

Wpływ odwzorowania warunków hydrostrukturalnych na jakość regionalnego numerycznego modelu filtracji

Jacek Gurwin¹, Rafał Serafin²

Influence of the mapping of hydrostructural conditions on the quality of the regional numerical flow model. Prz. Geol., 65: 1206–1210.

Abstract. Research and documentation in connection with investigations of protection areas of Major Groundwater Basins (MGBs) and the establishment of disposable resources have been the most important regional projects in recent years. The degree of complexity of hydrogeological conditions and the need to consider a number of simplifications makes introduction of standard schematization principles difficult. Therefore it is necessary to focus on the maximum use of data and existing geoinformatic tools for the construction of three-dimensional regional models. After all, obtaining the most important and basic result of a flow net, we should base on the solution in the xyz coordinates and the analysis of equipotential lines and pathlines in the 3D space. T-type models are therefore doubtful and not suitable in MGBs recognition.

Keywords: numerical model, groundwater system, MGB, geoinformatic systems

W ramach wieloletnich prac regionalnych, dotyczących wykonania programów i dokumentacji w związku z ustanawianiem obszarów ochronnych Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) oraz ustaleniem zasobów dyspozycyjnych, w ostatnich latach zrealizowano wiele z nich w kilku etapach. W każdym przypadku podstawę obliczeń stanowi wielowarstwowy numeryczny model filtracji wykonany w programie MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988) w różnych konfiguracjach i wersjach. Najczęściej są to jednak środowiska oprogramowania: GW VISTAS, Visual i GMS. Stopień złożoności warunków hydrogeologicznych i konieczność dokonania szeregu uproszczeń powoduje, że trudno wprowadzić standardowe zasady schematyzacji, więc modelujący specjalista do wykonania zasadnego, optymalnego modelu dla określonych warunków, musi się odwołać do literatury i opracowań metodycznych (Herbich i in., 2013). W ostatnim czasie jest to zagadnienie stale przewijające się w dyskusjach na konferencjach (Gurwin, 2003, 2012, 2015, 2016; Gurwin, Serafin, 2008, 2010; Michalak, 2008; Śmietański i in., 2015), więc w tej pracy autorzy starają się rozszerzyć i poprzeć przykładami konieczność maksymalnego wykorzystania danych i istniejących narzędzi geoinformatycznych do budowy regionalnych trójwymiarowych modeli przepływu wód podziemnych. Tego typu prace, oparte na GIS, przy realizacji wielkoskalowych modeli systemów wodonośnych, znajdujemy na przykład w publikacji Gossela i in. (2004).

SCHEMATYZACJA A JAKOŚĆ WYNIKÓW NUMERYCZNEGO MODELU FILTRACJI

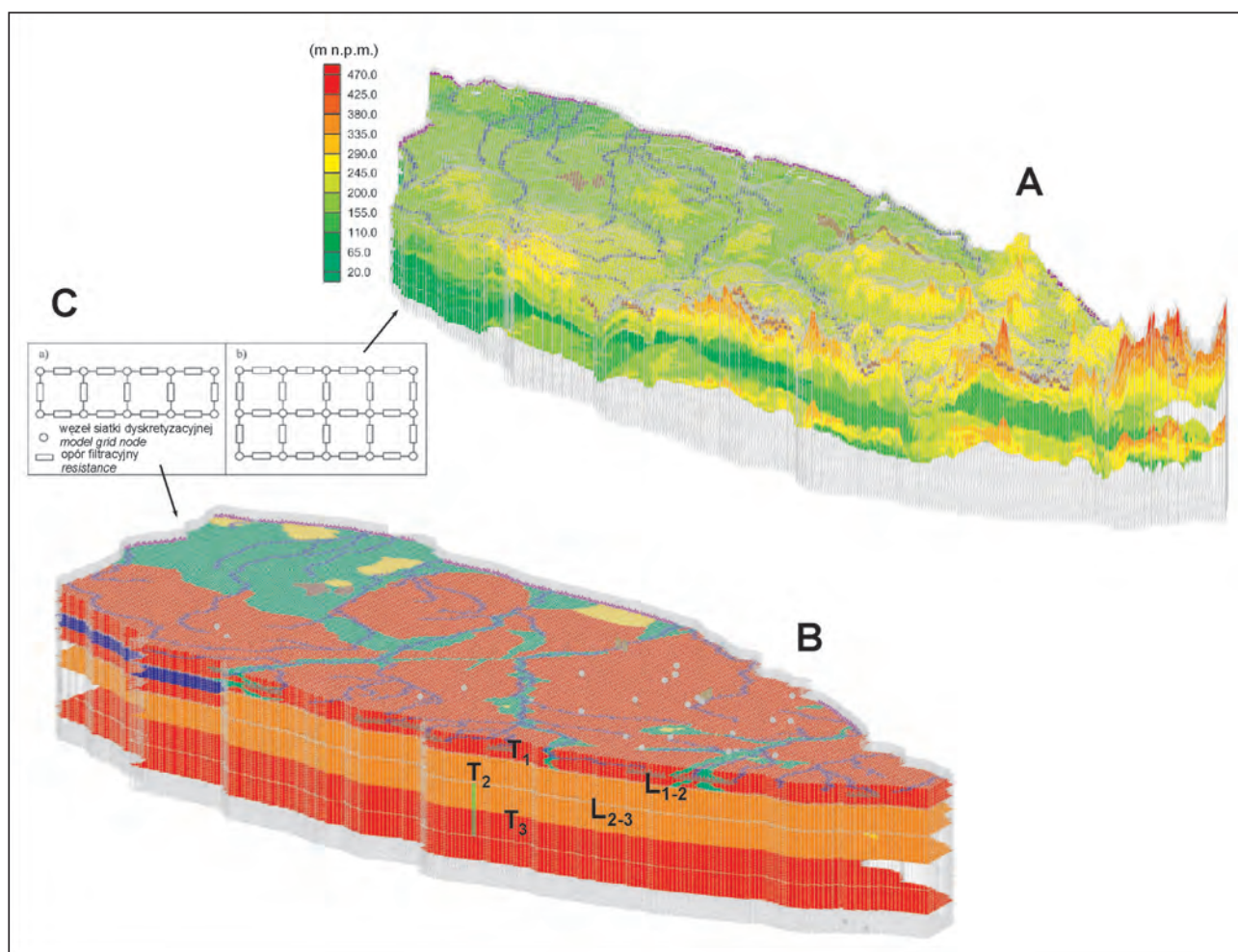
Obszar bilansowania w regionalnych badaniach najczęściej nie stanowi układu hydraulicznie zamkniętego, dlatego należy jednoznacznie ustalić ograniczające powierzchnie brzegowe, przez które następuje dopływ lub odpływ wód podziemnych. Opis systemu wodonośnego powinien być zgodny z założeniami określania hydrauliczno-strukturalnych granic systemu (Margat, 1976; Szyman-

ko, 1980; Anderson i in., 2015). W metodzie różnic skończonych (MRS), ze względu na konieczność zachowania ciągłości każdej numerycznej warstwy modelu w obszarach wyklinowania / wychodni, należy wprowadzić minimalną miąższość bez wpływu na ogólną zasobność odwzorowanego poziomu, zachowując jednocześnie możliwość kontaktu między warstwami. Wyinterpretowana miąższość staje się tym samym składową obliczeń przepuszczalności pionowej (*conductance*), a w konsekwencji przesączenia, pamiętając, że w MODFLOW do tych obliczeń jest przyjmowana miąższość warstwy oraz połowa warstw górnej i dolnej. W modelu typu T najczęściej z góry przyjmuje się jednolitą wartość przepuszczalności pionowej, starając się później poprawić w toku kalibracji, jako bardzo niepewny parametr modelu. Gdyby w tym celu sporządzono mapę miąższości (dane strop / spąg), to właściwie nie ma przeszkód, żeby wykonać model 3D. Biorąc pod uwagę rodzaj warstwy w modelu typu T, pierwszy poziom wprowadza się również jako naporowy i wówczas brak bezpośredniej kontroli nad dopasowaniem w stosunku do powierzchni terenu. Obliczony układ hydroizohips może więc znacząco odbiegać od rzeczywistego. Na szczegóły interpretacyjne, w związku z uwzględnieniem lub nie poziomu przypowierzchniowego, zwrócono uwagę w osobnej publikacji (Gurwin, 2016).

Dokładność odwzorowania pozostaje w związku z gęstością siatki dyskretyzacyjnej. Doświadczenia wskazują, że blok obliczeniowy przy powierzchni obszarów rzędu kilku tys. km² powinien mieć przynajmniej 500 × 500 m, a w jednym z ostatnio wykonanych modeli zlewni Baryczy przyjęto siatkę 200 × 200 m dla aktywnego obszaru badań numerycznych, wynoszącego w przybliżeniu 7 761 km². Rozpoznanie warunków hydrogeologicznych i parametryzacja modelu powinny być zatem dopasowane do takich wymagań, czyli charakteryzować się odpowiednią liczbą punktów badawczych oraz prawidłowo przeprowadzonymi analizami GIS. Należy dołożyć starań, aby obszar wpływu ujęć wód podziemnych lub cieków był objęty optymalną liczbą bloków obliczeniowych. Najważniejsze jest jednak

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. Maxa Borny 9, 50-205 Wrocław; jacek.gurwin@uwr.edu.pl.

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław; rafal.serafin@pgi.gov.pl.



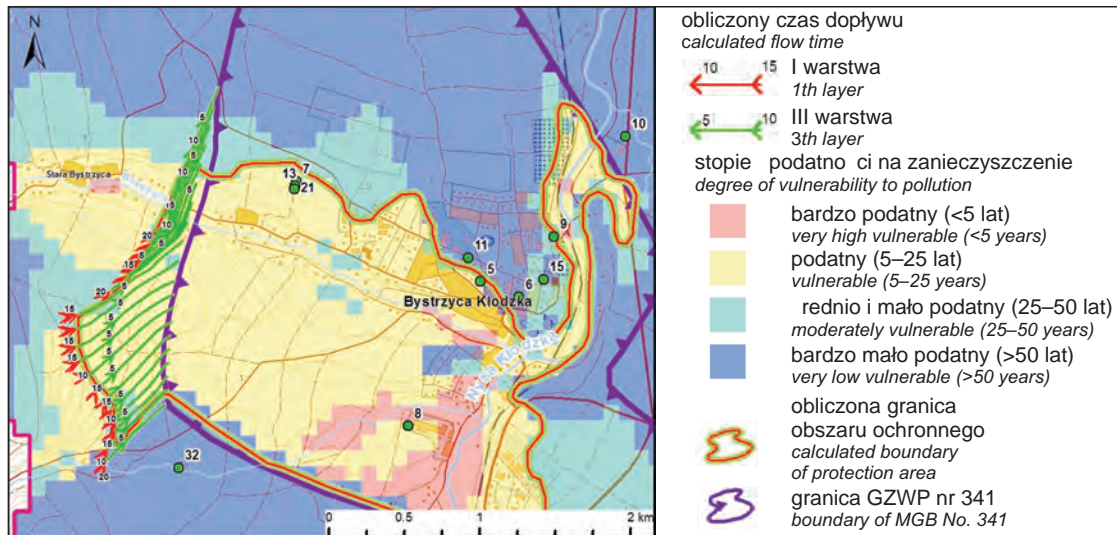
Ryc. 1. Odzworowanie struktury modelu 3D (A) i pseudoprzestrzennego typu T (B) dla GZWP nr 317 z interpretacją pionowego przesączania (C) w pierwszym b) i drugim przypadku a) (za Herbich i in., 2013). T – współczynnik wodoprzewodności, L – współczynnik pionowego przesączania między przepuszczalnymi warstwami modelu

Fig. 1. View of structure of 3D model (A) and simplified quasi-spatial T-type model (B) for MGB No. 317 with the interpretation of vertical leakance (C) in the first b) and second case a) (after Herbich et al., 2013). T – transmissivity, L – leakage factor between permeable layers of the model

odtworzenie wielowarstwowego systemu w przestrzeni 3D (ryc. 1). Stosowanie modeli typu T pozornie wydaje się być zasadne w obliczeniach zasobowych, ale już w rozwiązaniach dla GZWP, gdzie wykonanie modelu numerycznego ma na celu wyznaczenie obszaru ochronnego jest wysoce wątpliwe. Agregacja warstw w odwzorowaniu piętra/poziomu wodonośnego na modelu może prowadzić do przyjęcia numerycznej warstwy o nadmiernej wypadkowej wodoprzewodności i symulacji pracy ujęć o zawyżonej wydajności lub sztucznie ograniczonej depresji. Może to być widoczne zwłaszcza w modelach bazujących na wartościach przewodności hydraulicznej interpretowanych z pompowań różnych warstw w jednym poziomie wodonośnym. Stąd pojawia się pytanie, na ile uproszczona może być struktura modelu wielowarstwowego do ocen bilansowo-zasobowych, bo przecież uzyskując w modelowaniu siatkę hydrodynamiczną w układzie xyz z możliwością analizy linii ekwipotencjalnych i linii prądu w przestrzeni 3D, otrzymuje się rozwiązanie nieporównywalnie dokładniejsze niż w układzie płaskim. Poza tym, na takim modelu dokonujemy właściwej schematyzacji warunków hydrogeologicznych, kontrolując na etapie jego budowy wzajemne relacje między poziomami wodonośnymi, strefami

zasilania i drenażu, co jest niemożliwe na modelu pseudoprzestrzennym. Przykładem takiego rozwiązania są wykonane przez autorów numeryczne modele GZWP nr 302, 317, 323 i 341 (Gurwin, Serafin, 2008; Krawczyk i in., 2013; Serafin i in., 2015; Gurwin, 2017), gdzie odwzorowanie dużej zmienności strukturalnej w piętrach i poziomach wodonośnych, o nierzadko różnej stratygrafii, reżimie i ośrodku występowania wód podziemnych, wpływa na zwiększenie wiarygodności modelu. W takim układzie tempo potencjalnej migracji zanieczyszczeń zależy od odwzorowania rzeczywistego przepływu strumieni wód podziemnych między obszarami zasilania a strefą drenażu wód podziemnych w przestrzeni 3D z uwzględnieniem przepływu międzywarstwowego przez okna hydrogeologiczne i warstwy izolujące.

Obszar ochronny GZWP zostaje wyznaczony, uwzględniając obliczoną analitycznie podatność na zanieczyszczenia (ryc. 2) oraz czas i kierunek przepływu wód podziemnych w układzie xyz na całym obszarze filtracji (ryc. 3). Dzięki temu, uzyskujemy wysoką wiarygodność wyników, co w przypadku modeli uproszczonych – o dużym stopniu agregacji warstw wodonośnych, znacznym kroku siatki dyskretyzacyjnej lub tzw. modeli T, budzi wątpliwości za-



Ryc. 2. Fragment mapy podatności na zanieczyszczenie GZWP nr 341 Kudowa Zdrój–Bystrzyca Kłodzka (Serafin i in., 2015)

Fig. 2. Fragment of map showing vulnerability to pollution of MGB No. 341 Kudowa Zdrój–Bystrzyca Kłodzka (Serafin et al., 2015)

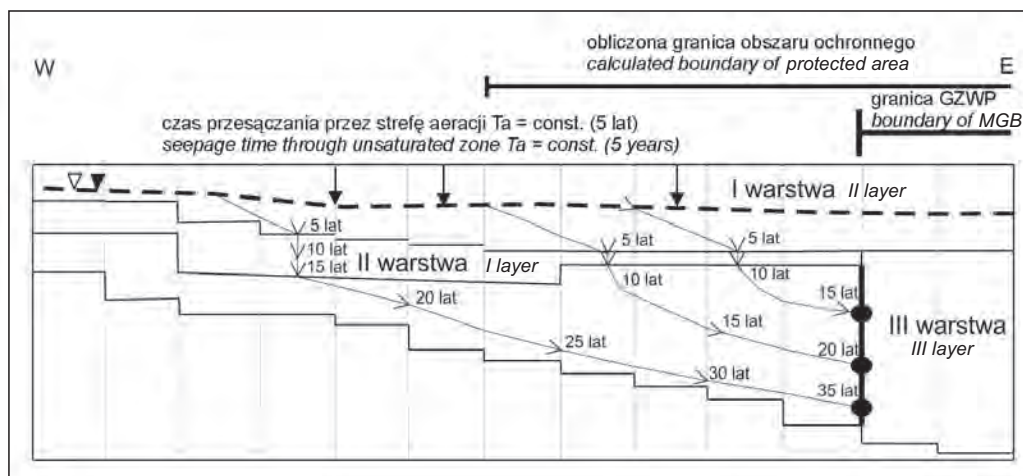
równy w zakresie układu hydrodynamicznego, jak i czasów dopływu. Często decydujące znaczenie w ustaleniu tempa migracji zanieczyszczeń ma słabo przepuszczalna warstwa izolująca poziom zbiornikowy od góry (ryc. 3). Wówczas interpretacja miąższości warstw na modelu daje podstawę jednoznacznych ocen stopnia podatności na zanieczyszczenie, gdyż składowa pionowa przepływu jest liczona w całym polu filtracji.

Należy również podkreślić, że obszar ochronny, wyznaczany na podstawie modelu strukturalnego, w przypadku zmiany warunków hydrogeologicznych w wyniku: budowy nowych ujęć wód podziemnych (ryc. 4), drenażu górniczego lub zmniejszenia zasilania, daje możliwość łatwej i, co ważniejsze, taniej aktualizacji. Zasięg obszaru ochronnego może ulec zmianie ze względu na przesunięcie granicy obszaru hydrodynamicznie chronionego.

Dokładność odwzorowania struktury geologicznej i parametrów hydrogeologicznych dla modeli zasobowych oraz GZWP pozwala przy wykonaniu symulacji prognozy zmniejszyć wpływ poboru wód podziem-

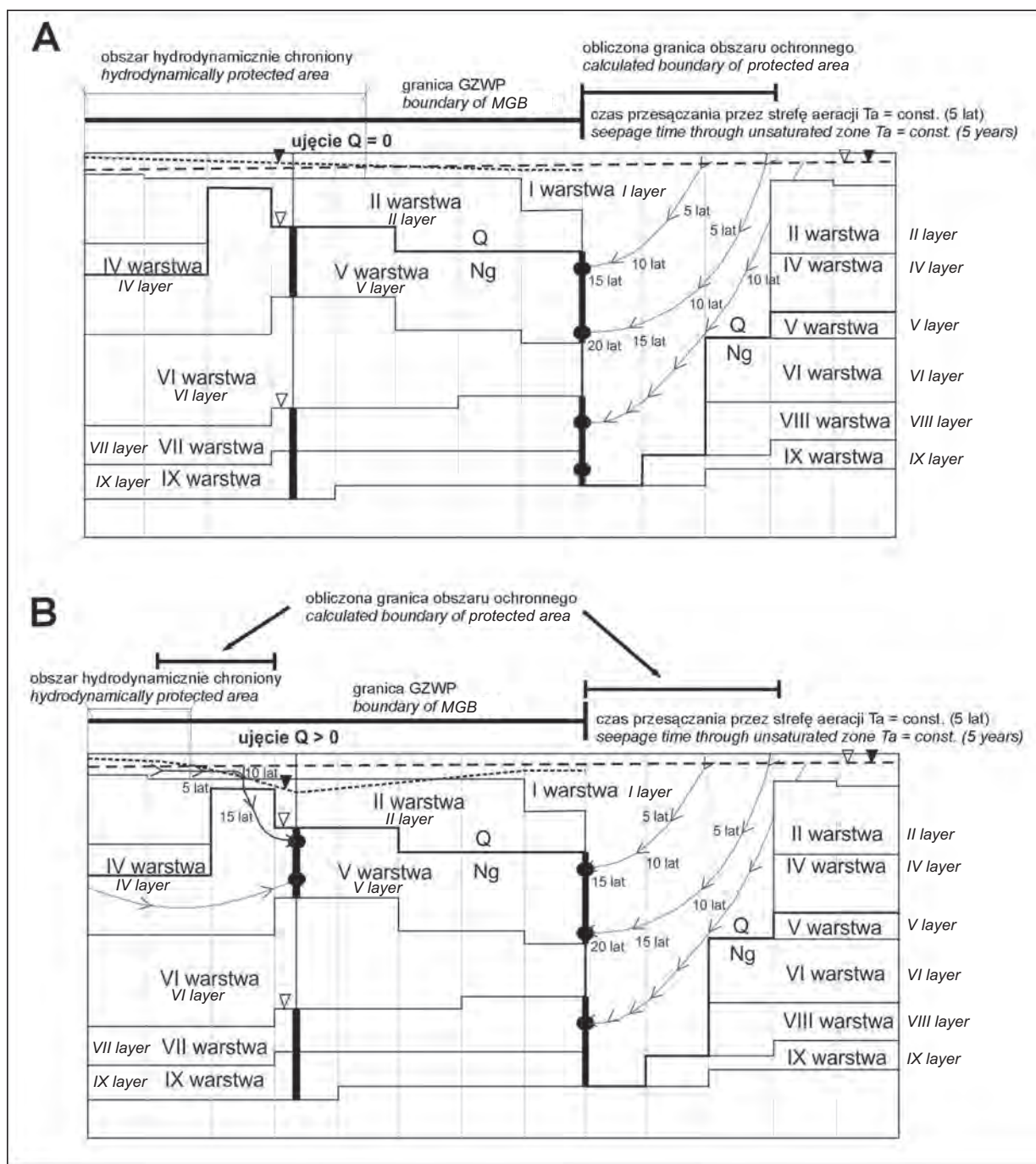
nych na ekosystemy zależne od wody. Równocześnie model daje możliwość optymalizacji i weryfikacji wydanych pozwoleń wodnoprawnych i tym samym zapewnia dokładne obliczenia rozkładu zasobów dyspozycyjnych w poszczególnych rejonach wodnogospodarczych.

Numeryczny model filtracji stanowi kompendium dostępnej wiedzy hydrogeologicznej dla danego rejonu, więc powinien być narzędziem, na którym można sprawdzać dowolne scenariusze związane z gospodarką wodami podziemnymi. Praca nad modelem w pełni trójwymiarowym, a następnie jego kalibracja, jest dużo trudniejsza niż w przypadku uproszczonego modelu typu T. Nakłada się tu jeszcze problem wysychania bloków pierwszej warstwy modelu (McDonald i in., 1991), jednak to zagadnienie w odniesieniu do badań regionalnych skomentowano już w innej publikacji (Gurwin, 2016). Nowe wersje MODFLOW, wykorzystywane obecnie praktycznie we wszystkich tego typu modelach, nie pozwalają już nawet na bezpośrednie operowanie współczynnikiem wodoprze-



Ryc. 3. Fragment schematu struktury modelu numerycznego GZWP nr 341 – analiza wyznaczenia obszaru ochronnego na modelu strukturalnym

Fig. 3. Fragment of numerical model structure of MGB No. 341 – analysis of the designation of the protected area on the structural model



Ryc. 4. Schemat analizy dynamiki zmian obszaru ochronnego na przykładzie modelowania numerycznego GZWP nr 323 subzbiornik rzeki Stobrawy (Krawczyk i in., 2013). **A** – brak eksploatacji, poziom zbiornika hydrodynamicznie chroniony przed dopływem zanieczyszczeń; **B** – eksploatacja, zmiana warunków hydrodynamicznych

Fig. 4. Scheme of analysis of changes of the protected area on the example of the numerical model for MGB No. 323 Stobrawa River sub-basin (Krawczyk et al., 2013). **A** – without exploitation, the basin hydrodynamically protected against pollution; **B** – with exploitation, change of hydrodynamic conditions

warstwowych w regionalnych ocenach zasobowych musi być poparte analizą możliwości wykonania modelu bardziej złożonego. Nawet dla obszarów górskich zawodniona strefa przypowierzchniowa może być symulowana łącznie z osadami dolinnymi jako swobodna lub swobodno-naporowa pierwsza warstwa, od której zależy zasilanie całego systemu wodonośnego.

Stąd zasadne jest pytanie czy budowane regionalne modele przepływu wód podziemnych mogą mieć charakter stacjonarny. Te zaawansowane w zakresie odwzorowania systemu wodonośnego na pewno tak, gdyż w przyszłości

wymagają jedynie uwzględnienia i korekty o nowe dane z monitoringu czy nowych wierceń. Modele typu T są natomiast na tyle uproszczone, że wątpliwe jest, aby mogły należycie spełniać rolę narzędzia wykorzystywanego do sterowania zasobami obszaru bilansowego / zlewni. Dobrze skonstruowane modele 3D mogą być wykorzystane do wydzielenia modelu lokalnego i dokonania szczegółowych obliczeń, na przykład dla wybranego ujęcia. Wiąże się z tym nierozdzielnie problem aktualizacji i weryfikacji modeli. Z doświadczeń autorów wynika, że niestety dzieje się tak niezwykle rzadko, jednak dobrym przykładem, że

tak być może, jest regionalny model 3D obszaru LGOM (Staško i in., 2012; Gurwin i in., 2014), który aktualizowano w latach 2009–2016 w miarę napływu nowych danych o wyrobiskach, dopływach i monitoringu od służb kopalni. W ten sposób stale udoskonalany model stał się modelem stacjonarnym, wykorzystywanym do wielu praktycznych zadań. Dlatego też regionalne modele, wykonywane do ocen zasobowych lub dla GZWP w wersjach 3D, powinny podlegać aktualizacji w miarę napływu nowych informacji z katastru wodnego, banku HYDRO, krajowego monitoringu i innych baz danych. I tu pojawia się następne pytanie. Ile czasu (lat) trwa praca nad weryfikacją/aktualizacją/doskonaleniem tego typu modelu? Okres dokumentowania i przygotowania modelu to ok. 2–3 lata. Ale później powinien być rozwijany i dostosowany do rozwiązywania nowych zagadnień. Oprócz innych potencjalnych zadań hydrogeologicznych, także pojawiające się regularnie w ramach KZGW/RZGW opracowania, dotyczące warunków korzystania z wód, czy też planów przeciwdziałania skutkom suszy, powinny właśnie te modele wykorzystywać, jeśli tylko obszarowo się pokrywają.

PODSUMOWANIE

Niezależnie od realizowanego celu regionalnego modelu filtracji, należy dążyć do trójwymiarowego schematu systemu wodonośnego, w którym agregacja warstw i ich hydrodynamiczne oddziaływania nie budzą wątpliwości interpretacyjnych. Analiza przestrzennego pola filtracji daje możliwość jednoznacznych ocen obszaru ochronnego GZWP, a w obliczeniach zasobowych, uwzględniając zmienność strukturalną systemu wodonośnego, uzyskuje się pewniejszą analizę oddziaływań z wodami powierzchniowymi, czy też realną możliwość ocen z zakresu ochrony ekosystemów od wód zależnych. Model taki może być później modelem stacjonarnym, na którym będą realizowane scenariusze bilansowania i wykorzystania wód podziemnych w regionach wodnogospodarczych. Z wielu względów, popartych regionalnymi modelami, należy zalecać stosowanie modeli 3D także do ilościowej oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych.

Autorzy dziękują Recenzentowi za wnikliwe uwagi, które pozwoliły poprawić jakość pracy. Publikacja powstała na podstawie prac związanych z dokumentowaniem obszarów ochronnych GZWP, które zostały sfinansowane przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

LITERATURA

ANDERSON M., WOESSNER W., HUNT R. 2015 – Applied Groundwater Modeling, Academic Press, Inc., London.
GOSSEL W., EBRAHEEM A.M., WYCISK P. 2004 – A very large scale GIS-based groundwater flow model for the Nubian sandstone aquifer in Eastern Sahara (Egypt, northern Sudan and eastern Libya), *Hydrogeol. J.*, 12: 698.

GURWIN J. 2003 – Dane wejściowe a kalibracja numerycznego modelu filtracji. Współczesne problemy hydrogeologii, WBWiŚ, Gdańsk, 11 (1): 301–308.
GURWIN J. 2012 – Integration of numerical models with geoinformatic techniques in delimitation of protection zones of complex multi-aquifer systems of MGWB in Poland, XXXIX IAH Congress – Abstract Book, Niagara Falls, Canada 2012.
GURWIN J. 2015 – Integration of numerical models with geoinformatic techniques in delimitation of protection zone of complex multi-aquifer system of MGB 319, SW Poland. *Geologos*, 21 (3): 169–177.
GURWIN J. 2016 – Problematyka wyznaczania obszarów ochronnych w złożonych warunkach hydrostrukturalnych kredowego zbiornika wód podziemnych. [W:] Witczak S., Żurek A. (red.), *Praktyczne metody modelowania przepływu wód podziemnych*. Wyd. Nauk. AGH, Kraków: 33–44.
GURWIN J. 2017 – Numerical model schematization of a complex hydrostructural Cretaceous groundwater basin for the purpose of protection zone evaluation. *Geol., Geophys. & Environ.*, 43 (1): 19–31.
GURWIN J., SERAFIN R. 2008 – Budowa przestrzennych modeli koncepcyjnych GZWP w systemach GIS zintegrowanych z MODFLOW. *Biul. Państw. Inst. Geol., Hydrogeologia*, 431: 49–59.
GURWIN J., SERAFIN R. 2010 – Zastosowanie numerycznego modelu filtracji i systemów geoinformacyjnych GIS jako narzędzi wspomagających wyznaczanie stref ochronnych GZWP. *Biul. Państw. Inst. Geol., Hydrogeologia*, 442: 69–78.
GURWIN J., STAŠKO S., WCISŁO M. 2014 – Dokładność odwzorowania wielowarstwowych systemów hydrogeologicznych na szczegółowych modelach numerycznych – analiza dla obszaru LGOM. [W:] Krawiec A., Jamorska I. (red.), *Modele matematyczne w hydrogeologii*. Wyd. Nauk. UMK, Toruń: 45–50.
HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., RODZOCH A. 2013 – Metodyka określania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w obszarach bilansowych z uwzględnieniem potrzeb jednolitych bilansów wodnogospodarczych – poradnik metodyczny. Wyd. Borgis, Warszawa.
KRAWCZYK J., KORWIN-PIOTROWSKA A., MAJRALA D., MZYK S., SERAFIN R., WOJTKOWIAK A., BIEL A. 2013 – Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanowieniem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 323 subzbiornik rzeki Stobrawa. PIG-PIB OD, Wrocław.
MARGAT J. 1976 – Analyse des systemes aquiferes et evaluation des resources en eau souterraine. *Rapp. BRGM 76 GN 532 AME*, Orleans.
McDONALD M.G., HARBAUGH A.W. 1988 – A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey Open-File Report, Washington.
McDONALD M.G., HARBAUGH A.W., ORR B.R., ACKERMAN D.J. 1991 – A Method of Converting No-Flow Cells to Variable-Head Cells for the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geol. Survey Open-File Report, Reston.
MICHALAK J. 2008 – Budowa modeli przepływu z wykorzystaniem danych infrastruktury geoinformacyjnej INSPIRE. *Biul. Państw. Inst. Geol., Hydrogeologia*, 431: 161–168.
SERAFIN R., KORWIN-PIOTROWSKA A., KRAWCZYK A., WOJTKOWIAK A., BIEL A. 2015 – Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanowieniem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 341 Niecka wewnętrzna Kudowa Zdrój–Bystrzyca Kłodzka. Państw. Inst. Geol. – PIB OD, Wrocław.
STAŠKO S., GURWIN J., WCISŁO M., MODELSKA M., KRYZA H., KRYZA J., OLICHWER T., BUCZYŃSKI S., TARKA R., WAŚIK M., BECKER R. 2012 – Model koncepcyjny systemu hydrogeologicznego obszaru oddziaływania LGOM (Conceptual model of the hydrogeological system of the LGOM influence area). *Biul. Państw. Inst. Geol., Hydrogeologia*, 451: 203–210.
SZYMANKO J. 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego. Wyd. Geol., Warszawa.
ŚMIETAŃSKI L., FILAR S., OLESIOK G., PIASECKA A., TOKARSKA A. 2015 – Zagadnienie parametryzacji hydrogeologicznej regionalnych modeli ustalonego przepływu wód podziemnych. *Prz. Geol.*, 63 (10/2): 1105–1110.