

WPŁYW NIEJEDNORODNOŚCI OŚRODKA SKALNEGO NA OBLICZANIE ZASOBÓW DYSPOZYCYJNYCH WÓD PODZIEMNYCH

THE INFLUENCE OF THE HETEROGENEITY OF THE AQUIFER ON THE ASSESSMENT OF GROUNDWATER DISPOSABLE RESOURCES

STANISŁAW STAŚKO¹, MAREK WCISŁO¹

Abstrakt. Problem przeprowadzenia wiarygodnej oceny zasobowej w środowisku szczelinowym wiąże się ściśle z zagadnieniami dotyczącymi stopnia rozpoznania rzeczywistych parametrów tego środowiska i dróg przepływu, formujących się w jego obrębie. W zastosowaniu modelu ciągłego ośrodka są liczne ograniczenia, związane m.in. z brakiem możliwości przewidywania rozkładu zwierciadła wód podziemnych i ograniczonej łączności między składowymi sieci hydraulicznej (Motyka, 1998; Nawalny, 1999). Podstawą rozważań były dwa przykłady, pierwszy z obszaru występowania krasowo-szczelinowych formacji triasu opolskiego, drugi z utworów szczelinowo-porowych fliszu karpackiego. W obu przypadkach stosowano metodę różnic skończonych (Modflow). Jak wykazały badania, stosowanie modelu deterministycznego analogu środowiska porowego (EPM) może prowadzić do błędnych wniosków odnośnie zasobności systemu. O ile depresje w poszczególnych rzeczywistych ujęciach w większości przypadków są możliwe do symulacji, o tyle próba symulacji ich wzajemnego oddziaływania może zakończyć się niepowodzeniem. Przypadek rejonu Tarnowa Opolskiego stanowi potwierdzenie powyższych uwag. Ośrodek szczelinowo-krasowy triasu opolskiego (szczególnie przykryty młodszymi utworami izolującymi) pozostaje nierozpoznany pod względem rzeczywistego rozkładu sieci spękań i kanałów. W artykule podjęto próbę analizy możliwości istnienia dotychczas niewyinterpretowanych uprzywilejowanych dróg przepływu i ich oddziaływania na ostateczną ocenę zasobową. W przypadku fliszu Karpat badania modelowe odwzorowujące w ostatecznym stopniu zgodność strumienia wód podziemnych i zasoby w skali regionalnej nie pozwalają na wierne odwzorowywanie lokalnych ujęć. Zasoby eksploatacyjne pojedynczego otworu, zatwierdzone zgodnie z procedurami, okazują się zawyżone dwu-, trzykrotnie w warunkach wieloletniej eksploatacji. Przedstawiono dyskusję i przyczyny błędów oraz ograniczenia stosowanych metod modelowania.

Słowa kluczowe: niejednorodność, modelowanie, środowisko szczelinowe.

Abstract. Reliable assessment of groundwater resources in fractured medium requires a reasonable degree of recognition of real parameters of the rock environment and flow path network. There are numerous limitations in the use of the model of the equivalent porous medium, related e.g. both to the impossibility of prediction of the groundwater table distribution and the limited communication between the constituents of the hydraulic system (Motyka, 1998; Nawalny, 1999). The present considerations are based on two examples. The first one is from the area of the occurrence of karstic-fractured formations of the Opole Triassic aquifer, whereas the second one is from porous-fractured Flysch deposits of the Carpathian aquifer. In either case, a method of finite differences (Modflow) has been applied. As shown by the research, the usage of the deterministic approach and the analogue equivalent porous medium (EPM) could create incorrect conclusions in relation to water resources of the system. Depressions in individual wells are in most cases possible to be simulated, but the attempt to simulate an interaction between them can fail. The case study of the Tarnów Opolski region confirms the above remarks. The karstic-fractured Opole aquifer (especially if covered with younger sediments acting as an isolating layer) remains unrecognized in respect of the real network of fractures and channels. The article is an attempt to analyse the possibility of the existence of previously uninterpreted zones of preferential flow and their influence on the final estimation of resources. In case of the Carpathian Flysch, the modeling research, representing finally the conformity of the groundwater flow pattern and the amount of resources in the regional scale, do not allow for acquiring realistic images of local captures. A safe yield limit of a single well, approved in compliance with standard procedures, appears to be two to three times exaggerated in a long-term period of exploitation. The discussion and reasons of errors and limitations of the applied modelling methods are also presented.

Key words: heterogeneity, modelling, fractured media.

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, Zakład Hydrogeologii Podstawowej, ul. Cybulskiego 32, 50-204 Wrocław

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Obiektem badań był Główny Zbiornik Wód Podziemnych GZWP 333 – Trias opolski, położony w Polsce południowo-zachodniej, zlokalizowany w obrębie utworów środkowotriasowych (fig. 1). Poniżej znajduje się zbiornik tworzony przez serie klastyczne piaskowców permu i triasu (czerwonego spągowca i pstrego piaskowca) oraz utwory węglanowe retu. Wodonośne serie w skałach węglanowych rozdziela się lokalnie na trzy poziomy obejmujące: wapienie dolomityczne retu, wapienie i wapienie dolomityczne wapienia muszlowego oraz cienkie wkładki wapienne w piaskowcowo-ilastych seriach kajpru.

Wody podziemne w obrębie GZWP 333 występują w skomplikowanym systemie szczelinowo-krasowo-porowym. Serie skalne triasu zapadają pod kątem 5–7 stopni ku

NE i N. Dogodne położenie w monoklinalnej strukturze triasu przedsudeckiego powoduje, że zwykle wody podziemne w okolicach Opola ujmowane są do głębokości 330 m. W strefie zasilania, szerokiej na 5 km, zwierciadło wody ma charakter swobodny lub strefowo nieznacznie naporowy. W odległości około 15 km na północ od wychodni horyzont węglanowy przykrywają izolujące serie ilasto-lupkowe kajpru. Tworzą one artezyjski lub subartezyjski poziom wodonośny, który na północ od Opola zalega pod 200-metrową serią osadów górnego kajpru, paleogenu i neogenu. Skały te charakteryzują się wysoką średnią wartością współczynnika filtracji, równą 16,4 m/d (Staško, 1992). Badania metodami geostatycznymi wykazują rozkład współczynnika filtracji w granicach 0,5–20 m/d w strefie zasilania i 0,2–10 m/d

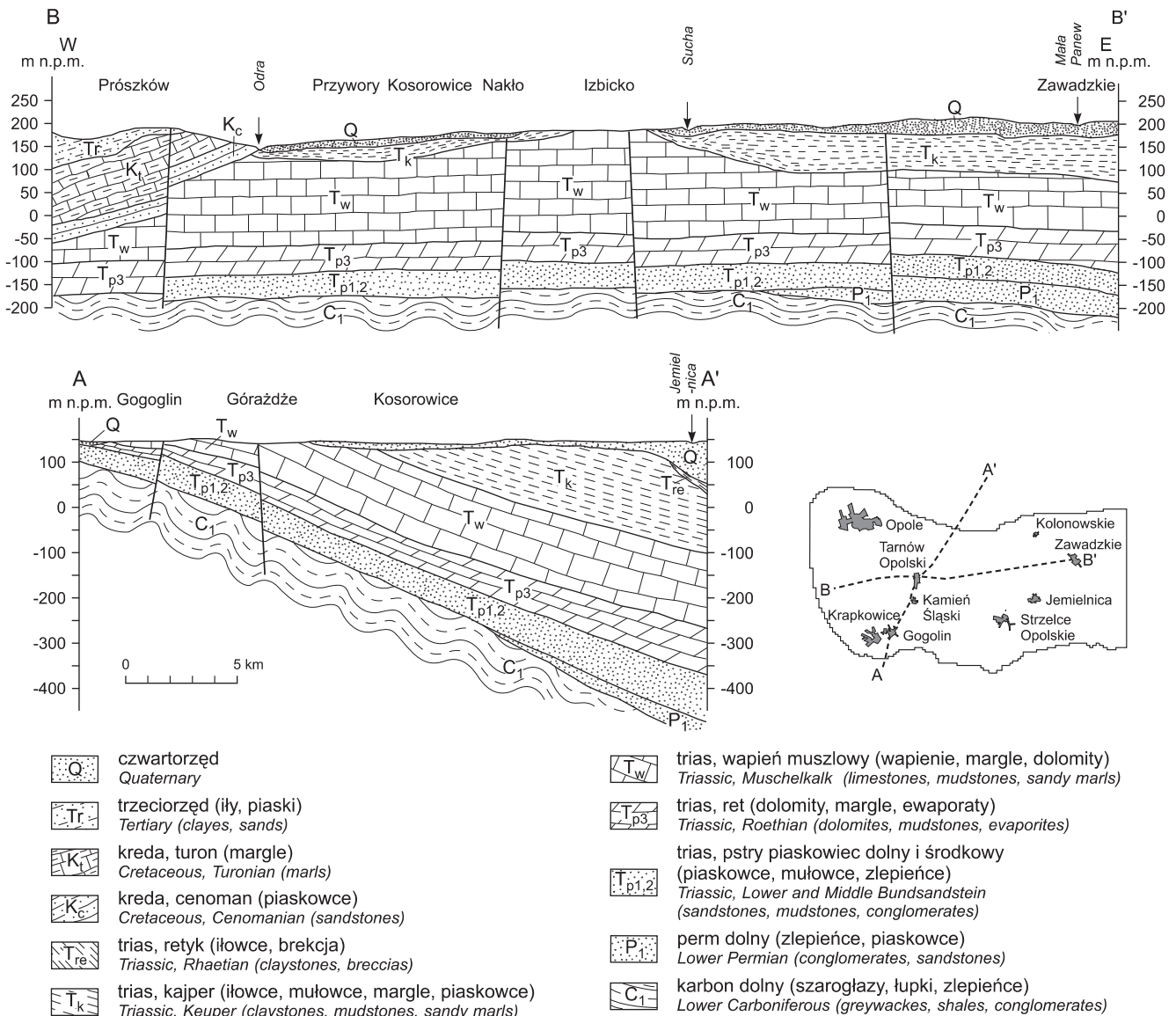


Fig. 1. Przekroje geologiczne przez obszar badań (wg Staški, 1992)

Geological cross-sections across the research area (after Staško, 1992)

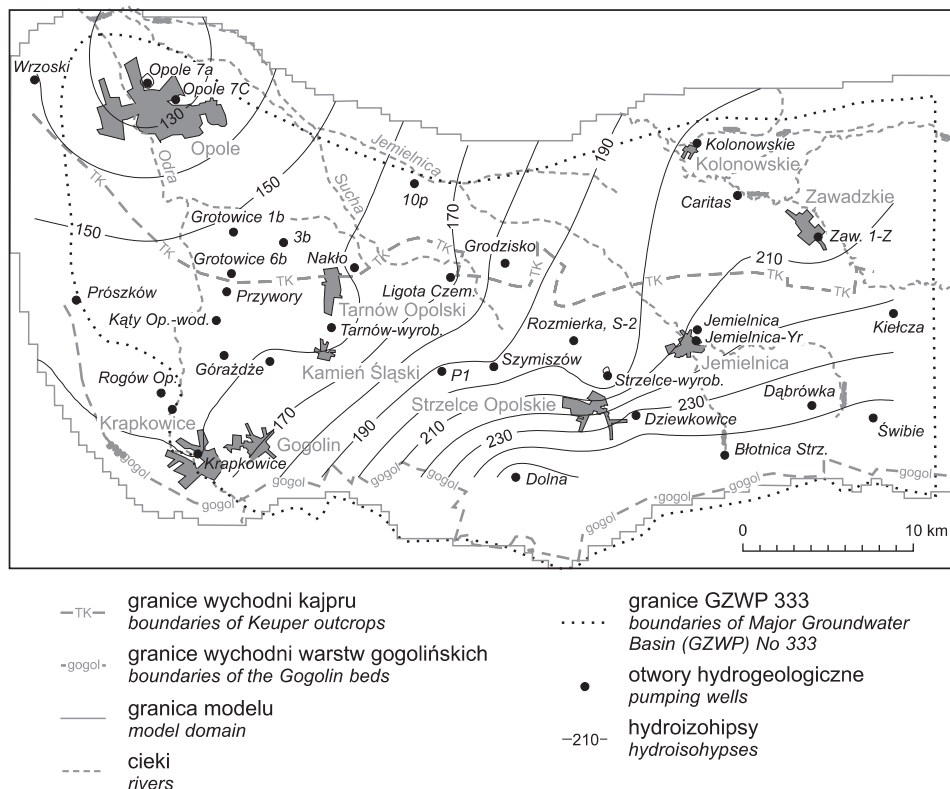


Fig. 2. Mapa zwierciadła wody poziomu wapienia muszulkalkowego

Water table contour map of the Mushelkalk aquifer

w strefie warstwy naporowej (Żurek i in., 1994). Wapienie i wapień dolomityczny charakteryzuje porowatość całkowita w zakresie 0,9–31,9%, a wartość typowa porowatości wynosi 12%. Skały te są spękane, co wyraża się wskaźnikiem porowatości szczelinowej w zakresie 0,7–4,5%. Występowanie zjawisk krasowych potwierdzano w czasie wierceń na zmiennych, nieraz znacznych głębokościach. Właściwości zbiornikowe tych skał dobrze opisuje model opracowany przez Motykę (1998) oraz Motykę i Zuberę (1992).

W obszarze badań zlokalizowanych jest ponad 80 ujęć wiejskich i miejskich, z których największe to ujęcia w Opo-

lu, Grotowicach, Strzelcach Opolskich, Tarnowie, Izbicku i Kamieniu Śląskim. Poza poborem komunalnym wody pitnej istotne dla bilansu wodnego tego zbiornika są odwodnienia trzech kopalń odkrywkowych eksploatujących wapień, margle i dolomity triasu dla potrzeb przemysłu cementowo-wapienniczego w Strzelcach Opolskich (ok. 20 tys. m³/d), Tarnowie Opolskim (ok. 65 tys. m³/d) i Góraźdzu (ok. 3 tys. m³/d). Przepływ odbywa się od stref zasilania na południu ku dolinie Odry i Małej Panwi na północy. Lokalnie zaburzony jest on depresjami wywołanymi odwodnieniami kopalń i poborem ujęciami w rejonie Opola (fig. 2).

PROBLEM NIEJEDNORODNOŚCI CECH HYDROGEOLOGICZNYCH W BADANIACH MODELOWYCH

O niejednorodności (heterogeniczności) właściwości środowiska skalnego będziemy mówić wtedy, gdy jego cechy fizyczne zależą od współrzędnych punktu badań (Wieczysty, 1970). Przełomem w analizie heterogeniczności był rozwój badań modelowych (lata 60. i 70. ubiegłego wieku). Możliwość odzwierciedlenia na modelu numerycznym niejednorodności środowiska znacznie przekracza stan jego rzeczywistego rozpoznania. Wyniki próbných pompowań dają informację uśrednioną, która nie oferuje perspektyw rozpoznania stref uprzywilejowanego przepływu. Problem ten uwiadamiał się w badaniach modelowych na potrzeby analizy

warunków hydrogeologicznych złóż ropy i gazu (Marsily i in., 2005). Zimmerman i in. (1998) wykonali testy polegające na stworzeniu sztucznych stref uprzywilejowanego przepływu. Po odwzorowaniu ich na modelu doszli do wniosku, że na podstawie punktowego rozpoznania zwierciadła i parametrów filtracyjnych stref tych nie można wiarygodnie zidentyfikować.

W obliczu trudności z rzeczywistym rozpoznaniem rozkładu parametrów systemu wodonośnego rozwijane są metody stochastyczne. Podejście polegające na przyporządkowaniu zmiennych losowych dyskretnej przestrzeni filtracyj-

nej zapoczątkowano w latach 70. (Marsily i in., 2005). W procesie analizy niejednorodności bierze się pod uwagę kowariancję i wariogram (Gelhard i in., 1992) jako narzędzia do oceny wiarygodności rozkładu parametrów, oszacowanego na podstawie danych punktowych (Goldszejn, Skrzypek, 2004).

Wszystkie omówione problemy ujawniają się również w przypadku badań nad modelem rejonu triasu opolskiego,

prowadzonych przez autorów w latach 2003–2004. W dalszej części artykułu zaproponowano kompromisowe, wydajne rozwiązanie minimalizujące nakreślone ograniczenia, przy nieznacznym nakładzie na dodatkowe rozpoznanie warunków hydrogeologicznych.

PODEJŚCIE DETERMINISTYCZNE A STOCHASTYCZNE NA PRZYKŁADZIE TRIASU OPOLSKIEGO

W pierwszej fazie badań skonstruowano model numeryczny w programie Modflow, wykorzystując deterministyczne podejście analogu środowiska porowego. Badaniem objęto obszar o powierzchni 1400 km², znacznie wykraczający poza granice zbiornika. Zastosowano zmienny krok siatki dyskretyzacyjnej (200–1000 m), z lokalnym zagęszczeniem w rejonie Tarnowa Opolskiego ze względu na konieczność odwzorowania stref uprzywilejowanego przepływu uwarunkowanych tektonicznie. Warunki brzegowe I, II i III rodzaju wykorzystano do odwzorowania dopływów bocznych, wymiany wód z ciekami, zasilania atmosferycznego, pracy ujęć i drenaży oraz granic nieprzepuszczalnych. Rozkład parametrów filtracyjnych został wprowadzony metodą krigingu, z lokalnymi modyfikacjami w rejonie Tarnowa Opolskiego (strefy tektoniczne). Osiągnięto znaczną zgodność zwierciadła i bilansu, z wyjątkiem ujęć rejonu Opola cechujących się wysokimi depresjami jednostkowymi (tab. 1).

Osiągnięcie oczekiwanej zgodności zwierciadła nie było możliwe bez wprowadzenia stochastycznego rozkładu parametrów filtracyjnych GZWP 333. Przy wyznaczaniu stref uprzywilejowanego przepływu posłużono się wnioskami wyciągniętymi na podstawie analizy map geologicznych, fotolineamentów oraz wydajności jednostkowej. Za górną granicę współczynnika filtracji przyjęto wartość uzyskaną w otworze 9B, zlokalizowanym w obrębie przecięcia dwóch stref tektonicznych ($k = 4,8 \cdot 10^{-3}$ m/s).

W badanym rejonie zagęszczono również siatkę dyskretyzacyjną, definiując bloki o boku poniżej 200 m. W trakcie kalibracji kierowano się zasadą, aby początkowe wysokości hydrauliczne były zbliżone do obserwowanych przy eksploatacji otworów 7a i 7c, przyjmując, że są one zlokalizowane poza strefami uprzywilejowanego przepływu. Otrzymano wartość współczynnika filtracji wynoszącą od $5 \cdot 10^{-4}$

Tabela 1
Zmiana dokładności kalibracji modelu triasu opolskiego przy uwzględnieniu stref uprzywilejowanego przepływu
A change of calibration validity of the Opole Triassic model using the preferential flow paths

Wersja modelu	Otwór	Różnice zwierciadła wody obserwowanego i obliczonego [m]		Zasoby dynamiczne [m ³ /d]
		z poborem	bez poboru	
Ze strefami uprzywilejowanego przepływu	7a	1,43	1,36	12577
	7c	0,43	0,86	
Bez stref uprzywilejowanego przepływu	7a	28,52	0,68	12053
	7c	21,46	0,67	

do $1 \cdot 10^{-3}$ m/s dla stref uprzywilejowanych i $1,6 \cdot 10^{-6}$ dla skał otaczającej „matrycy”. Wartości $5 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$, przy kroku siatki równym 200 m, odzwierciedlają wąskie struktury o rzeczywistym współczynniku filtracji wynoszącym 0,42 m/s, zawierającym się w zakresie podanym przez Motykę (1998).

Po kalibracji, wprowadzającej strefy uprzywilejowanego przepływu, zmodyfikowano wydajności ujęć w ten sposób, by otrzymać depresje charakterystyczne dla zasobów dyspozycyjnych, uzyskane na modelu deterministycznym. Pierwotne zasoby wynoszące 61 tys. m³/d musiały zostać zredukowane o 26% (do 45,25 tys. m³/d), aby uzyskać te same rzędne zwierciadła w studniach obserwacyjnych. Spadek prognozowanej wydajności dotyczył wszystkich ujęć, zarówno o korzystnej, jak i niekorzystnej lokalizacji.

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE W UTWORACH FLISZU

Drugi obszar badań położony jest w Karpatach i obejmuje rejon Tylicza. W budowie geologicznej biorą udział osadowe formacje fliszowe podjednostki sądeckiej (bystrzyckiej) i krynickiej w obrębie płaszczowiny magurskiej, wieku od eocenu środkowego po eocen górny. Strefę sądecką tworzą formacje łupków pstrych, margle, piaskowce i łupki warstw łąckich oraz piaskowce i łupki warstw beloweskich.

W strefie krynickiej dominują piaskowce grubo- i cienkoławicowe z Piwnicznej oraz piaskowce krynickie, którym towarzyszą łupki margliste. Podjednostka krynicka charakteryzuje się budową fałdowo-blokową, podczas gdy południowa część podjednostki sądeckiej jest wtórnie przełałdowaną strefą synklinalną (Oszczypko, 1991; Oszczypko i in., 1999). W obszarze badań przebiegają dwie główne strefy tektonicz-

ne, zaznaczone uskokami o przebiegu równoleżnikowym Krynicy i prostopadłym do niego Tylicza.

W regionie tym ze względu na niewielkie miąższości osadów czwartorzędowych górskich dolin rzecznych największe zasoby zwykłych wód podziemnych występują w trzeciorzędowych skałach fliszu. Formacja fliszowa nie tworzy regularnych, typowych poziomów wodonośnych, a występowanie wód związane jest ze strefami przypowierzchniowych spękań i zwietrzałych skał, często różnego wieku. Dolna granica krążenia i wymiany słodkich wód podziemnych określana jest do głębokości 60–80 m, zależnie od typu skał (Chowaniec, 2006), lub do 100 m (Witczak, Duńczyk, 2004). O zasobności wodnej serii fliszowych decydują ogniwa piaskowcowe, ich wykształcenie stopień spękania i porowatość. Porowatość piaskowców krynickich z Piwnicznej i z Maszkowic jest mała i wynosi od 1 do 10%. Intensywna tektonika oraz procesy wietrzeniowe tworzą korzystniejsze warunki do rozwoju sieci spękań, które z kolei polepszają właściwości kolektorskie serii fliszowych.

Wydajność studni wierconych w utworach fliszowych jest niska i z reguły zawiera się w przedziale 2–5 m³/h, przy znacznych depresjach w granicach 10–25 m. Jedynie w stre-

fach drożnych dyslokacji stwierdza się podwyższone zawodnienie. Jak wykazały obserwacje i pomiary, wydajność zespołu otworów eksploatowanych w sposób ciągły (przez 30 lat) spada do 40–50% w stosunku do wydajności w krótkotrwałym pompowaniu badawczym pojedynczej studni. W strefach tektonicznych spadek ten wynosił od 30 do 40% zatwierdzonych wartości.

Współczynniki filtracji ośrodka szczelinowo-porowego uzyskane w trakcie modelowania i testów zmieniają się w granicach od $1,25 \cdot 10^{-9}$ do $1,13 \cdot 10^{-4}$ m/s (Nałęcki i in., 2004). Wraz z głębokością intensywność wymiany wód maleje, ale rozkład ciśnień wynikający ze zróżnicowania morfologicznego terenu wskazuje na możliwość powolnej wymiany wód także na większych głębokościach, nawet do 1500 m (Witczak, Duńczyk, 2004).

Zwykłe wody podziemne ujmowane są również w źródłach. Wskaźnik krenologiczny dla omawianego obszaru jest wysoki i wynosi 7,9 źródeł na km². Wydajności źródeł są niewielkie i zawierają się w przedziale 0,1–1,0 l/s. Wodom słodkim towarzyszą wody mineralne i lecznicze oraz ekshalacje dwutlenku węgla.

NIEJEDNORODNOŚĆ FORMACJI FLISZOWEJ A PROBLEM OBLICZEŃ ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH

W celu określenia zasobów dyspozycyjnych wykonano badania modelowe w programie Modflow. Granice modelowanego obszaru ustalono w nawiązaniu do topograficznych wododziałów cieków powierzchniowych. Do konstrukcji modelu wykorzystano dokumentację, dane z banku Hydro, z map hydrogeologicznych oraz wyniki kartowania hydrogeologicznego i pomiarów hydrologicznych na rzekach. Aby uściślić dane wejściowe do modelu, zrealizowano szereg modeli lokalnych, pozwalających na sprecyzowanie warunków hydrogeologicznych w obszarach dyskusyjnych. Na obszarze badań lub jego bezpośrednim sąsiedztwie zlokalizowane są 64 otwory wiertnicze, dostarczające informacji o budowie geologicznej, zwierciadło wody nawierconym i ustalonym, miąższości warstwy wodonośnej, zasobach i wydajności jednostkowej. W nielicznych otworach wykonano inne badania (współczynnik filtracji w 10 otworach). W obrębie skomplikowanego, fliszowego układu hydrostrukturalnego podane wartości dają jedynie przybliżone pojęcie o rzeczywistych parametrach, ponieważ trudna do oceny pozostaje miąższość warstw wodonośnych, stanowiących zespół połączonych hydraulicznie w niewyjaśnionym stopniu sekwencji osadów słabiej i lepiej przepuszczalnych. Przed przystąpieniem do kalibracji modelu odtworzono wysokości hydrauliczne na podstawie 400 punktów pomiarowych w postaci otworów i źródeł (Buczyński i in., 2007).

Tak skomplikowany układ odwzorowano modelem deterministycznym analogu ośrodka porowego. Jest to jedyne możliwe podejście uwzględniające omówione ograniczenia przy aktualnym stanie rozpoznania warunków hydrogeolo-

gicznych. Przy takim podejściu zespoły drobnych spękań i spękań nierozpoznanych traktowane są wspólnie z przestrzenią porową skały jako środowisko porowe (Martinez-Landa, Carrera, 2005), zaś większe struktury tektoniczne oddawane są jako strefy o podwyższonej lub obniżonej, a często anizotropowej wartości współczynnika filtracji.

Analogiczne podejście zastosowano w trakcie dokumentowania sąsiedniej zlewni Kryniczanki (Ciężkowski i in., 1999). W celu odwzorowania opisywanych warunków wydzielono 7 warstw o obniżającej się wartości współczynnika filtracji, od $1,3 \cdot 10^{-7}$ do $2,3 \cdot 10^{-11}$ m/s. Najlepsze właściwości filtracyjne wykazały strefy tektoniczne, gdzie stwierdzono podniesione wartości współczynnika filtracji w kierunku równoległym do uskoków ($2-6 \cdot 10^{-7}$ m/s), podczas gdy w strefach prostopadłych – wartości o rząd niższe ($3-9 \cdot 10^{-8}$ m/s). Przyjęto założenie o ciągłości przepływu w obrębie fliszu oraz łączności hydraulicznej między środowiskiem silnie spękanego górotworu i strefy skał o mniejszym stopniu spękania.

Ograniczenia programu Modflow, odnoszące się do zmian miąższości, współczynników filtracji i wymiarów bloków, tworzą trudności przy dokładnym modelowaniu nieciągłych i bardzo niejednorodnych struktur wodonośnych. Stąd też w skali regionalnej nie jest możliwe precyzyjne odwzorowanie rzeczywistej struktury systemu hydrogeologicznego wykształconego w utworach fliszu. Takie rozwiązania są możliwe dla lokalnych modeli w skali pojedynczego ujęcia. Natomiast możliwe jest określenie regionalnych (w skali zlewni) zasobów dynamicznych i dyspozycyjnych.

WNIOSKI

1. Przyjęty i pierwotnie opisany model koncepcyjny triasu opolskiego wymagał rewizji po zrealizowaniu modelu numerycznego. Deterministyczny rozkład parametrów przenoszony metodami interpolacyjnymi został zweryfikowany szczególnie w zakresie dodatkowych dróg uprzywilejowanego przepływu.

2. Zasoby dyspozycyjne triasu opolskiego wiążą się ściśle z możliwością „natrafienia” na struktury uprzywilejowanego przepływu. Prognozowana eksploatacja bez uwzględnienia tych stref kształtuje się na zupełnie odmiennym poziomie. Generalnie zaobserwowano spadek zasobów dyspozycyjnych o 26% w modelu uwzględniającym uprzywilejowane drogi przepływu. Oznacza to w praktyce, że pomijanie

w analizach tego typu niejednorodności prowadzi do przeszacowania zasobów.

3. Badania realizowane w obrębie skał fliszu karpackiego potwierdziły, że prognozowanie depresji dla pojedynczych ujęć daje mało wiarygodne wyniki przy aktualnie przyjętym modelu koncepcyjnym ośrodka fliszowego i przy uwzględnieniu ograniczeń metody różnic skończonych. Oferują one jedynie możliwość oszacowania zasobów w skali całego regionu.

4. Modele ośrodków szczelinowych nadal powinny być realizowane częściowo lub w całości w myśl koncepcji analogu środowiska porowatego, z zastrzeżeniem konieczności wprowadzania struktur uprzywilejowanego przepływu w sposób stochastyczny i dyskretny w możliwe znacznym zakresie.

LITERATURA

- BUCZYŃSKI S., OLICHWER T., TARKA R., STAŠKO S., 2007 – Zawodnienie formacji fliszowej Karpat w oparciu o wyniki badań źródeł Beskidu Krynickiego w rejonie Tylicza. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 13, cz. 2: 403–412. Kraków–Krynica.
- CHOWANIEC J., 2006 – Hydrogeologia Karpat. *Prz. Geol.*, **54**, 10: 846–845.
- CIĘŻKOWSKI W., JÓZEFKO I., SCHMALZ A., WITCZAK S., 1999 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne wód leczniczych i dwutlenku węgla (jako kopaliny towarzyszące) oraz ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych (zwykłych oraz leczniczych i o właściwościach leczniczych) w zlewni Kryniczanki. Arch. Politechniki Wrocławskiej.
- GELHARD L.W., WELTY C, REHTFELD K., 1992 – A critical review of data on field-scale dispersion in aquifer. *Water Resour. Res.* **28**, 7: 1955–1974.
- GOLDSZTEJN P., SKRZYPEK G., 2004 – Wykorzystanie metod interpolacji do określenia map powierzchni geologicznych na podstawie nieregularnie rozmieszczonych danych. *Prz. Geol.*, **52**, 3: 233–236.
- MARSILY G. i in., 2005 – Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeol. J.*, **12**: 161–183.
- MARTINEZ-LANDA L., CARRERA J., 2005 – Low permeability fractured media modelling. 2nd workshop on hardrock hydrogeology. Evora.
- MOTYKA J., 1998 – A conceptual model of hydraulic network in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeol. J.*, **6**, 4: 469–482.
- MOTYKA J., ZUBER A., 1992 – Przepływ znaczników i polutantów przez węglanowe skały szczelinowate: porowatość matrycy jako najważniejszy parametr. *W: Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski*: 103–109. Wrocław.
- NAŁĘCKI P., REŠKO D., SCHMALZ A., WITCZAK S., 2004 – Charakterystyka parametrów hydrogeologicznych szczelinowo-porowego złoza wód leczniczych w Krynicy. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **404**: 144–164.
- NAWALANY M., 1999 – Zagadnienie skali w hydrogeologii. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **388**: 179–193.
- OSZCZYPKO N., 1991 – Stratigraphy of the Palaeogene deposits of the Bystrica subunit (Magura Nappe, Polish Outer Carpathians). *Biul. Pol. Acad. Sc., Earth Sc.*, **39**, 4: 415–431.
- OSZCZYPKO N., MALATA E., OSZCZYPKO-CLOWES M., DUŃCZYK L., 1999 – Budowa geologiczna Krynicy (płaszczowina magurska). *Prz. Geol.*, **47**, 6: 549–559.
- STAŠKO S., 1992 – Wody podziemne w węglanowych utworach triasu opolskiego. *Acta Univ. Wratisl.*, 1407.
- STAŠKO S., TARKA R., 2002 – Zasilanie i drenaż wód podziemnych w obszarach górskich na podstawie badań w masywie Śnieżnika. *Pr. Geol.-Mineral.*, 2528.
- SZCZEPAŃSKI A., SZKLARCZYK T., 2005 – Zagrożenia w gospodarowaniu zasobami wód leczniczych na przykładzie rejonu Krynicy i Muszyny. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 12: 696–700. Toruń.
- WIECZYSTY A., 1970 – Hydrogeologia Inżynierska. Wyd. AGH, Kraków.
- WITCZAK S., DUŃCZYK L., 2004 – Regionalny wielowarstwowy model pola hydrodynamicznego w utworach fliszu karpackiego na przykładzie zlewni kryniczanki (płaszczowina magurska). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **404**: 263–290.
- ZIMMERMAN D., DE MARSILY G., GOTAWAY C. i in., 1998 – A comparison of seven geostatistically-based inverse approaches to estimate transmissivities for modeling advective transport by groundwater flow. *Water Resour. Res.*, **34**, 6: 1373–1413.
- ŻUREK A., KLECZKOWSKI A.S., WITCZAK S., 1994 – Scenariusz mapy ochrony wód podziemnych na przykładzie zbiornika Opole–Zawadzkie (GZWP 333). *Metodyczne podstawy ochrony wód podziemnych*: 303–330. AGH, Kraków.