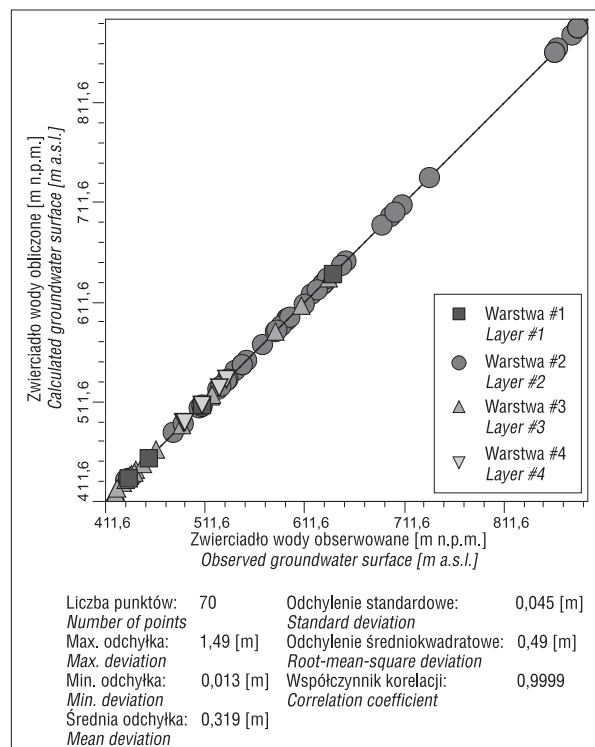
Symulacje przeprowadzone na modelu numerycznym pozwoliły wyróżnić dwa systemy krążenia wód podziemnych: lokalny i regionalny. Wyniki tych symulacji wykazały, zgodnie z modelem koncepcyjnym, że wymiana wód zwykłych odbywa się głównie w strefie głębokości do 100 m (lokalny system przepływu). Jest to zgodne z normalnym krążeniem wód podziemnych w utworach fliszowych

Karpat. Dla tworzenia się mineralnych wód leczniczych istotne znaczenie ma głębsze krążenie, w ramach regionalnego systemu przepływu (Ciężkowski, 2002; Witzczak i in., 2002). W każdej z wydzielonych jednostek bilansowych główne obszary zasilania systemu wód leczniczych znajdują się w szczytowych, wododziałowych partiach grzbietów górskich. Wody w obszarach wododziałowych mają tendencję do migracji w głąb. W strefach drenażu, obejmujących głównie doliny, wypływ wód jest skierowany ku górze do koryt rzek i potoków oraz do źródeł (ryc. 5). Ilość wód biorących udział w regionalnym systemie przepływu można wiązać z zasobami odnawialnymi wód leczniczych. Bilans tych wód oceniono przez wyznaczenie na modelu strefy wypływu wód systemu regionalnego do czwartej warstwy modelu (100–200 m p.p.t.). Wykonany model numeryczny umożliwił to przez wyznaczenie różnicy ciśnień między warstwą nr 5 a warstwą nr 4 oraz wielkości przepływu między tymi warstwami.

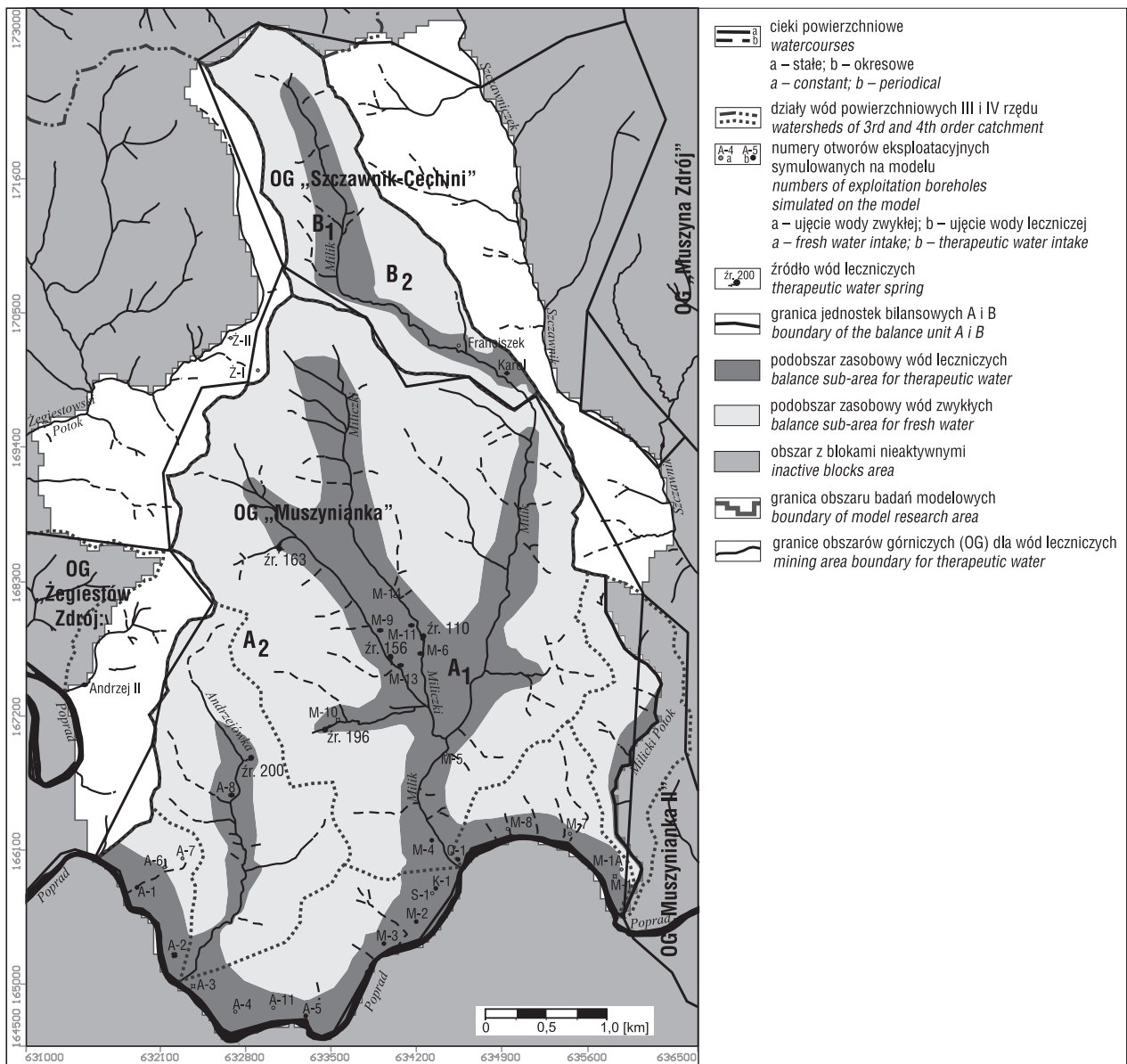
Opisane powyżej kryterium hydrodynamiczne pozwoliło na wydzielenie potencjalnych podobszarów występowania wód leczniczych w dokumentowanym rejonie.

Przy wyznaczaniu tych podobszarów zasobowych uwzględniono również inne przesłanki, takie jak: zasięg stwierdzonych wystąpień wód leczniczych, występowanie ekshalacji CO<sub>2</sub> oraz podwyższone stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym.

Ustalony zasięg podobszarów zasobowych wód leczniczych (ryc. 5) obejmuje wszystkie stwierdzone wystąpienia wód leczniczych ujęte otworami i występujące w źródłach. W północnych częściach jednostek bilansowych ograniczono nieco zasięg występowania wód leczniczych, oparty na kryterium hydrodynamicznym, ze względu na brak pozostałych dwóch przesłanek wymienionych powyżej.



**Ryc. 4.** Wynik kalibracji modelu, stan na wrzesień 2013 r. (wariant 1)  
**Fig. 4.** The result of a calibration model for the state to September 2013 (option 1)



Ryc. 5. Podział jednostek bilansowych na podobszary zasobowe wód leczniczych oraz wód zwykłych  
 Fig. 5. The division balancing units into balance sub-area for therapeutic and fresh water

Podobszary zasobowe wód zwykłych w wydzielonych jednostkach bilansowych wyznaczono poza strefami zajętymi przez podobszary zasobowe wód leczniczych.

### OCENA ZASOBÓW ODNAWIALNYCH ORAZ DYSPOZYCYJNYCH WÓD LECZNICZYCH I ZWYKŁYCH

Procedura oceny zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych wód podziemnych wymaga przedstawienia szczegółowego bilansu wodnego wydzielonego systemu wodonośnego (Paczyński i in., 1996; Szklarczyk i in., 2011; Herbich i in., 2013). Spełnienie tego warunku jest możliwe jedynie na podstawie wyników badań modelowych.

Zasoby odnawialne oszacowano, wykorzystując bilans wód podziemnych wydzielonych jednostek bilansowych, uzyskany na modelu matematycznym dla warunków naturalnych (wariant 2) oraz wydzielonych podobszarów zasobowych wód leczniczych i zwykłych (ryc. 5). Numeracja

warstw w bilansie wodnym odpowiada numeracji przyjętej na modelu matematycznym.

Podziału jednostek bilansowych A i B (ryc. 5) na podobszary zasobowe **wód leczniczych A<sub>1</sub>** (warstwy 5–10) i **B<sub>1</sub>** (warstwy 5–10) oraz na podobszary zasobowe **wód zwykłych A<sub>2</sub>** (warstwa 2+3+4) i **B<sub>2</sub>** (warstwa 2+3+4) użyto do oszacowania na modelu wielkości zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych wód leczniczych i zwykłych. Przy obliczeniach modelowych przyjęto następujące ograniczenia:

- w obszarach zasobowych wód leczniczych nie obliczano zasobów dyspozycyjnych wód zwykłych. Jest to zgodne z zasadami przyjętymi w dotychczasowych dokumentacjach ustalających obowiązujące zasoby dyspozycyjne (Ciężkowski i in., 1999; Porwisz, 2002; Kania i in., 2009a). W obszarze występowania wód leczniczych nie ma w tej sytuacji zasobów dyspozycyjnych wód zwykłych;
- zasoby dyspozycyjne wód leczniczych określono na modelu jako ilość wód wpływających z głębszego regionalnego systemu krążenia do obszaru drenażowego

wyznaczonego w obrębie warstwy 4 modelu, występującej na głębokości od 100 do 200 m p.p.t.;

– zasoby dyspozycyjne wód zwykłych podobszarów A<sub>2</sub> i B<sub>2</sub> obliczono wg formuły: 20% zasobów odnawialnych danego podobszaru zasobowego, ze względu na niedostateczne rozpoznanie obszarów wododziałowych (nieco mniej niż w przypadku innych dokumentacji hydrogeologicznych dotyczących wód leczniczych rejonu Karpat fliszowych – Witczak i in., 2002; Porwisz, 2002; Kania i in., 2009a);

– zasoby dyspozycyjne wód leczniczych podobszaru A<sub>1</sub> obliczono wg formuły: 100% wód głębokiego krążenia (z warstwy 5) dopływających do tego podobszaru + 50% (niedostateczne rozpoznanie wierceniami hydrogeologicznymi w górnych odcinkach cieków powierzchniowych spadków hydraulicznych i współczynników filtracji) wód dopływu lateralnego (z warstwy 4) do tego podobszaru, częściowo rozcieńczającego wody zmineralizowane;

– zasoby dyspozycyjne wód leczniczych dla podobszaru B<sub>1</sub> obliczono wg formuły: 100% wód głębokiego krążenia (z warstwy 5) dopływających do tego podobszaru + 30% (ze względu na brak rozpoznania wierceniami hydrogeologicznymi spadków hydraulicznych i współczynni-

ków filtracji górnego odcinka potoku Szczawnik) wód dopływu lateralnego (z warstwy 4) do tego podobszaru, częściowo rozcieńczającego wody zmineralizowane.

W tabeli 1 zestawiono obliczone moduły zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych dla obszaru bilansowego, wydzielonych z niego jednostek bilansowych i podobszarów zasobowych wód leczniczych i zwykłych.

## BILANS WODNOSPONDARZY WÓD PODZIEMNYCH

Bilans wodnogospodarczy (wariant 3) w analizowanej zlewni bilansowej wskazuje, że pobór wód podziemnych w wysokości zasobów eksploatacyjnych będzie niższy od obliczonych zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych i wynosi od 5,14% w podobszarze zasobowym B<sub>1</sub> do 86,27% w podobszarze zasobowym A<sub>1</sub> (tab. 1). Pobór wód zwykłych będzie również nieco niższy od obliczonych dla nich zasobów dyspozycyjnych i wynosi od 42,29% w podobszarze zasobowym B<sub>2</sub> do 92,74% w podobszarze zasobowym A<sub>2</sub>.

Główną bazę drenażową obszaru bilansowego stanowiąc będzie nadal rzeka Poprad wraz z głównymi dopływami – potoki Milik i Andrzejówka. Eksploatacja ujęć wody

**Tab.1.** Zestawienie modułów zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych wód podziemnych oraz elementów bilansów wodnogospodarczych dla wydzielonych jednostek i podobszarów zasobowych

**Table 1.** Summary of modules disposable and renewable resources of groundwater and water management elements for distributed units and resource sub-area

Nazwa i symbol obszaru zasobowego <i>Name and symbol of the resource area</i>	Symbol obszaru na mapie <i>Symbol of the resource area</i>	Typ wód podobszaru zasobowego <i>Water type of resource subarea</i>	Powierzchnia obszaru <i>Area [km<sup>2</sup>]</i>	Zasoby odnawialne <i>Renewable resources</i>	Zasoby dyspozycyjne <i>Disposable resources</i>		Procentowy udział zasobów dyspozycyjnych w zasobach odnawialnych <i>Percentage share of disposable resources in renewable resources [%]</i>	Procentowy udział poboru wód w zasobach dyspozycyjnych <i>Percentage share of water consumption in renewable resources [%]</i>
					wody zwykłe <i>fresh water</i>	wody lecznicze <i>therapeutic water</i>		
				moduł zasobów <i>module of resources [dm<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>)]</i>	moduł zasobów <i>module of resources [dm<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>)]</i>	moduł zasobów <i>module of resources [dm<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>)]</i>		
Jednostka bilansowa A <i>Balancing unit A</i>	A1	podobszar zasobowy wód leczniczych <i>therapeutic water resource sub-area</i>	6,010	5,68	0,00	1,46	25,80	86,27
	A2	podobszar zasobowy wód zwykłych <i>fresh water resource sub-area</i>	11,275	4,72	0,94	0,00	20,00	92,74
	A	cała jednostka bilansowa <i>whole balancing unit</i>	17,285	5,05	0,62	0,51	22,25	89,81
Jednostka bilansowa B <i>Balancing unit B</i>	B1	podobszar zasobowy wód leczniczych <i>therapeutic water resource sub-area</i>	0,950	6,70	0,00	1,71	25,50	5,14
	B2	podobszar zasobowy wód zwykłych <i>fresh water resource sub-area</i>	1,955	6,22	1,24	0,00	20,00	42,29
	B	cała jednostka bilansowa <i>whole balancing unit</i>	2,905	6,37	0,84	0,56	21,90	27,43
<b>Sumaryczne zasoby wód zwykłych</b> <i>Total fresh water resources</i>			<b>13,230</b>	<b>4,94</b>	<b>0,99</b>	<b>0,00</b>	<b>20,00</b>	<b>83,36</b>
<b>Sumaryczne zasoby wód leczniczych</b> <i>Total therapeutic water resources</i>			<b>6,960</b>	<b>5,82</b>	<b>0,00</b>	<b>1,50</b>	<b>25,70</b>	<b>73,65</b>
<b>Cały obszar bilansowy</b> <i>Whole balancing area</i>			<b>20,190</b>	<b>5,24</b>	<b>1,16</b>		<b>22,19</b>	<b>79,06</b>

w wysokości przyjętych zasobów eksploatacyjnych nie powoduje znaczących zmian w układzie pola hydrodynamicznego.

Wielkość poboru wód podziemnych w wysokości zasobów eksploatacyjnych, z ujęć zlokalizowanych w obszarze bilansowym, będzie pokrywana przez zmniejszone przepływy w ciekach powierzchniowych. Wpływ poboru wód na ciek powierzchniowy jest niewielki i stanowi 17,88% sumarycznego przepływu wody we wszystkich ciekach występujących w obszarze bilansowym.

Podsumowując, należy stwierdzić, że pobór wód z ujęć w wysokości zatwierdzonych zasobów eksploatacyjnych nie spowoduje:

- niespełnienia celów środowiskowych określonych dla wód powierzchniowych, związanych z JCWPd, zawartych w planie gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Wisły (Plan..., 2011);

- wystąpienia znacznych szkód w ekosystemach lądowych zależnych od wód podziemnych;

- wystąpienia, w skali regionalnej, znacznego obniżenia zwierciadła wód podziemnych;

- krótkotrwałych lub ciągłych zmian kierunku przepływu wód podziemnych, występujących w ograniczonym obszarze, które mogą powodować dopływ wód słonych lub innych wód o jakości zagrażającej zanieczyszczeniem wód podziemnych.

Rezerwa zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych w podobszarze zasobowym  $A_1$  wyniesie  $104,32 \text{ m}^3/\text{d}$ , a w podobszarze  $B_1$  –  $132,8 \text{ m}^3/\text{d}$ . Może być ona wykorzystana pod warunkiem, że poszukiwanie tych wód będzie się odbywać w rejonach, gdzie w warstwie nr 4 modelu matematycznego depresja regionalna jest mniejsza od  $0,5 \text{ m}$  i zostanie uwzględniona ochrona źródeł wód leczniczych.

Rezerwa zasobów dyspozycyjnych wód zwykłych w podobszarze zasobowym  $A_2$  wyniesie  $66,8 \text{ m}^3/\text{d}$ , a w podobszarze  $B_2$  –  $121,2 \text{ m}^3/\text{d}$ . Może być ona wykorzystana pod warunkiem, że poszukiwanie tych wód będzie się odbywać w rejonach, gdzie w warstwie nr 3 modelu matematycznego depresja regionalna jest mniejsza od  $0,5 \text{ m}$  i zostanie uwzględniona ochrona źródeł wód leczniczych i zwykłych. Głębokość nowych odwiertów z wodą zwykłą nie może przekraczać  $100 \text{ m}$ , aby nie naruszyć reżimu krążenia wód mineralnych.

## PODSUMOWANIE

Według autorów główną zaletą modelu jest przedstawienie na nim spójnej koncepcji warunków krążenia i wymiany wód uwzględniającej większość dostępnych danych bezpośrednich i pośrednich. Model w obecnym kształcie

nadaje się do regionalnej oceny warunków krążenia wód łącznie z bardziej niż dotychczas precyzyjnym określeniem zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych oraz bilansu wodnogospodarczego zarówno wód zwykłych, jak i leczniczych.

Autorzy serdecznie dziękują Zarządowi firmy Spółdzielnia Pracy „MUSZYNIANKA” oraz pracownikom Państwowego Instytutu Geologicznego – Oddział Karpacki pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Józefa Chowańca za udostępnienie informacji, bez których nie mogłaby powstać niniejsza publikacja.

Prezentowane badania częściowo sfinansowano w ramach badań statutowych katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie – umowa 11.11.140.026.

## LITERATURA

- CIEŹKOWSKI W., JÓZEFKO J., SCHMALZ A. & WITCZAK S. 1999 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne wód leczniczych i dwutlenku węgla (jako kopaliny towarzyszącej) ze złoża w uzdrowisku Krynica oraz ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych (zwykłych, leczniczych i o właściwościach leczniczych) w zlewni Krynizanki. Politechnika Wroclawska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
- CIEŹKOWSKI W. (red.) 2002 – Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce. Poradnik metodyczny. Ministerstwo Środowiska. Wyd. WNT Wrocław.
- HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K. & RODZUCH A. 2013 – Metodyka określania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w obszarach bilansowych z uwzględnieniem potrzeb jednolitych bilansów wodnogospodarczych. Poradnik Metodyczny. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- KANIA J., JÓZEFKO I. & WITCZAK S. 2009a – Metodyka oceny zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych rejonu Muszyny na podstawie modelowania w systemie ArcGIS i GSM. Biul. Państw. Inst. Geol., 436: 205–214.
- KANIA J., OSZCZYPKO N. & WITCZAK S. 2009b – Wielowarstwowy regionalny model rejonu Muszyny zintegrowany w systemie ArcGIS i GSM. Biul. Państw. Inst. Geol., 436: 215–222.
- PLAN gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Wisły, 2011 – Monitor Polski, nr 49, poz. 549.
- NAŁĘCKI P., REŠKO D., SCHMALZ A. & WITCZAK S. 2002 – Charakterystyka parametrów hydrogeologicznych szczelinowo-porowego złoża wód leczniczych w Krynicy. Biul. Państw. Inst. Geol., 404: 145–163.
- PACZYŃSKI B., MACIOŠCZYK T., KAZIMIERSKI B. & MITRĘGA J. 1996 – Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych. MOSZNIŁ, Warszawa.
- PORWISZ B., RADWAN J. & ZUBER A. 1999 – Zasilanie ujęć wód podziemnych rejonu Tylicza. [W:] Krajewski S. & Sadurski A. (red.), Współcz. probl. hydrogeol., t. IX: 287–292. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PORWISZ B. (red.) 2002 – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych i towarzyszących lub występujących odrębnie wód potencjalnie leczniczych na obszarze Karpat i zapadliska przedkarpaccy, Ob. G-4976, PG S.A., Kraków.
- SZKLARCZYK T., STACH-KALARUS M. & KMIECIK E. 2011 – Wybrane metody i narzędzia badawcze w bilansowaniu wodnogospodarczym i ocenie stanu wód podziemnych na przykładzie zlewni Koprzywianki. Wyd. AGH, Kraków.
- WITCZAK S., DUŃCZYK L., MOTYKA J. & OSZCZYPKO N. 2002 – Regionalny wielowarstwowy model pola hydrodynamicznego w utworach fliszu karpaccy na przykładzie zlewni Krynizanki (płaszczowina magurska). Biul. Państw. Inst. Geol., 404: 263–290.