

## Modelowanie wielowarstwowych zbiorników wodonośnych na przykładzie GZWP nr 338 – Subzbiornik Paczków–Niemodlin

Lidia Razowska-Jaworek<sup>1</sup>, Zbigniew Kaczorowski<sup>1</sup>, Marcin Pasternak<sup>1</sup>, Joanna Cudak<sup>1</sup>

Modelling of multi-layered groundwater basins; a case study of MGWB No. 338 Paczków–Niemodlin. *Prz. Geol.*, 65: 1234–1238.

*Abstract.* The objective of this paper is to present the advantages and problems related to the application of a multi-layer model in hydrogeological investigations, exemplified by the Main Groundwater Basin No. 338. The main aquifer in this basin is Neogene, but Quaternary, Cretaceous and Palaeozoic-Proterozoic aquifers have also been identified there. Due to the presence of numerous permeable layers, separated by impermeable ones of irregular distribution in the Neogene aquifer, 27 model layers have been distinguished, including 10 water-bearing horizons. A large number of model blocks caused the increase of the computational time, and a large number of layers have lengthened the calibration time of the model. However, anthropogenic or geologic threats to multi-layer structures have justified such a large number of layers, enabling the water balance for the selected part of the basin or for the selected depth intervals with groundwater of good or bad status.

**Keywords:** groundwater basin, modelling, water balance

Do niedawna programy do modelowania przepływu wód podziemnych posiadały ograniczenia związane z wielkością pola filtracji (liczba bloków i warstw), co zmuszało wykonawców modeli do dużych uproszczeń struktury geologicznej. Zwykle ograniczano się do maksymalnie kilku warstw obliczeniowych modelu. Rozwój technologii i informatyki spowodował powstanie oprogramowania o znacznie większych możliwościach, pozwalających na bardziej dokładne odwzorowanie struktury geologicznej i warunków przepływu wód podziemnych.

W poniższym artykule przedstawiono przykład odwzorowania skomplikowanej struktury geologicznej w obszarze neogeńskiego GZWP nr 338 na wielowarstwowym modelu przepływu, wykonanym za pomocą programu Modflow wersja 2011. Ze względu na występowanie w piętrze neogenu licznych warstw przepuszczalnych, przedzielonych utworami nieprzepuszczalnymi o nieregularnym rozprzestrzenieniu oraz warstw wodonośnych w utworach czwartorzędowych, kredy i w kompleksie paleozoiczno-proterozoicznym, zdecydowano się na wydzielenie aż 27 warstw obliczeniowych modelu, w tym 14 warstw wodonośnych.

Celem tego artykułu jest przedstawienie metodyki, wyników modelowania oraz trudności i korzyści z zastosowania wielowarstwowej struktury modelowej w badaniach hydrogeologicznych.

### OBSZAR BADAŃ

Główny Zbiornik Wód Podziemnych (GZWP) nr 338 znajduje się w południowej części województwa opolskiego, należy do lewostronnego dorzecza Odry i jest odwadniany przez Nysę Kłodzką i Ścinawę Niemodlińską (ryc. 1). Pod względem hydrograficznym przedstawiony obszar jest szczególnie urozmaicony, bowiem obejmuje odcinek Nysy Kłodzkiej silnie zmieniony wskutek wybudowania zapór piętrzących wodę w zbiornikach retencyjnych: Kozielno, Otmuchów i Nysa. GZWP nr 338 znajduje się we wschodniej części bloku przedsudeckiego i zajmuje część neogeńskiego zapadliska tektonicznego rowu Paczków–Kędzierzyn–Koźle

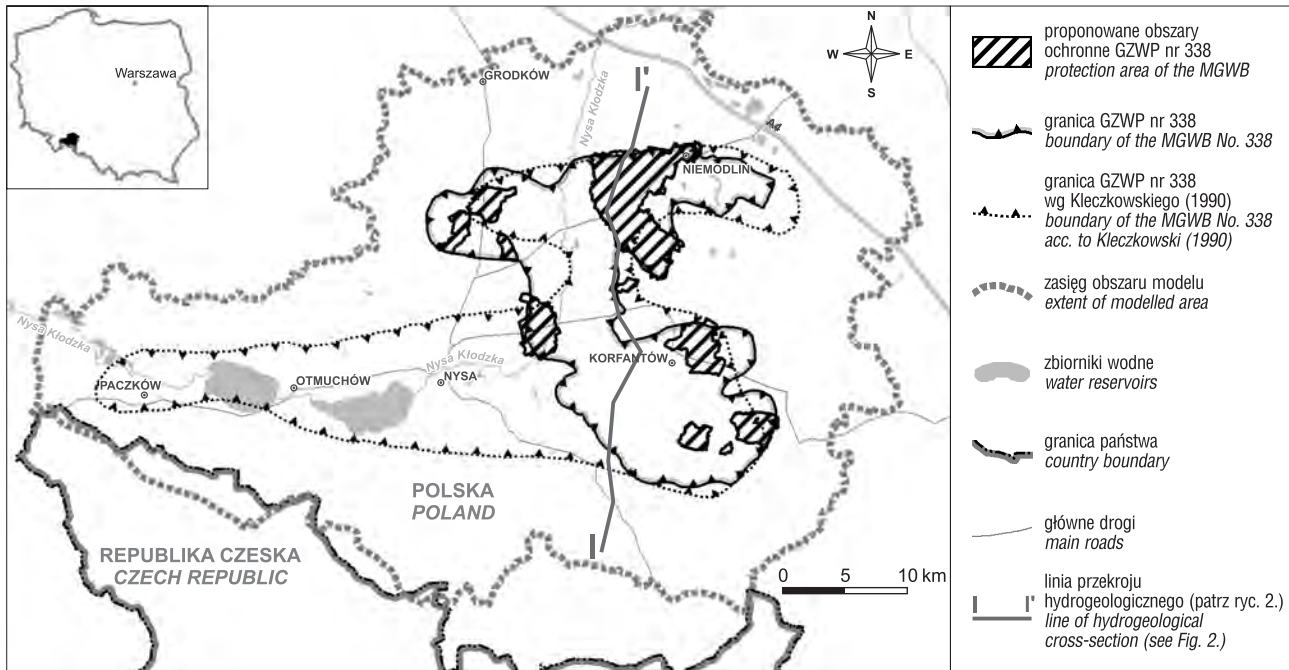
(Badura, Przybylski, 2000). Wypełniony osadami neogenu został zaliczony przez Kleczkowskiego (1990) do obszaru wysokiej ochrony. Według podziału hydrogeologicznego Polski (Paczyński, Sadurski, 2007) obszar zbiornika leży w regionie Środkowej Odry, subregionie Środkowej Odry południowym. Utwory wodonośne w osadach neogeńskich są nieregularnie rozprzestrzenione i posiadają zmienne parametry hydrogeologiczne. W obrębie serii ilastej występuje od kilku do kilkunastu warstw piaszczystych o łącznej miąższości do ponad 50 m (Koślacz, 1989), w formie nieciągłych i rozczłonkowanych pokryw oraz soczew. Powierzchnia podczwartorzędowa jest poprzecinana szeregiem rynien erozyjnych współczesnych i kopalnych dolin rzecznych, w których występują piaszczyste utwory tworzące połączone poziomy czwartorzędowo-neogeńskie. Zarówno litologia, jak i miąższość poszczególnych warstw są zróżnicowane. Serie wodonośne są z reguły wykształcone jako piaski drobne i średnie, niekiedy jako żwiry. GZWP nr 338 jest ważnym źródłem wody pitnej zarówno dla ludności zamieszkującej ten rejon, jak i dla gospodarki.

W latach 2011–2013 w Oddziale Górnośląskim Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB była wykonywana „Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanawianiem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 338 – Subzbiornik Paczków–Niemodlin” (Razowska-Jaworek i in., 2013). Niniejszy artykuł przedstawia wyniki modelowania hydrogeologicznego wykonanego na potrzeby tej dokumentacji.

### METODYKA MODELOWANIA

Modelowanie rozpoczęto od schematyzacji budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych obszaru badań. Na podstawie profili litologicznych z 2577 studni i otworów badawczych dokonano podziału badanego obszaru na warstwy obliczeniowe modelu. Na obszarze badań występują cztery piętra wodonośne: czwartorzędowe, neogeńskie, kredowe i kompleks paleozoiczno-proterozoiczny. Piętro czwartorzędowe na ogół stwierdzano na

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec; lraz@pgi.gov.pl.



**Ryc. 1.** Lokalizacja i granice zbiornika GZWP nr 338 oraz obszaru modelu  
**Fig. 1.** Location and delimitation of MGWB No. 338 and the model area

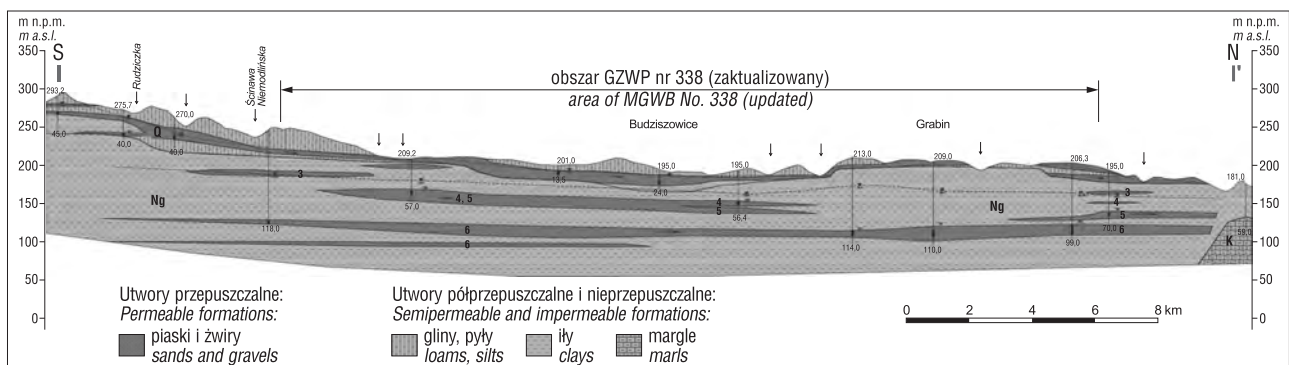
całym omawianym obszarze, tworzy jedną do trzech warstw wodonośnych, o zmiennej miąższości. Piętro neogeńskie obserwuje się zarówno na wysoczyznach, jak i w rowach tektonicznych w obrębie bloku przedsudeckiego, a jego głębokość sięga do 250 m w części zachodniej i do 450 m w części wschodniej obszaru. W części północno-wschodniej, pod utworami czwartorzędowymi i neogenu, występują margliste utwory kredy, w części zachodniej pod tymi utworami – skały paleozoiczno-proterozoiczne. Poziomy wodonośny czwartorzędowy i neogenu mogą lateralnie kontaktować się z poziomem wodonośnym paleozoiczno-proterozoicznym, rozwiniętym w spękanych łupkach, kwarcytach, gnejsach oraz wapieniach krystalicznych, występujących w południowej części omawianego obszaru (Dyjor i in., 1978). Rejon ich wychodni stanowi obszar najwyższych ciśnień w badanym obszarze czyli obszar zasilania.

Analiza profili litologicznych studni i otworów badawczych wykazała bardzo dużą zmienność litologii osadów czwartorzędowych i neogenu. Ze względu na występowanie w profilu pionowym piętra neogenu licznych warstw przepuszczalnych, przedzielonych utworami nieprzepuszczalnymi o nieregularnym rozprzestrzenieniu (ryc. 2), było konieczne

wyodrębnienie w modelu aż 27 warstw obliczeniowych. Utwory czwartorzędowe zostały odwzorowane sześcioma warstwami (nr 1–6), utwory neogenu dwudziestoma (nr 7–26) oraz jedna warstwa (nr 27) odwzorowywała utwory paleozoiku, kredy i neogenu.

W poziomie czwartorzędowym wydzielono trzy warstwy wodonośne, a w poziomie neogenu dziesięć. Ich schematyzację wykonano, przyjmując następujące przedziały rzędnych występowania spągu warstw wodonośnych w utworach neogenu: ponad 240, 240–210, 210–160, 160–140, 140–120, 120–90, 90–60, 60–30, 30 do –5 i –5 do –50 m n.p.m. Poniżej rzędnej –50 m n.p.m. neogen nie jest rozpoznany otworami studziennymi. W otworach, które w danym przedziale nie posiadały przewarstwień o charakterze warstwy wodonośnej, przyjmowano wartość miąższości równą „0”.

Strop warstwy wodonośnej modelu wyznaczono przez dodanie do wartości rzędnej spągu zsumowanej wartości miąższości warstwy modelu. Obserwowane miąższości warstw wodonośnych w profilach otworów wynosiły od 0,5 do 72 m. Wydzielenia bardziej miąższe niż przedział warstwy modelu były dzielone na 2 do 3 warstw wodonoś-



**Ryc. 2.** Schematyczny przekrój hydrogeologiczny przez GZWP nr 338  
**Fig. 2.** Schematic hydrogeological cross-section of MGWB No. 338

nych. Miąższości warstw rozdzielających warstwy wodonośne określała różnica rzędnych spągu nadległej warstwy wodonośnej i stropu niżej zalegającej warstwy wodonośnej. W obszarach wychodni warstw starszych niż osady neogenu miąższości warstw czwartorzędu (warstwy 1–6) i neogenu (warstwy 7–26) były zredukowane do 0,1–1,0 m. Na obszarze o rzędnych powierzchni stropu utworów starszych niż neogen lub spągu utworów czwartorzędu, wyższych niż przedział występowania warstwy wodonośnej modelu, miąższości neogeńskich warstw wodonośnych zostały zredukowane do 0,1 m. Na rycinie 3 przedstawiono strukturę modelu i wzajemne relacje neogeńskich warstw wodonośnych.

Badania modelowe wykonano, używając pakietu programów Visual Modflow. W pakiecie znajdują się moduły do wprowadzania danych, prowadzenia obliczeń przepływu wód podziemnych – program ModFlow, moduł obliczania linii prądu – ModPath i moduł prezentacji wyników obliczeń.

Na granicach modelowanego obszaru zadano warunki brzegowe III rodzaju GHB (General Head Boundary) do warstw wodonośnych modelu należących do neogeńskich i starszych poziomów wodonośnych.

Infiltracja efektywna jest zadawana w modelu warunkami II rodzaju (wartość wydatku w kroku obliczeniowym  $Q = constans$ ). Na przeważającym obszarze, wskutek występowania pokrywy osadów lessowych, zadano infiltrację efektywną wynoszącą 8–11 mm/r, tj. 1,3–1,8% opadu z 2012 r.

Cieki powierzchniowe i zbiorniki wodne symulowano warunkami III rodzaju, w których przepływ jest funkcją położenia zwierciadła wody w bloku obliczeniowym – warunek River  $Q = f(H)$ .

Eksploatacja studni była symulowana warunkami II rodzaju o wartości wydatku w kroku obliczeniowym  $Q = constans$ .

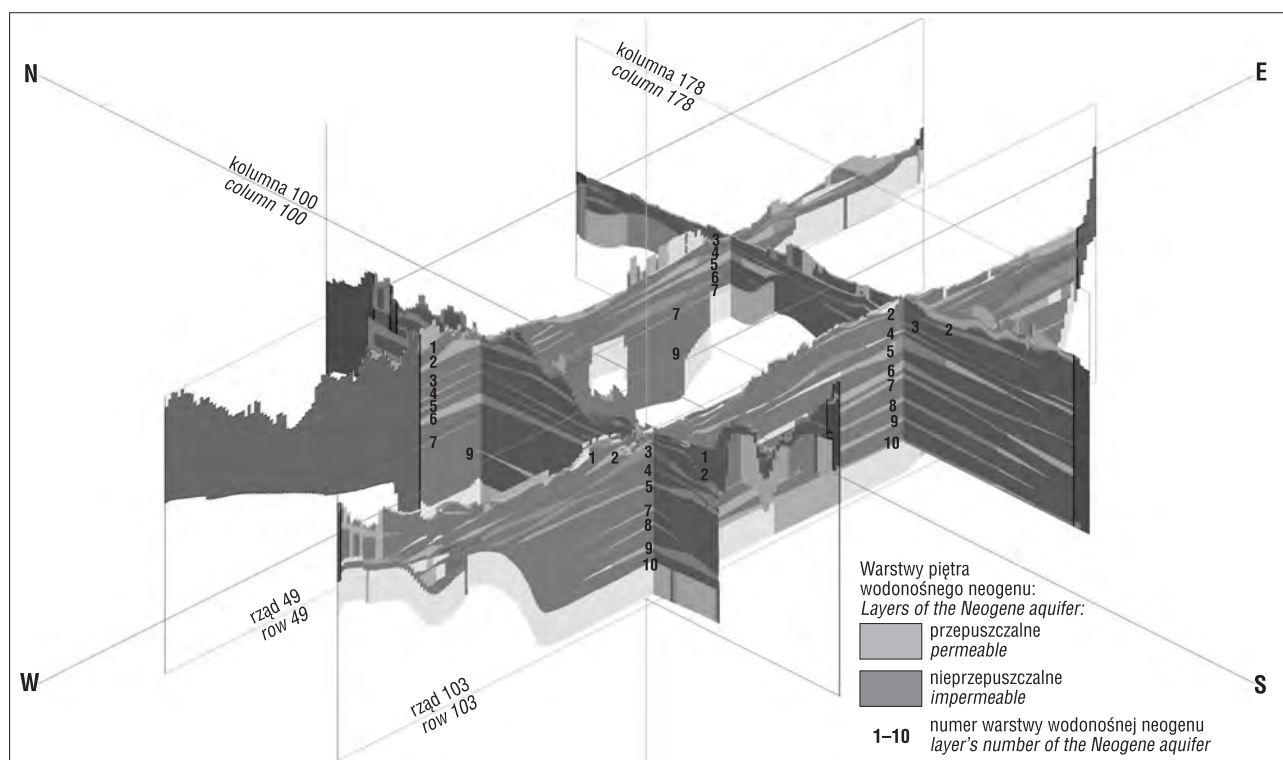
## WYNIKI BADAŃ

Na podstawie danych z eksploatacji studni z lat 2011–2012, uzyskanych z bazy danych i zebranych w terenie od właścicieli ujęć, oraz opierając się na zdjęciu hydrogeologicznym wykonanym w rejonie obszaru modelu w 2012 r., dokonano obliczeń kalibracyjnych modelu numerycznego. Dopasowanie wartości obliczonych do wartości obserwowanych jest następujące: średnie odchylenie wynosi 0,02 m, średnia z modułu odchyżeń – 3,7 m, minimalne odchylenie – 0,004 m, maksymalne odchylenie – –28,61 m.

Na wielkości odchyżeń mają wpływ następujące czynniki:

- wynikające z dyskretyzacji modelu na bloki – wielkość bloku siatki modelu,
- uproszczenia struktury modelu w stosunku do warunków naturalnych,
- wykonywanie pomiarów w nieustalonym polu filtracji (praca ujęć znajdujących się w rejonie mierzonej studni),
- pomiar w studni w warunkach braku eksploatacji, a wynik rzędnej zwierciadła w bloku obliczeniowym z zadaną eksploatacją lub sytuacja odwrotna.

Zwierciadło wody w bloku obliczeniowym jest średnim stanem z powierzchni bloku przypisanym do środka geometrycznego bloku. Dodatkowe czynniki to zróżnicowanie powierzchni morfologicznej terenu i warstw osadów (ryc. 3). Część obszaru tworzą strome wzniesienia. Lokalnie występują gwałtowne wyklinowania warstw wodonośnych (np. wcięte doliny holoceniowe), co prowadzi do nagłych zmian rzędnych zwierciadła wody. W osadach pokrywy



Ryc. 3. Wizualizacja 3D rozprzestrzenienia warstw wodonośnych neogenu w obszarze badań  
Fig. 3. 3D visualization of spatial distribution of water-bearing horizons in the study area



**Tab. 1.** Bilans wody GZWP nr 338 dla warstw neogeńskich  
**Table 1.** Water balance of MGWB No. 338 for the Neogene aquifer

Rodzaj warunków Condition type	Dopływ Inflow rate [m <sup>3</sup> /d]	Odptyw Outflow rate [m <sup>3</sup> /d]
Infiltracja / Infiltration	4382,5	–
Rzeki / Rivers	180,6	758,5
Q–Ng	5267,9	7900,7
Spoza GZWP 338 From outside of MGB No. 338	8546,4	4963,6
Studnie / Wells	–	4729,8
Suma / Total	18377,4	18352,6

lessowej występują lokalnie przewarstwienia piasków, tworzące niewielkie „zawieszane” soczewki, w których są zlokalizowane studnie kopane.

Bilans przepływów w modelu przedstawiono w tabeli 1. Błąd oszacowania wynosi 326,1 m<sup>3</sup>/d, tj. 0,22%. Moduł zasilania dla obszaru modelu wynosi 0,84 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Sumaryczny dopływ wód do warstw neogenu GZWP nr 338 wynosi 18 377,37 m<sup>3</sup>/d, w tym 4382,5 m<sup>3</sup>/d pochodzi z bezpośredniej infiltracji opadu. Moduł zasilania wynosi 0,55 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Sumaryczny odpływ z warstw neogenu wód podziemnych stanowi 13 622,8 m<sup>3</sup>/d, nie uwzględniając eksploatacji studni.

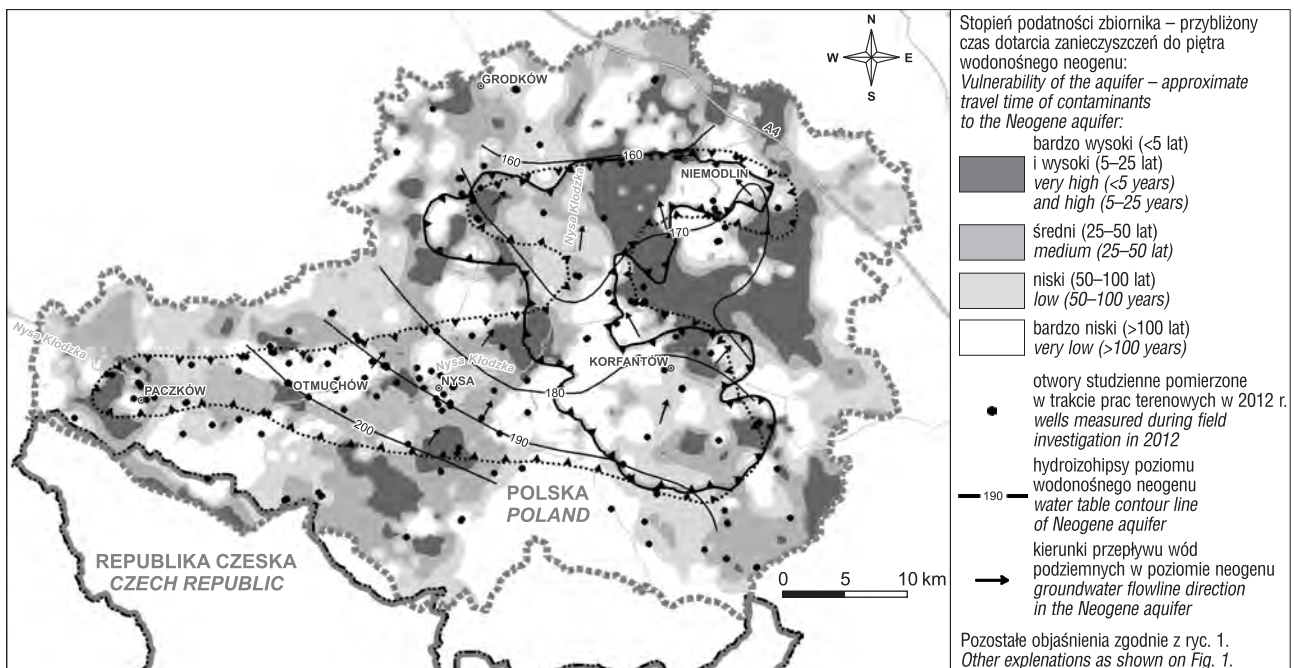
Na podstawie badań modelowych oraz badań jakości wód podziemnych udokumentowano nowe, w stosunku do wyznaczonych wcześniej (Kleczkowski i in., 1990), granice zbiornika. Przesunięto je w części zachodniej, z powodu zanieczyszczenia wód podziemnych fluorem pochodzenia geogenicznego (Razowska-Jaworek, Cudak, 2009), oraz w pozostałych częściach, ze względu na zbyt niską wartość przewodności hydraulicznej (ryc. 4).

GZWP nr 338 w uaktualnionych granicach zajmuje powierzchnię 385,9 km<sup>2</sup>. Dla ustalenia potencjalnej strefy ochronnej zbiornika, podczas badań modelowych przeprowadzono analizę prędkości przemieszczania się cząstek obliczeniowych w strumieniu wód podziemnych, w warunkach pracy ujęć z maksymalnym wydatkiem określonym w pozwoleniach wodnoprawnych. Jako czas dopływu wód do obszaru GZWP przyjęto sumę obliczonego podczas badań modelowych czasu przepływu wody w warstwach wodonośnych neogenu, czasu pionowej migracji wody i zanieczyszczeń z powierzchni terenu do poziomu wodonośnego oraz czasu przesączania wód przez utwory słabo przepuszczalne z nadległych poziomów wodonośnych do poziomu GZWP. Wyznaczoną w ten sposób granicę obszaru ochronnego, uszczegółowiono na podstawie zagospodarowania i użytkowania terenu (ryc. 1). Proponowany obszar ochronny zajmuje powierzchnię 95,5 km<sup>2</sup>, w tym 89,3 km<sup>2</sup> w obrębie zbiornika, co stanowi ok. 23,1% zaktualizowanej jego powierzchni.

## WNIOSKI

1. Ze względu na występowanie w obrębie GZWP nr 338 licznych warstw przepuszczalnych, przedzielonych utworami nieprzepuszczalnymi o nieregularnym rozpręstrzenieniu, w modelu wyodrębniono aż 27 warstw obliczeniowych. Studnie eksploatujące wody podziemne są zlokalizowane w wielu warstwach wodonośnych. Miąższość warstw rozdzielających jest bardzo zmienna, a kierunki przepływu wody w sąsiednich warstwach wodonośnych mogą być różne, a nawet przeciwne.

2. Wielowarstwowa struktura modelowa powodowała pojawianie się bloków osuszonych nawet w głębiej zalegających warstwach modelu, w strefach ich wyklinowywania (np. do 26 warstwy w obszarze wschodni skał starszych niż neogeńskie). Podobnie, w głębszych warstwach, mogą występować bloki z warunkami III rodzaju (rzeki).



**Ryc. 4.** Szkic hydrogeologiczny GZWP nr 338  
**Fig. 4.** Hydrogeological sketch-map of MGWB No. 338

3. Kolejnym czynnikiem utrudniającym interpretację warunków hydrologicznych podczas modelowania było występowanie zbiorników retencyjnych w biegu Nysy Kłodzkiej, o regulowanym przepływie. Są one obiektami związanymi z elektrowniami wodnymi lub o charakterze retencyjno-rekreacyjnym.

4. Za pomocą programu ModFlow nie można odwzorować w strukturze obszaru badań poziomów zawieszonych, a studnie kopane w nich zlokalizowane, użyte jako studnie obserwacyjne w modelu, mogą generować wówczas duże błędy lub znajdować się w suchych warstwach modelu.

5. Duża liczba bloków modelu spowodowała wydłużenie czasu obliczeń, a duża liczba warstw obliczeniowych wydłużyła znacznie czas kalibracji modelu. W przypadku tego modelu wyłącznie obliczenia wraz z kalibracją trwały kilka miesięcy.

6. Wykonane w ramach dokumentacji (Razowska-Jaworek i in., 2013) badania zawartości trytu oraz izotopów stabilnych wodoru i tlenu potwierdziły występowanie bardzo długich czasów dopływu wód (nawet ponad 100 tys. lat) do głębszych warstw piętra wodonośnego neogenu wyznaczonych za pomocą modelowania matematycznego.

7. Pomimo licznych utrudnień, rozpatrywanie struktur wielowarstwowych w warunkach zagrożeń geogenicznych lub antropogenicznych jest uzasadnione, ponieważ umożliwia określenie obszarów lub stref głębokościowych z warunkami występowania wód o stanie dobrym lub złym oraz wykonanie bilansu zasobów dla wybranej części zbiornika.

8. Zbyt uproszczone modele nie zawsze są w stanie właściwie odzwierciedlić rzeczywiste warunki krążenia i wymiany wód w wielowarstwowych zbiornikach wodonośnych.

Scalenie wielu warstw wodonośnych w jedną czy dwie warstwy modelu może stworzyć wirtualne warstwy wodonośne o niespotykanej w danym zbiorniku przewodności. Jest to bardzo istotne w sytuacji projektowania w takich obszarach ujęć wód podziemnych czy odwodnień, ponieważ powoduje najczęściej zawyżenie wydatków oraz zaniżenie depresji.

Autorzy składają podziękowania recenzentowi dr. hab. Jackowi Gurwinowi za cenne uwagi, które przyczyniły się do korekty artykułu. Praca, na podstawie której przygotowano ten artykuł, była realizowana w Oddziale Górnośląskim PIG-PIB i finansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

## LITERATURA

- BADURA J., PRZYBYLSKI B. 2000 – Mapa geotektoniczna Dolnego Śląska. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Wrocław.
- DYJOR S., DENDEWICZ A., GRODZICKI A., SADOWSKA A. 1978 – Neogeńska i staroplejstocenska sedimentacja w obrębie stref zapadli-skowych rowów Paczkowa i Kędzierzyna. Geol. Sudetica, 13 (1): 31–65.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1990 – Mapa obszarów GZWP w Polsce wymagających szczególnej ochrony 1 : 500 000. Wyd. AGH, Kraków.
- KOŚLACZ R. 1989 – Fluor w neogeńskich poziomach wodonośnych rejonu Nysy. VI Polsko-Czechosłowackie Sympozjum „Ochrona i zanie-czyszczanie wód podziemnych”. Darłówek: 209–216.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.) 2007 – Hydrogeologia regional-na Polski, tom I. Wody słodkie. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- RAZOWSKA-JAWOREK L., CUDAK J. 2009 – Geneza i rozprzestrze-nienie wód w wysoką zawartością fluoru w GZWP nr 338 – Subzbiornik Paczków–Niemodlin. Biul. Państw. Inst. Geol., 436: 397–402.
- RAZOWSKA-JAWOREK L., CUDAK J., KACZOROWSKI Z., PASTERNAK M. 2013 – Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanowieniem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 338 Paczków–Niemodlin. Państw. Inst. Geol. – Państw. Inst. Bad., Warszawa.