

Wyznaczanie punktów monitoringu badawczego wód podziemnych na podstawie czasu wymiany wód w zlewniach objętych badaniami modelowymi

Tomasz Michalczyk¹, Dominika Bar-Michalczyk¹

Determination of investigative groundwater monitoring sites based on the time of exchange of water in catchment scale numerical models. Prz. Geol., 63: 931–934.

Abstract. Design of groundwater monitoring programs in catchments subjected to detailed studies should be based on the knowledge of the directions and time scales of groundwater flow. Mathematical hydrodynamic models have an undying popularity both in the context of the quantitative assessment and predictions of contaminants migration. A properly designed hydrodynamic model can also be a useful tool for designing of monitoring networks. The authors present the application of such a possibility on an example of the model of a part of Main Groundwater Basin 326 (GZWP 326) in the Kocinka catchment. Studied area is one of research sites in the Soil2Sea project implemented under the BONUS program for the Baltic Sea catchment area. Goal of the project is to determine the intensity and timescales of retention and natural attenuation of biogens in the stream part of the river. Time scales of groundwater exchange and their directions were investigated using Visual MODFLOW and MODPATH packages. This approach allowed to identify parts of the catchment where a more detailed research will be performed at the selected groundwater investigativemonitoring sites.

Keywords: Visual MODFLOW, MODPATH, monitoring, groundwater, Kocinka catchment

Program monitoringu stanu chemicznego wód podziemnych w ramach monitoringu diagnostycznego oraz operacyjnego stanowi podstawę oceny ich jakości (RDW, 2000). Jednakże w celu szczegółowych badań procesów zachodzących w skali zlewni, zwłaszcza problemu retencji zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego, nie jest on wystarczający. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska (RMS, 2011) niezbędny jest w takim przypadku monitoring badawczy. W związku z tym w ramach projektu Soils2Sea (www.soils2sea.eu) było konieczne wyznaczenie dodatkowych punktów monitoringowych. Pełny obraz migracji zanieczyszczeń w warstwach wodonośnych i procesów jakim one ulegają wymaga rozpoznania zarówno płytkiego lokalnego układu krążenia wód, jak i głębszego, związanego z regionalnym przepływem. Początkowym etapem planowania prac terenowych powinno być wytypowanie punktów zlewniowego monitoringu chemicznego, uwzględniających obie te składowe przepływy wód podziemnych.

Modelowanie matematyczne, przeprowadzone w celu oszacowania zasobów, wymaga dobrego odzwierciedlenia warunków krążenia wód podziemnych oraz ich interakcji z wodami powierzchniowymi. Wskazane jest więc wykorzystanie istniejących modeli przepływu i transportu do typowania punktów monitoringu badawczego wód podziemnych (Kania & Witzczak, 2011).

Do badań modelowych wykorzystano fragment istniejącego modelu GZWP 326, autorstwa T. Szklarczyka i J. Kani, który był zrealizowany w Katedrze Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w ramach projektu FP7 Genesis (Kania i in., 2014). Model obejmuje badaną zlewnię rzeki Kocinki wraz z sąsiednimi zlewniami lewobrzeżnych dopływów rzeki Warty i Liswarty. Obszar badań zdystrybowano siatką kwadratową o kroku $x = y = 100$ m (297 wierszy i 450 kolumn).

W obszarze badań modelowych znalazło się 95 154 aktywnych bloków obliczeniowych o sumarycznej powierzchni 951,5 km². Każdą z dwunastu modelowanych warstw symulowano tą samą liczbą bloków aktywnych. Model nu-

meryczny początkowo był kalibrowany do stanu pola hydrodynamicznego oraz przepływów wód powierzchniowych, a następnie został zrekalibrowany przez Kanię i in. (2014) za pomocą znaczników środowiskowych (tryt), co stanowi dobry punkt startowy do realizacji monitoringu badawczego opisywanego w niniejszej publikacji. GZWP 326 jest zbiornikiem o charakterze szczelinowo-krasowym leżącym na obszarze monokliny krakowsko-śląskiej, wg regionalizacji Kleczkowskiego (1990), lub w regionie jury krakowsko-częstochowskiej, wg Paczyńskiego i Sadurskiego (2007).

Poprawnie wykonany i wykalibrowany model przepływu i transportu wód podziemnych jest niezbędny dla wiarygodnej identyfikacji systemu wodonośnego. Zuber i in. (2011) identyfikują dwie metody kalibracji z zastosowaniem znaczników środowiskowych: (1) wykorzystanie czasu przebywania cząsteczki wody w strefie saturacji (MRT), ocenianej za pomocą pomierzonych stężeń w modelach o skupionych parametrach (LPM), oraz (2) wykorzystują pomierzone stężenia substancji wskaźnikowych bezpośrednio do kalibracji modeli o parametrach złożonych. Zarówno w warunkach ustalonych, jak i niestabilnych modele są kalibrowane względem pomierzonego położenia zwierciadła wód podziemnych oraz odpływu podziemnego do wód powierzchniowych. W przypadku opisywanego modelu fragmentu GZWP 326 (Kania i in., 2014), parametrami podlegającymi dopasowaniu były: przewodność hydrauliczna ($T = k \times m$), zasilanie infiltracyjne wód podziemnych oraz przewodność kontaktu hydraulicznego między rzeką, a warstwą wodonośną. Następnie wyniki modelowania transportu mas były kalibrowane względem pomierzonych stężeń znaczników środowiskowych (tryt). Proces ten odbywał się przez dopasowanie porowatości utworów oraz parametrów dyspersji, ale wymagał także rekalkibracji modelu przepływu.

W obrębie GZWP 326 można wyróżnić pięć poziomów wodonośnych. Największą część obszaru badań obejmuje górnourajski poziom wodonośny o charakterze szczelinowo-krasowym (Dziuk & Grodowska, 1988; Pacholewski &

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tmmichalczyk@gmail.com.

Rózkowski, 1990; Malina i in., 2007; Gurwin & Serafin, 2009). Poziomy czwartorzędowy, neogeński i dolnokredowy mają charakter porowy i występują tylko lokalnie. Poziom górnokredowy, który występuje poza badaną zlewnią rzeki Kocinki, posiada charakter szczelinowo-porowy. W związku z brakiem warstw skutecznie izolujących główny górnourajski poziom wodonośny, obszar GZWP 326 charakteryzuje się dużą i bardzo dużą podatnością na zanieczyszczenia (Witczak, 2011). Górnourajskie skały węglanowe budujące zbiornik oraz wyżej leżące piaski czwartorzędowe są słabo od siebie izolowane, w związku z czym następuje ciągła wymiana wód i zanieczyszczeń pomiędzy tymi poziomami.

METODYKA

Wyniki modelowania matematycznego oparto na opisanym wyżej modelu przepływu i transportu opracowanego przez Kanię i in. (2014). Zostało ono zrealizowane za pomocą pakietów Visual MODFLOW v.4.3 (Nilson & Thomas, 1998–2010).

W celu określenia skali czasowej wymiany wody oraz charakterystyki retencji i szybkości usuwania zanieczyszczeń z wód podziemnych stosuje się wiele metod badawczych. Pierwszą z nich jest rozkład czasów przebywania (RTD) wód, liczony od strefy zasilania do strefy drenażu. Metoda ta jest oparta na symulacji impulsowej iniekcji substancji konserwatywnej, w wyniku czego uzyskujemy rozkład jej czasów dojścia do dowolnego miejsca systemu. Warunkiem stosowalności ww. procedury jest poprawne wykalibrowanie modelu hydrodynamicznego i modelu transportu z użyciem znaczników środowiskowych (Kania i in., 2005; Zuber, 2007; Witczak i in., 2013b). Kolejnym sposobem pozwalającym na ocenę charakteru i czasu reakcji systemu krążenia wód podziemnych jest czas połowicznego samooczyszczania. Jest on określany na podstawie kinetyki usuwania zanieczyszczeń z systemu po zmniejszeniu lub wyłączeniu presji na modelu transportu (Kania & Witczak, 2007).

W niniejszej pracy wykorzystano metodę określenia czasu wymiany wód w zlewni Kocinki opartą na symulacji linii prądu na modelu hydrodynamicznym, z zastosowaniem kodu MODPATH version 4 (Pollock, 1994; Gusev i in., 2014). W wyniku obliczeń modelowych uzyskujemy charakterystykę czasów wymiany wód podziemnych drenowanych przez rzeki w obrębie badanej zlewni. Obliczenia dotyczą strefy saturacji, wymagają więc uzupełnienia o czas przepływu wody przez strefę aeracji. Na potrzeby wstępnego etapu prac posłużono się stałym czasem migracji równym 10 lat. W dalszej części badań modelowych dane te zostaną uszczegółowione.

Rzeka Kocinka oraz jej dopływy zasymulowane zastały warunkiem III rodzaju (*River*). Czas wymiany wód podziemnych w systemie został obliczony jako czas przebywania cząsteczki wody w strukturze podziemnej, od jej wejścia do struktury (zasilenia przez infiltracje) do wyjścia w obszarach drenowania wód podziemnych przez ciek lub ujęcia. Pierwszym etapem prac było zadanie w formie okręgu dziesięciu cząstek wody, w każdym bloku obliczeniowym symulującym ciek. Śledzenie cząsteczek wody wykonano programem MODPATH, jako zadanie odwrotne, tj. obliczając trasy przepływu od wszystkich bloków symulujących rzeki wstecz do punktów w systemie, skąd startują poszczególne cząsteczki. Wyeliminowano w obliczeniach te cząstki, dla których linie prądu rozpoczynają i kończą się w ciekach w wyniku przepływu w strefie hipo-

reicznej, a czas ich przemieszczania się w płytkim systemie krążenia wód jest krótszy niż jeden rok. Następnie określono charakter relacji wód podziemnych i powierzchniowych w blokach modelowanych jako rzeki.

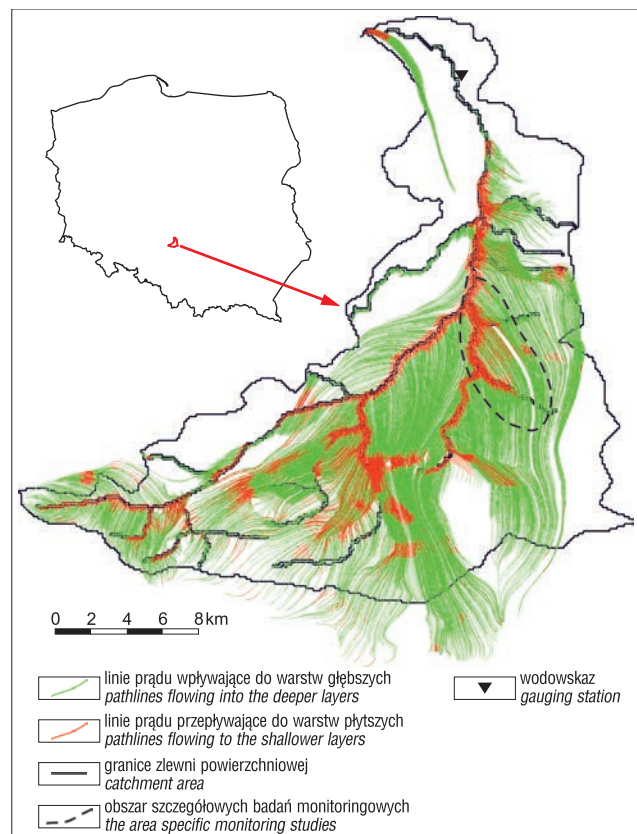
Wartości czasu wymiany obliczono dla 7642 linii prądu. Zestawienie zaimportowano z plików wynikowych programu MODPATH do arkusza kalkulacyjnego. Wyniki podzielono na 53 klasy po zlogarytmowaniu wartości czasów i wydzieleniu klas, co 0,04 wartości log t.

Następnie wybrano obszar badań szczegółowych dla monitoringu badawczego. Wyselekcjonowano go na podstawie obecnych i wcześniejszych badań zanieczyszczenia modelowanej części GZWP 326 azotanami (Kaczorowski i in., 2006; Malina i in., 2007; Gurwin & Serafin, 2009). Celem tego rozwiązania było zagęszczenie punktów monitoringowych w obszarze stwarzającym dogodne warunki do wyjaśnienia procesów migracji zanieczyszczeń pochodzących z nawożenia.

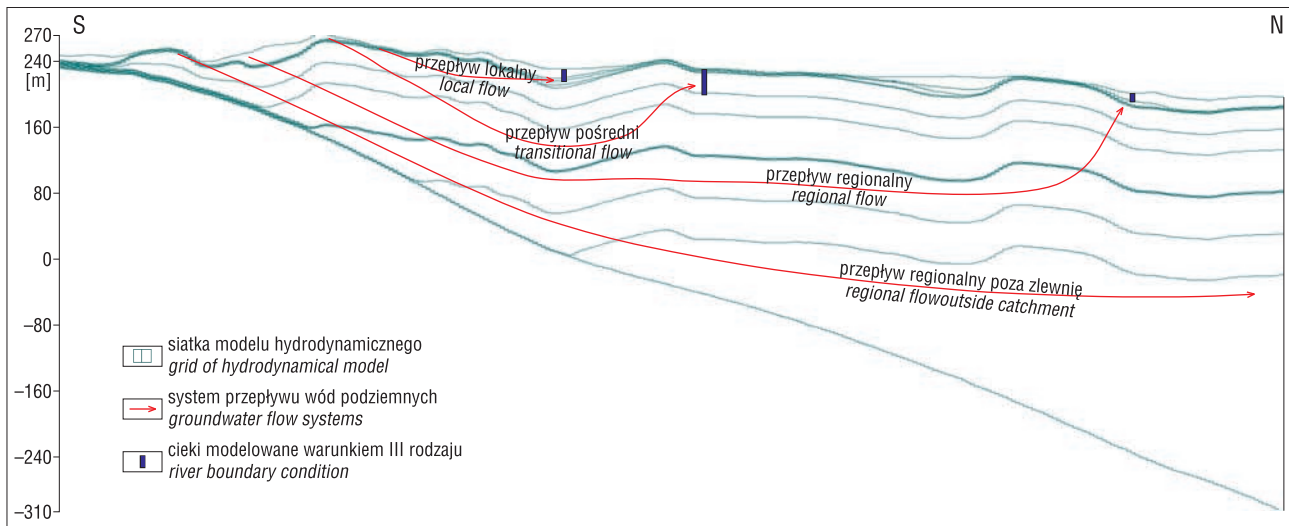
Krążenie wód podziemnych przedstawiono zarówno w planie (ryc. 1), jak i na szkicu wymiany wód w przekroju (ryc. 2). Dla określenia statystyki rozkładu czasów sporządzono wykres probabilistyczny, pokazujący rozkład czasów wymiany wody w systemie (ryc. 3).

WYNIKI I DYSKUSJA WYNIKÓW

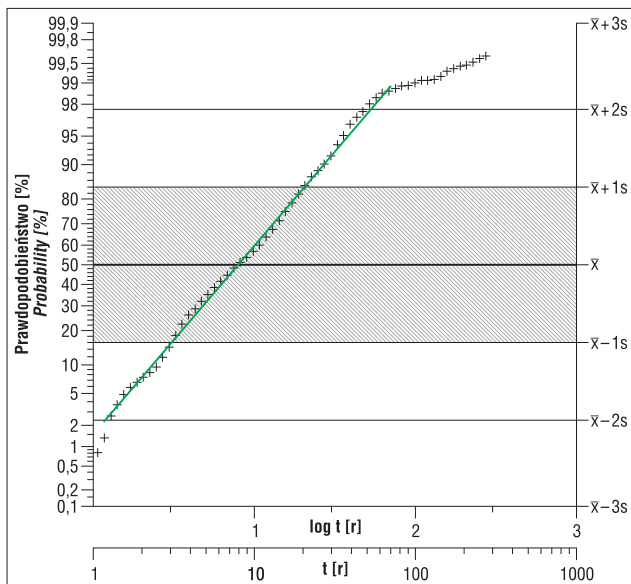
Badana zlewnia rzeki Kocinki jest asymetryczna, ze zdecydowanie większym udziałem drenażu z obszaru położonego po prawej stronie rzeki (ryc. 1). Ogólny kierunek przepływu wód podziemnych przebiega z południa na północ. W miejscach nieobjętych liniami prądu, a znajdujących się na terenie zlewni powierzchniowej Kocinki,



Ryc. 1. Mapa linii prądu wód podziemnych zasilających rzekę Kocinkę wraz z jej dopływami na tle zlewni powierzchniowej
Fig. 1. Groundwater flow lines ending in streams of the Kocinka catchment shown against the catchment area



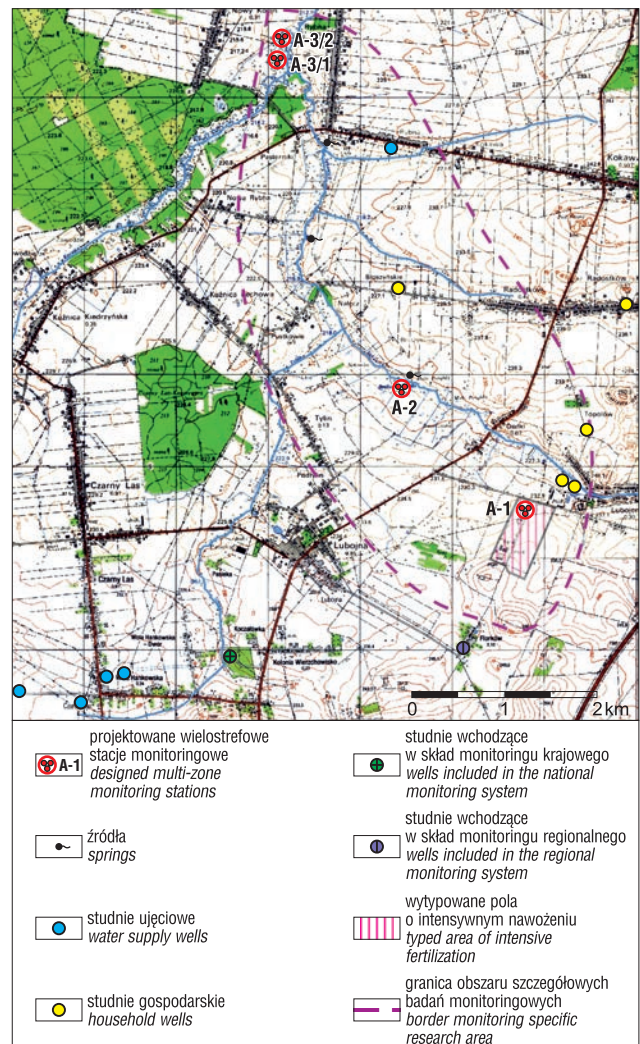
Ryc. 2. Szczyt wymiany wody w zlewni
Fig. 2. Draft of water exchange in the catchment



Ryc. 3. Wykres probabilistyczny rozkładu czasów wymiany wód podziemnych RTD zasilających rzeki w zlewni Kocinki
Fig. 3. Distribution of groundwater residence time distribution (RTD) in the Kocinka catchment

odpływ wód podziemnych odbywa się do innych cieków powierzchniowych na terenie GZWP- 326.

Średni geometryczny czas wymiany wody w strefie saturacji dla zlewni Kocinki wynosi 8 lat (ryc. 3). Zbliżony do prostej wykres rozkładu wskazuje na jego logarymiczno-normalny charakter, ze średnią geometryczną ok. 8 lat i dominującą częstością czasów ($\pm 1s$) w granicach 3 do 20 lat. Przepływ regionalny jest zobrazowany liniami prądu dłuższymi niż 60 lat, które stanowią ok. 5% wszystkich uzyskanych wartości. Czasy wymiany wody uzyskane za pomocą programu MODPATH należy odnieść do strefy saturacji i powinny one być uzupełnione o czas przebywania cząsteczki wody w strefie aeracji. Na potrzebny wstępnych obliczeń oceniono czas migracji przez strefę aeracji na podstawie mapy wrażliwości wód podziemnych na zanieczyszczenie (Witczak, 2011). Okres ten na badanym obszarze wynosi średnio ok. 10 lat. W późniejszym okresie realizacji projektu Soil2Sea przewiduje się dokonanie oceny szczegółowej na zmodyfikowanym modelu przepływu i transportu.



Ryc. 4. Mapa lokalizacji proponowanych punktów monitoringowych
Fig. 4. Location of the proposed monitoring points

PODSUMOWANIE

Teren szczegółowych badań monitoringu badawczego zlokalizowano w charakterystycznej strefie – od obszaru zasilania na brzegu zlewni po obszar drenażu przez rzekę

Sękawicę i Kocinkę (ryc. 1, 4). Uznano, że rozpatrywany fragment zlewni jest odpowiednim miejscem do realizacji planowanych badań. Opierając się na danych archiwalnych i rozpoznaniu terenowym tego obszaru, wytypowano kilka punktów monitoringu. Obejmuje on stację monitoringową A1, na brzegu obszaru zasilania w rejonie pól intensywnie nawożonych (dawny PGR). Postępując dalej wzdłuż strefy przepływu wód podziemnych, stacja monitoringowa A2 obejmie obserwacją strefę hiporeiczną rzeki Sękawicy, przejmującą płytką lokalną strefę krążenia wód podziemnych.

Odptyw regionalny w utworach jury górnej będzie obserwowany w ujmującym profil całej jury górnej otwarte Rybna oraz w stacji monitoringowej A3/1 lub A3/2 w strefie drenażu przez rzekę Kocinkę. Monitoring zostanie uzupełniony przez obserwacje w studniach ujęcia PWIK Częstochowa, pracujących w obrębie zlewni Kocinki, źródłach i pomocniczo w wytypowanych studniach gospodarskich. Wśród ujęć PWIK Częstochowa jedno – w Wierchowisku – należy do sieci monitoringu krajowego. Ponadto studnia prywatna we Florkowie jest w sieci monitoringu regionalnego.

Jak wynika z Katalogu wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania, częstotliwość monitoringu powinna być dopasowana do właściwości systemu wodonośnego (Zhou, 1996; Witczak i in., 2013a). W związku z występowaniem na obszarze badań zwierciadła wód podziemnych o charakterze naporowo-swobodnym w utworach czwartorzędowych przewiduje się konieczność prowadzenia monitoringu w punktach obserwacyjnych ujmujących czwartorzędowy poziom wodonośny nie rzadziej niż raz na pół roku. Natomiast głębsze wody podziemne występujące w utworach jurajskich, ze względu na ich gospodarce wykorzystanie, powinny być monitorowane co najmniej 6 razy w ciągu 12 miesięcy.

Badania modelowe z wykorzystaniem programów MODFLOW oraz MODPATH pozwoliły na określenie kierunków przepływu wód podziemnych oraz przybliżonego czasu wymiany wody w badanej zlewni monitoringowej. Dzięki kalibracji do stanów pola hydrodynamicznego i rekalkibracji modelu za pomocą znaczników środowiska udało się uzyskać wiarygodny model matematyczny badanego obszaru (Kania i in., 2014). Pozwoliło to na łatwiejszy wybór obszaru prowadzenia koniecznych, ze względu na cele projektu Soil2Sea, badań monitoringowych oraz uszczegółowienie monitoringu w wybranym fragmencie zlewni.

W trakcie dalszej realizacji projektu będzie prowadzona ocena modelowa różnych metod określania czasów przebywania wody w systemie krążenia wód podziemnych. Jest to niezbędne do właściwej oceny czasów samooczyszczania wód podziemnych z zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego.

Niniejsze opracowanie zostało wykonane w ramach realizacji projektu Soils2Sea będącego częścią programu BONUS-185 oraz w ramach prac statutowych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (projekt nr 11.11.140.026).

Autorzy artykułu składają serdeczne podziękowania dr. inż. Jarosławowi Kani oraz dr. inż. Tadeuszowi Szklarzykowi z Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za udostępnienie modelu przepływu i transportu GZWP 326 oraz dr. hab. inż. prof. AGH Stanisławowi Witczakowi za pomoc merytoryczną i niezbędne wskazówki.

LITERATURA

DZIUK M. & GRODOWSKA I. 1988 – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych z utworów jury górnej na północ od

miasta Częstochowy. Katowickie Przedsiębiorstwo Geologiczne w Katowicach. Terenowy Oddział Geologii w Częstochowie.

GURWIN J. & SERAFIN R. 2009 – Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne dla ustanowienia obszarów ochronnych zbiornika wód podziemnych Częstochowa (E) GZWP nr 326 – badania modelowe. Przeds. Geol. PROXIMA S.A. Wrocław.

GUSYEV M.A., ABRAMS D., TOEWS M.W., MORGENSTERN U. & STEWART M.K. 2014 – A comparison of particle-tracking and solute transport methods for simulation of tritium concentrations and groundwater transit times in river water. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18: 3109–3119.

KACZOROWSKI Z., MIZERA J., MALINA G., JANCZAREK K., RYCHLIŃSKI T. & PACHOLEWSKI A. 2006 – Weryfikacji modeli hydrodynamiki i migracji związków azotu w rejonie ujęć wód podziemnych Łobodno i Wierchowisko (GZWP 326N). *Geologos*, 10: 121–130.

KANIA J., WITCZAK S., DULIŃSKI M., KAPUSTA M., RÓŻAŃSKI K., JACKOWICZ-KORCZYŃSKI M., ŚLIWKA I. & ZUBER A. 2005 – Kalibracja i walidacja modelu przepływu migracji oraz korekty modelu koncepcyjnego GZWP 451 z wykorzystaniem znaczników. Współczesne problemy hydrogeologii, XII, Toruń: 317–322.

KANIA J. & WITCZAK S. 2007 – Czas połowicznego samooczyszczania wód podziemnych jako parametr ogólny oceny reakcji modelowanego systemu zlewniowego na zmiany antropopresji. Współczesne problemy hydrogeologii, XIII, Kraków: 549–561.

KANIA J. & WITCZAK S. 2011 – Modele migracji zanieczyszczeń. [W:] Dąbrowski S. i in. (red.), *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych: poradnik metodyczny*. Poznań: Bogucki Wyd. Nauk.: 313–332.

KANIA J., SZKLARZYK T., WITCZAK S., RÓŻAŃSKI K. & DULIŃSKI M. 2014 – Weryfikacja dostępnych zasobów wód podziemnych w oparciu o badania znaczników środowiska i wynikająca stąd ocena zagrożenia komunalnych ujęć wód podziemnych, Częstochowa, 29–30 maja 2014 r.: monografia. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych w Częstochowie, Koło Zakład. PZITS przy „Wodociągach Częstochowskich” S.A.

KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1990 – Mapa obszarów głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony, w skali 1 : 500 000. AGH, Kraków.

MALINA G., KACZOROWSKI Z. & MIZERA J. 2007 – Zintegrowany system gospodarowania i ochrony zasobów wodnych GZWP 326. Monogr. PWiK okręgu Częstochowskiego. Częstochowa, s. 190.

NILSON G. & THOMAS F. 1998–2010 – Visual MODFLOW for Windows v.4.3. Waterloo Hydrogeologic Software.

POLLOCK D. 1994 – User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A Particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey Finite difference groundwater flow model. *US Geol. Surv. Open-File Report 94-464*: 249.

PACHOLEWSKI A. & RÓŻKOWSKI A. 1990 – GZWP jury górnej regionu krakowsko-wieluńskiego. Charakterystyka hydrogeologiczna. [W:] Rózkowski A. (red.), *Szczelinowo-krasowe zbiorniki wód podziemnych Monokliny Śląsko-Krakowskiej i problemy ich ochrony* CPBP 04.10 Ochrona i Kształtowanie Środowiska Przyrodniczego. Wyd. SGGW-AR, Warszawa: 51–59.

PACZYŃSKI B. & SADURSKI A. (red.) 2007 – Hydrogeologia regionalna Polski. T.1. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

RDW, 2000 – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego Rady Wspólnoty Europejskiej 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 r. w sprawie ustanowienia ram działalności Wspólnoty w zakresie polityki wodnej (tzw. Ramowa Dyrektywa Wodna).

RMŚ, 2011 – Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie form i sposobu prowadzenia monitoringu jednolitych części wód powierzchniowych i podziemnych. *Dz.U. z 2011r., Nr 258, poz. 1550*.

WITCZAK S. (red.) 2011 – Mapa wrażliwości wód podziemnych Polski na zanieczyszczenie 1 : 500000. AGH Kraków.

WITCZAK S., KANIA J. & KMIECIK E. 2013a – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania, Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.

WITCZAK S., KANIA J., ZUREK A., DULIŃSKI M., RÓŻAŃSKI K. & WACHNIEW P. 2013b – Gospodarowanie wodami podziemnymi w Polsce a kierunki zmian w dyrektywach UE w świetle realizacji europejskiego projektu GENESIS. *Gospodarka Wodna*, 3: 96–102.

ZHOU Y. 1996 – Sampling frequency for monitoring the actual state of groundwater systems. *J. Hydrol.*, 180: 301–318.

ZUBER A. (red.) 2007 – Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych : poradnik metodyczny. Ministerstwo Środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

ZUBER A., RÓŻAŃSKI K., KANIA J. & PUSTSCHERT R. 2011 – On some methodological problems in the use of environmental tracers to estimate hydrogeologic parameters and to calibrate flow and transport models. *Hydrogeol. J.*, 19: 53–69.