

# Identyfikacja systemu krążenia wód podziemnych w procesie ustalania zasobów odnawialnych na przykładzie zlewni Redy i Zagórskiej Strugi

Mirosław Lidzbarski<sup>1</sup>

**Identification of groundwater circulation system during assessment renewable resources for example of the Reda and Zagórka Struga catchment.** Prz. Geol., 63: 893–900.

*Abstract.* The study area of about 1,000 km<sup>2</sup> include northern part of Kashubian Lake District. The objective of the task was to recognition of groundwater circulation system and renewable resources. Detailed system of groundwater circulation was exemplified for Reda drainage basin. This work presents results of numerical models of groundwater in Reda and Zagórka Struga catchment and results of hydrological investigation. Results of numerical model estimated recharge and recharge of groundwater treatment for eliminated groundwater layers reduced in numerical models to 8 layers and groundwater balance regions. This evaluation, made according to three-dimensional filtration model on the assumption that a steady groundwater flow. The results of model simulation show that recharge area occur Kashubian Lake District and discharge area occur Reda ice marginal valley. It means that the total disposable groundwater resources for the specified area equals 520,605 m<sup>3</sup>/24h.

**Keywords:** hydrogeological conditions, numerical models of groundwater, renewable resources

Jednym z ważniejszych narzędzi badawczych, które umożliwiają ocenę zasobów wód podziemnych jest koncepcja systemu wodonośnego oraz związanego z nim systemu krążenia wód podziemnych. Pomimo stosowania od wielu lat takiego podejścia w badaniach hydrogeologicznych jest ono jeszcze niedopracowane. Świadczą o tym m.in. wyniki badań hydrogeologicznych o charakterze dokumentacyjnym, które często różnią się istotnie w ocenie zasobów wód podziemnych tych samych jednostek.

Dokumentowanie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w wyznaczonych jednostkach bilansowych poprzedza ustalenie zasobów odnawialnych (Herbich i in., 2014). Aby ocena była wiarygodna, powinna uwzględniać cały system wodonośny, w wielu przypadkach wykraczający poza granice hydrograficzne zlewni. Kompleksowa analiza systemu krążenia wód podziemnych wymaga dobrego rozpoznania nie tylko warunków geologicznych i hydrogeologicznych, lecz także musi uwzględniać cechy hydrologiczne oraz klimatyczne obszaru badań.

W publikacji tej na przykładzie zlewni Redy i Zagórskiej Strugi zaprezentowano wybrane parametry systemu wodonośnego, które pozwoliły na identyfikację systemu krążenia wód podziemnych, a w dalszej kolejności umożliwiły ocenę zasobów odnawialnych (Lidzbarski, 2007). Szczegółowo przeanalizowano warunki litologiczne, klimatyczne i hydrologiczne. Wstępnej oceny zasobów odnawialnych dokonano na podstawie dwóch metod analitycznych – infiltracyjnej i hydrologicznej. Wyniki obliczeń zweryfikowano w trakcie badań modelowych, co pozwoliło ostatecznie określić strukturę systemu krążenia, wielkość zasilania i drenażu wód podziemnych oraz opracować bilans wód dla całej zlewni i wybranych rejonów bilansowych.

## OBSZAR BADAŃ

Obszar badań, określony granicami zlewni Redy oraz Zagórskiej Strugi (664,15 km<sup>2</sup>), jest położony w północnej części województwa pomorskiego i sąsiaduje z wodami Zatok Puckiej. Przy konstrukcji modelu koncepcyjnego anali-

zowano znacznie większy teren (1300 km<sup>2</sup>), który obejmował obszar spływu wód, do Pradoliny Redy-Łeby i Pradoliny Kaszubskiej, wychodzący poza granice zlewni Redy i Zagórskiej Strugi. Rozpoznaniem hydrogeologicznym objęto wody aktywnej wymiany w poziomach użytkowych oraz płytkich wodach gruntowych. Analizowaną przestrzeń filtracyjną wyznaczały skrajne rzędne – 237,8 m n.p.m. w centralnej części Pojezierza Kaszubskiego i ok. 300 m p.p.m. w spagu wodonośnych utworów kredy.

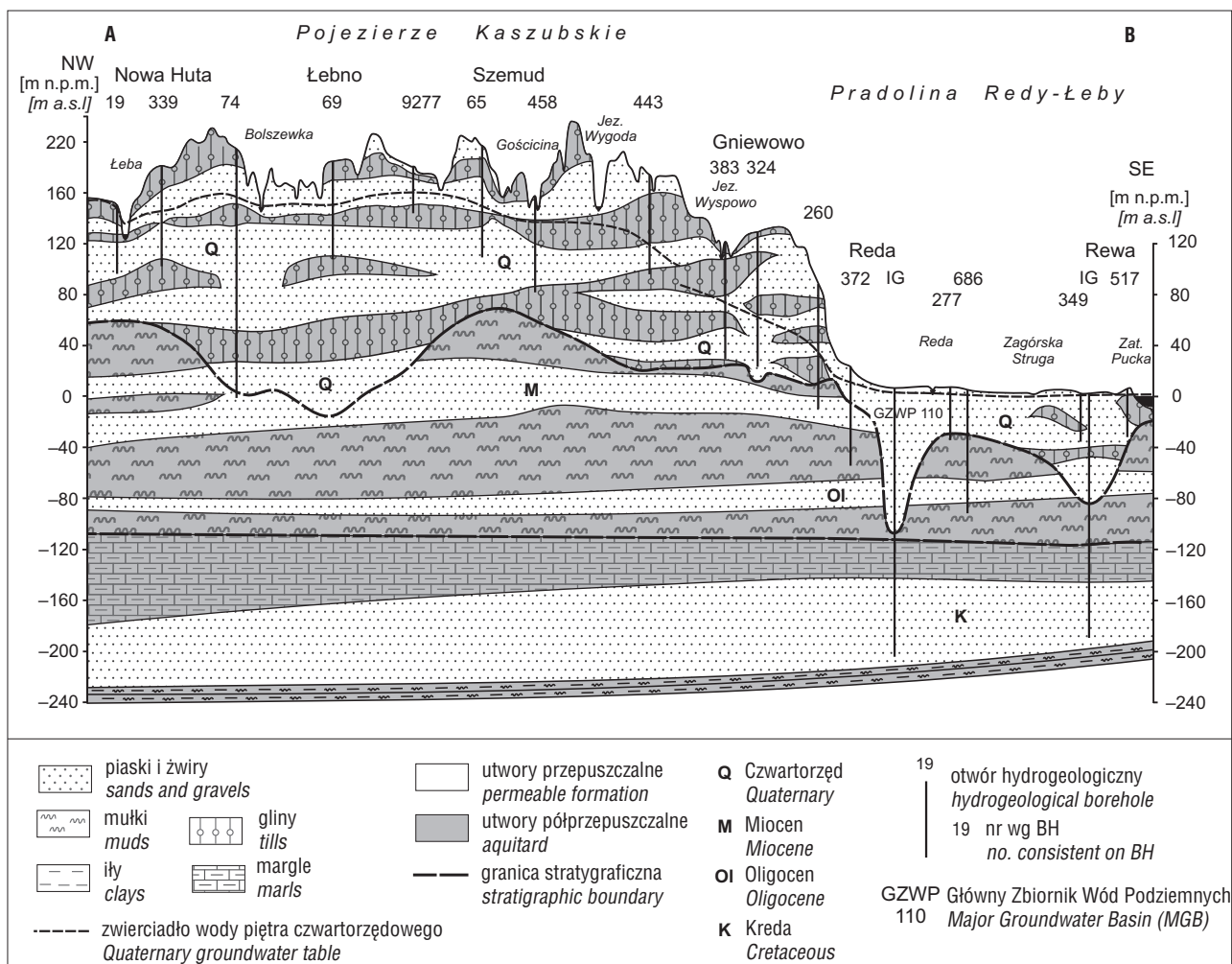
Charakterystyczną cechą omawianego obszaru jest występowanie wód podziemnych w wielopiętrowym systemie wodonośnym w osadach kredy, paleogenu, neogenu i czwartorzędu (Kozerski, 1990). W obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego na Pojezierzu Kaszubskim oraz na Wysoczyźnie Żarnowieckiej wody podziemne występują w dwóch poziomach międzymorenowych, natomiast w pradolinach dominuje jeden poziom wodonośny wykształcony w utworach wodnolodowcowych serii pradolinnej (ryc. 1). Wody podziemne w neogeńsko-paleogeńskim piętrze wodonośnym są związane z utworami piaszczystymi oligocenu i miocenu. Najniżej występuje kredowe piętro wodonośne (subniecka gdańska).

Na obszarze zlewni Redy i Zagórskiej Strugi wody podziemne są powiązane w spójnym systemie wodonośnym, obejmującym wszystkie poziomy. Struktury pradolin (GZWP nr 110) stanowią zasadniczą bazę drenażu tego systemu i determinują przepływ wód podziemnych we wszystkich piętrach wodonośnych (Lidzbarski, 2007).

## ZASILANIE INFILTRACYJNE

W celu oceny wielkości i przestrzennej zmienności zasilania infiltracyjnego zastosowano metodę wskaźnika infiltracji. Jej użycie było możliwe dzięki dobremu rozpoznaniu litologii utworów powierzchniowych oraz pozyskaniu wiarygodnych informacji o wysokości opadów atmosferycznych. Średnia wielkość opadów w granicach zlewni Redy i Zagórskiej Strugi wynosi ok. 680 mm (Friedrich i in., 1984). Maksymalne opady zanotowano na Wysoczyźnie

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Kościarska 5, 80-328 Gdańsk; miroslaw.lidzbarski@pgi.gov.pl.



**Ryc. 1.** Przekrój hydrogeologiczny  
**Fig. 1.** Hydrogeochemical cross-section

Żarnowieckiej w rejonie Żelazna (820 mm/roku), a najmniejsze w rejonie Gdyni (poniżej 600 mm). Rzeczywiście wysokość opadów całkowitych jest jeszcze wyższa, uwzględniając poprawkę na deszczomierzu – ok. 19% (Chomicz, 1976).

Zasilanie infiltracyjne kształtują także warunki litologiczne i geomorfologiczne. Powierzchnia pradolin jest przykryta przeważnie utworami piaszczysto-żwirowymi, z wyjątkiem północnej części pradoliny Kaszubskiej, gdzie utwory organiczne stanowią zwartą pokrywę o większym rozprzestrzenieniu. W północnej i zachodniej części Pojezierza Kaszubskiego, na Wysoczyźnie Żarnowieckiej dominują utwory wodnolodowcowe oraz akumulacji lodowcowej – piaski i żwiry glacialne. Charakterystyczne są liczne zagłębienia chłonne o charakterze wytopiskowym, które stanowią lokalne obszary bezodpływowe. Dla poszczególnych kompleksów geologiczno-morfologicznych, występujących na powierzchni terenu, przypisano różne wartości wskaźnika infiltracji (np. Pazdro & Kozerski, 1990). Zmodyfikowano je o wyniki szczegółowej analizy geostatystycznej wykonanej na podstawie SMGP 1 : 50 000, obejmujące dane opisowe z ok. 2500 sond penetacyjnych i 1200 otworów hydrogeologicznych (ryc. 2). Przydatne były opisy litologiczne z rozpoznania terenowego SMGP (Skompski, 1997, 2001; Pikies & Zaleszkiewicz, 1997).

Prawie na całym obszarze badań oraz w jego bezpośrednim otoczeniu przeważają utwory sprzyjające infiltra-

cji wód opadowych – wskaźnik infiltracji przekracza miejscami nawet 20% wysokości opadów. Tylko na niewielkich obszarach występują gliny zwałowe z niewielkim udziałem frakcji piaszczystej. Przypisano je do ostatniej klasy przepuszczalności, dla której wskaźnik ten wynosi 5%. Największe natężenie strumienia filtracyjnego, zasilającego wody podziemne, ma miejsce na Pojezierzu Kaszubskim (203 mm/rok), a nieco niższe na Wysoczyźnie Żarnowieckiej (189 mm/rok) i w Pradolinie Redy-Łeby (177 mm/rok). Najniższe zasilanie infiltracyjne zachodzi we wschodniej części Pradoliny Kaszubskiej (poniżej 80 mm/rok), gdzie ogranicza je występowanie utworów organicznych oraz zabudowa miejska na części obszaru.

#### ZASILANIE PODZIEMNE WYZNACZONE NA PODSTAWIE BADAŃ HYDROLOGICZNYCH

Odptyw gruntowy, ze zlewni zamkniętych profilami pomiarowymi, analizowano z wykorzystaniem metody Wundta (1953), wg której jest on utożsamiany ze średnią z minimalnych przepływów miesięcznych oraz metody Kicińskiego (1963, 1970), wg której rozdział odpływu na powierzchniowy i podziemny dokonano arbitralnie na hydrogramach codziennych pomiarów wodowskazowych (metoda ścienia fali). Metody te szczególnie efektywne okazały się przy analizowaniu odpływu gruntowego w granicach zlewni różnicowych. Pozwoliło to na jego prze-

strzenną waloryzację i określenie udziału w odpływie całkowitym. Rozdział odpływu na powierzchniowy, podpowierzchniowy i podziemny zweryfikowano dodatkowo na podstawie metody Killego (Kille, 1970). Przepływy wód powierzchniowych są rejestrowane przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) na Redzie w Zamostnym, w Wejherowie oraz na Bolszewce (dopływ Redy) w Barłominie i w Bolszewie.

W latach 1981–1983 ubiegłego wieku na obszarze zlewni Redy i Zagórskiej Strugi przeprowadzono szczegółowe badania hydrologiczne na siedmiu dodatkowych profilach wodowskazowych. Wysokie współczynniki korelacji, zachodzące między pomiarami z sieci IMGW a pomiarami z sieci specjalnej (0,8–0,98), stanowiły podstawę opracowania szczegółowych charakterystyk hydrologicznych dla okresu 1961–1983 (Friedrich i in., 1984).

Rzeki analizowanych zlewni należą do rzek nizinnych o śnieżno-deszczowym reżimie zasilania z maksimum w marcu i kwietniu. Średnie odpływy jednostkowe kształtują się w granicach 4,9–25,5 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>, przy średniej dla całego obszaru wynoszącej 10,98 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Wartości te wyróżniają się w skali Polski, ponieważ są o około dwukrotnie wyższe od średnich krajowych tego parametru (5,5 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>). Rozkład przestrzenny odpływów jednostkowych w poszczególnych zlewniach cząstkowych jest zróżnicowany (ryc. 3). Na Pojezierzu Kaszubskim i w zachodniej części Wysoczyzny Żarnowieckiej wartość odpływu jednostkowego wynosi od 7 do 10 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. W Pradolinie Redy-Łeby odpływ ten jest wyższy i przekracza 10 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>, a we wschodniej części pradoliny nawet 20 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Podobnie jest w Pradolinie Kaszubskiej, chociaż wartości odpływów jednostkowych są obniżone, co jest spowodowane odpływem wód powierzchniowych do warstw wodonośnych na skutek intensywnego poboru wód podziemnych. Najniższe wartości odpływów jednostkowych występują w środkowej części zlewni Zagórskiej Strugi (<3 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>), gdzie koryto rzeki przecina stożek napływowy, a także w górnej części zlewni Piaśnicy.

Na obszarze badań średni udział odpływu gruntowego w odpływie całkowitym waha się od 70,1 do 93,9%, w zależności od przyjętej metody:

- 8,2 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> wg Nathera (1996) dla zlewni Redy,
- 7,9–8,85 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> wg Friedricha i in. (1984) dla zlewni Redy i Zagórskiej Strugi,
- 4,2–9,3 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> wg metody Killego (1970) (ryc. 4),
- 6,8 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> wg badań modelowych autora.

Największa zbieżność między danymi archiwalnymi a wynikami badań modelowych występuje w zlewniach elementarnych, obejmujących Pradolinę Redy-Łeby i Pradolinę Kaszubską. Na Pojezierzu Kaszubskim odpływ podziemny obliczony w procesie badań modelowych jest ok. 20% niższy od danych uzyskanych z obserwacji hydrologicznych. Dotyczy to zwłaszcza południowej części wysoczyzny, gdzie wody powierzchniowe są słabo związane z wodami podziemnymi użytkowych poziomów wodonośnych. Dlatego też nie uwzględniono ich w procesie badań modelowych. Zasilane są one jednak stałym strumieniem płytkich wód pierwszego poziomu wodonośnego, pozostającego poza strefą saturacji. Szacuje się, że ok. 20% zasilania podziemnego rzek pochodzi właśnie z systemu wód zawieszonych, występujących na obszarze Pojezierza Kaszubskiego.

Niezależnie od zastosowanej metody obliczone wartości odpływów podziemnych są wyjątkowo wysokie. Szczególny pod tym względem jest wschodni odcinek Pradoliny Redy-Łeby między Bolszewem a Redą, gdzie odpływ gruntowy w granicach zlewni różnicowych waha się od 10 do 17 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Nieco niższe wartości odnotowano na obszarze Pradoliny Kaszubskiej, gdzie następuje infiltracja wód powierzchniowych do warstw wodonośnych, zwłaszcza w obrębie lejów depresji i na stożkach napływowych. Niskie wartości odpływu podziemnego Wysoczyzny Żarnowieckiej (2,5 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>) wskazują na możliwość zasilania wód Redy, na odcinku Zamostne–Wejherowo, wodami ze zlewni Piaśnicy (Balicki i in., 1981), co potwierdziły badania modelowe.

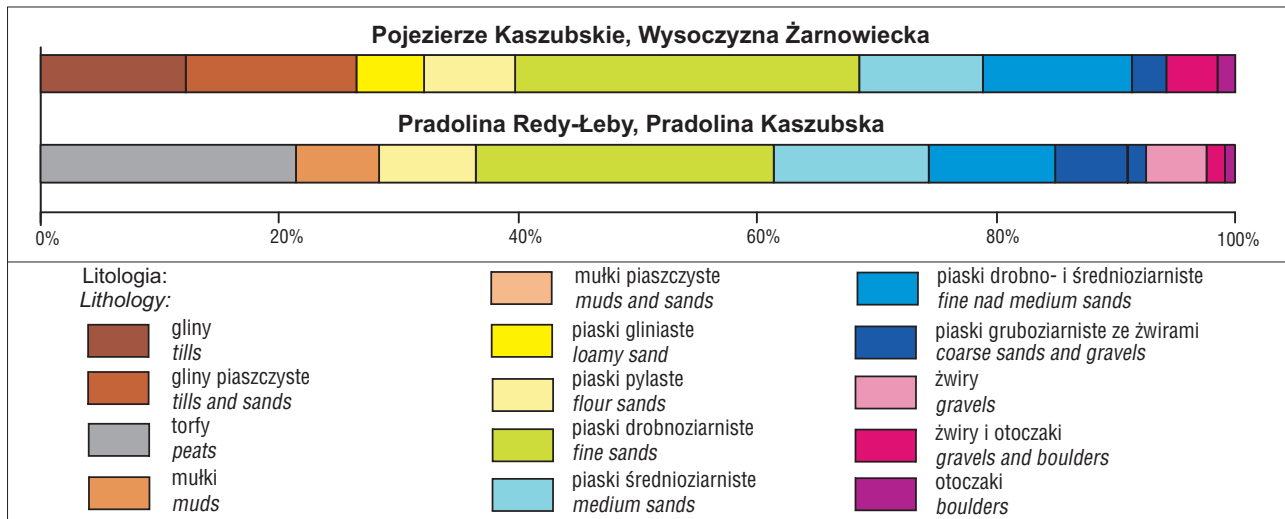
W górnej części zlewni Bolszewki udział wód podziemnych w zasilaniu wód powierzchniowych nie przekracza 61% wg metody Wundta i 73% wg metody Kicińskiego. Decyduje o tym słabszy stopień związania z wodami gruntowymi. Udział zasilania gruntowego wzrasta z biegiem rzeki w kierunku Pradoliny Redy-Łeby oraz w profilu Bolszewo przekracza już odpowiednio 64% i 79% przepływu całkowitego. Podobne wartości są charakterystyczne także dla dolnego odcinka zlewni Redy, który obejmuje Pradolinę Redy-Łeby i Pradolinę Kaszubską.

Silne związanie Zagórskiej Strugi z wodami gruntowymi potwierdziły wyniki badań modelowych. Zasilanie podziemne w profilu w Rumi jest wysokie i przekracza 90%. Udział odpływu gruntowego zmniejsza się na obszarze Pradoliny Kaszubskiej do 50%.

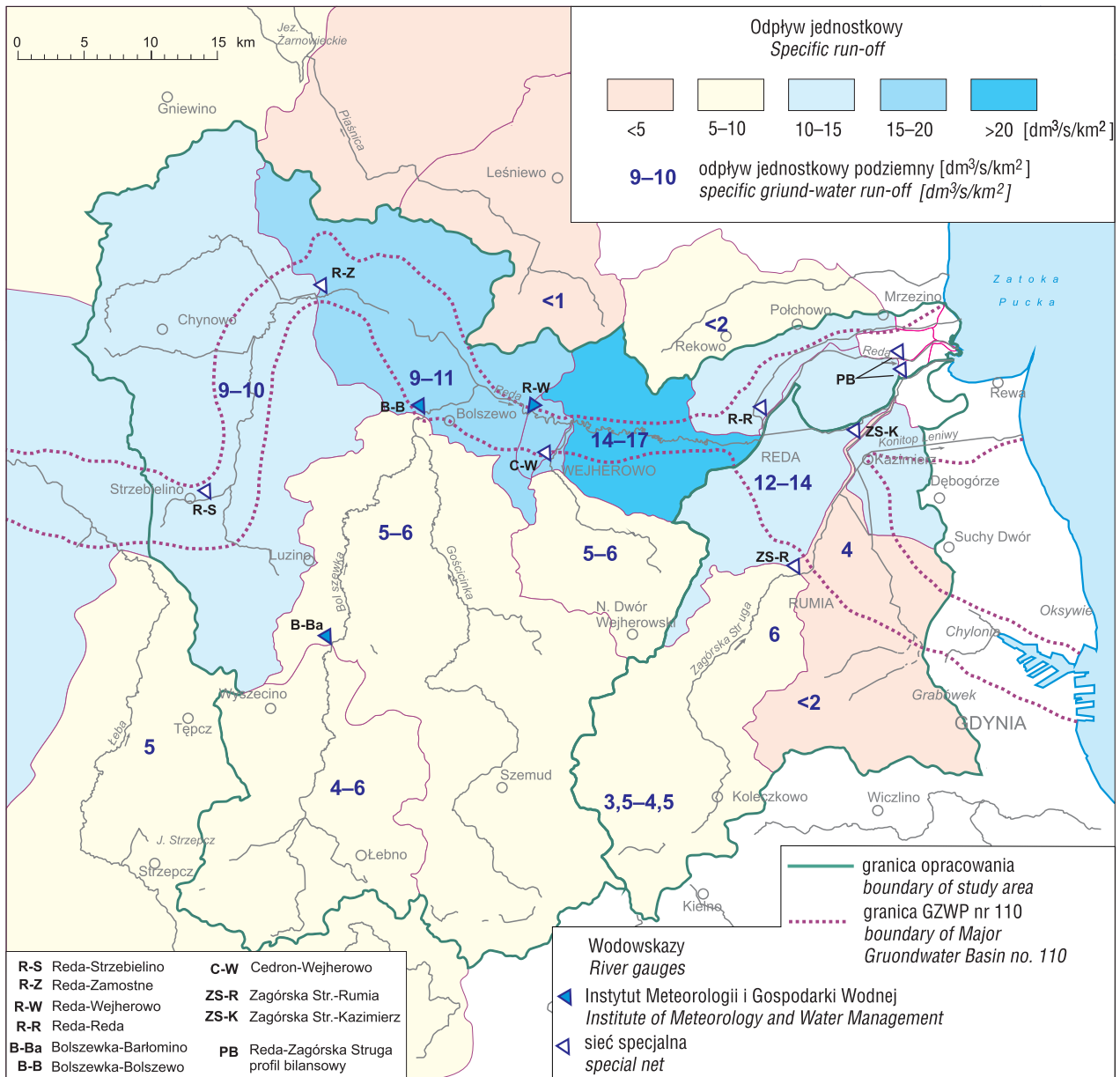
Struktura odpływu rzeczno-gruntowego oraz jego rozkład przestrzenny wskazuje na zasadnicze cechy obiegu wód podziemnych na omawianym obszarze. Dominującą bazę drenażu wód stanowią pradoliny wraz z systemem wód powierzchniowych. Wyróżnia się środkowa część Redy, ponadto rzeka jest zasilana wodami spoza granic zlewni, zwłaszcza ze zlewni Piaśnicy. Wysoki odpływ gruntowy na obszarze pradolin jest również efektem dodatkowego zasilania Redy wodami z głębszych poziomów wodonośnych. Na wysoczyznach morenowych, okalających pradoliny, zachodzi proces zasilania wód podziemnych, który intensyfikują liczne obszary chłonne (bezodpływowe), zwłaszcza na Pojezierzu Kaszubskim. W strefie krawędziowej Pradoliny Redy i Pradoliny Kaszubskiej oraz na obszarze stożków napływowych zachodzi infiltrowanie wód z cieków powierzchniowych w głąb systemu wodonośnego. W rejonach intensywnego poboru wód podziemnych (Pradolina Kaszubska) wody powierzchniowe zasilają ujmowane warstwy wodonośne.

## BILANS WÓD PODZIEMNYCH

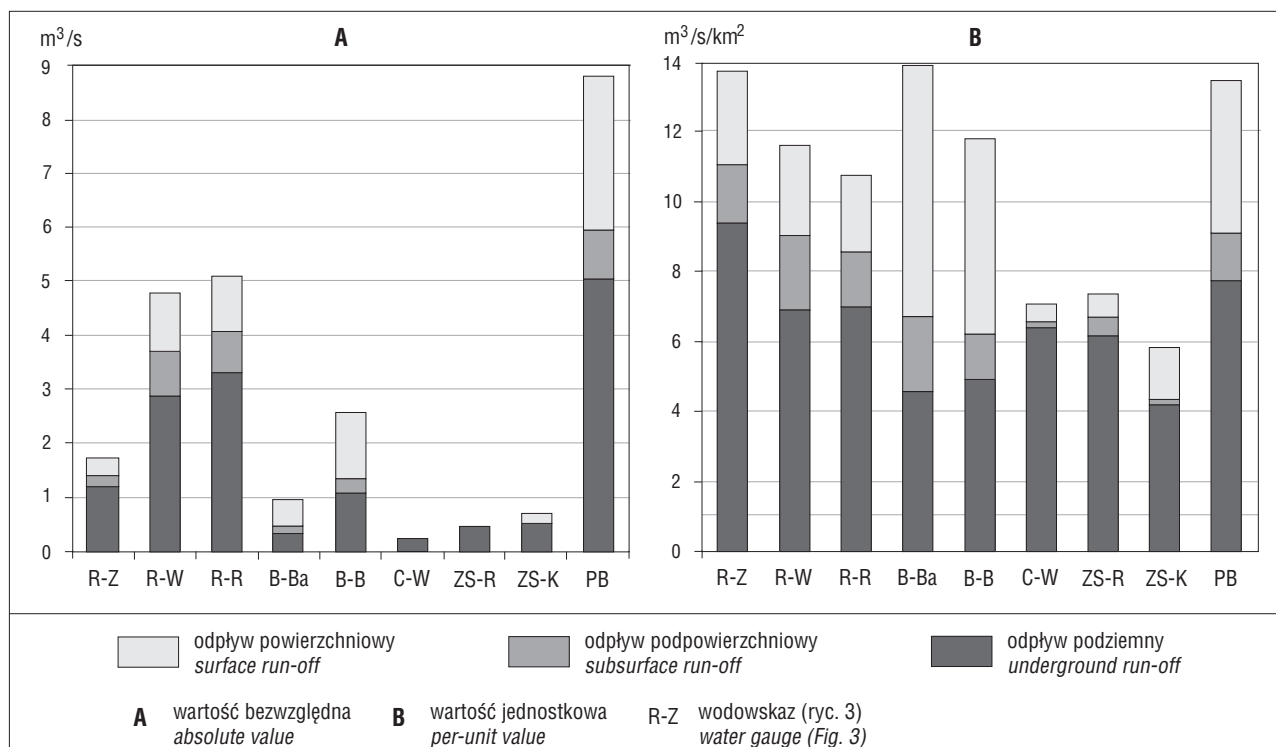
Bilans oraz system krążenia wód podziemnych zweryfikowano w procesie badań modelowych. W tym celu dokonano schematyzacji warunków hydrogeologicznych. W całym kompleksie wodonośnym wyodrębniono osiem warstw modelowych. Pięć z nich obejmuje następujące poziomy wodonośne: I – wody gruntowe, II – pierwszy poziom międzymorenowy, IV – drugi poziom międzymorenowy, miejscami w kontakcie z wodami miocenu, VI – oligoceński poziom wodonośny, VIII – kredowe piętro wodonośne. Natomiast kompleksy utworów półprzepuszczalnych, rozdzielających poziomy wodonośne, dotyczyły warstw modelowych III, V, VII. Granice badań



Ryc. 2. Skład litologiczny utworów powierzchniowych na badanym obszarze (do głębokości 2 m)  
Fig. 2. Petrographic composition of the surface sediment on the investigated area up to depth of 2 m



Ryc. 3. Wartość odpływu jednostkowego  
Fig. 3. Value of the specific run-off



**Ryc. 4.** Odpływ podziemny na badanym obszarze zlewni wg metody Killego (1970)  
**Fig. 4.** Underground run-off from the area under study according to Kille method (1970)

modelowych poprowadzono wzdłuż linii prądu, obejmujących obszar spływu wód podziemnych w czwartorzędowym piętrze wodonośnym do zlewni Redy i Zagórskiej Strugi. Wykraczały one znacznie poza granice topograficzne tych zlewni (938,4 km<sup>2</sup>).

System krążenia wód podziemnych analizowano na podstawie wydzielonych jednostek bilansowych, które zostały powiązane ze strefami hydrodynamicznymi (ryc. 5). Obszary zasilania stanowią Pojezierze Kaszubskie i Wysoczyzna Żarnowiecka, natomiast w strefie drenażu występują dwie jednostki – Pradolina Redy-Łeby oraz Pradolina Kaszubska. Najmniejszą jednostką bilansową jest Kępa Oksywska, która w systemie krążenia spełnia rolę podrzędną.

Całkowita ilość wód podziemnych, która bierze udział w przepływie całego systemu wodonośnego zlewni Redy i Zagórskiej Strugi wynosi 520 605 m<sup>3</sup>/d. Głównym czynnikiem kształtującym zasoby wodne jest zasilanie infiltracyjne – 65% sumy bilansowej. Istotną rolę stanowią dopływy z sąsiednich obszarów (ok. 24%), szczególnie z Pojezierza Kaszubskiego (17%). Dopływ z Wysoczyzny Żarnowieckiej jest dwukrotnie mniejszy. Infiltracja z wód powierzchniowych wynosi ok. 11%.

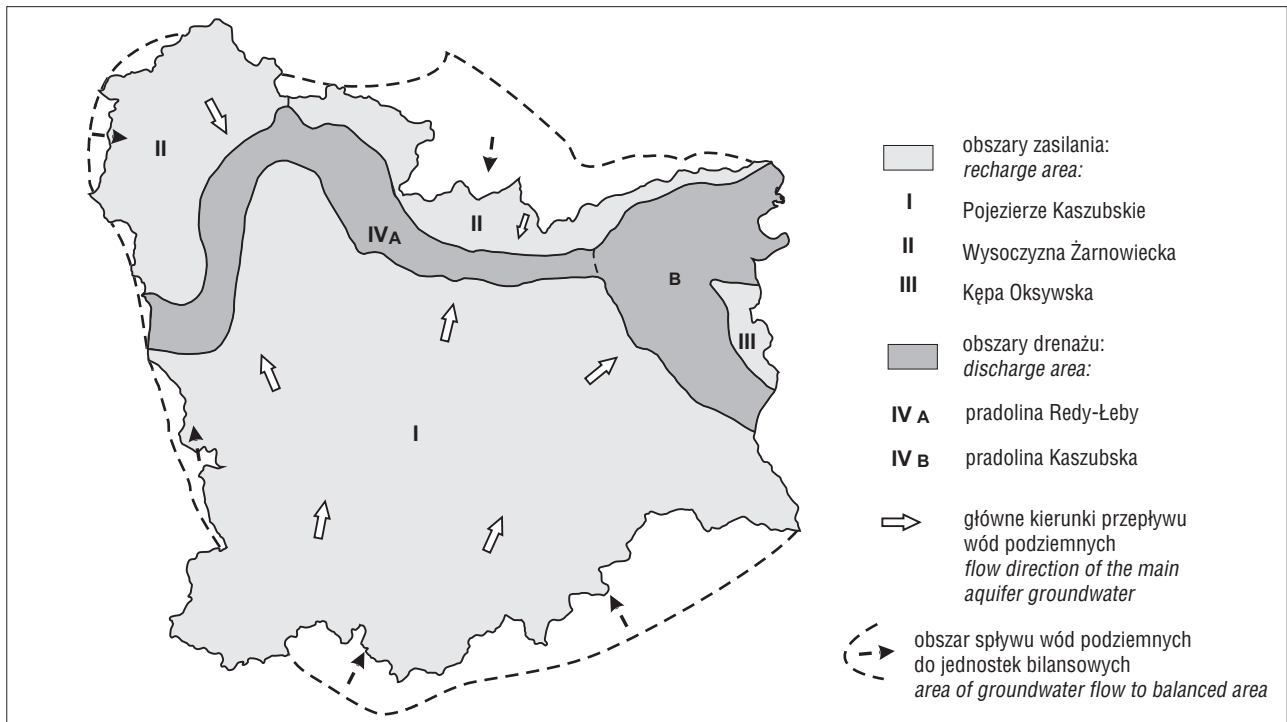
Po stronie rozchodów równania bilansowego dominuje drenaż przez rzeki i kanały – 75%, odpływ do innych zlewni – prawie 16% oraz eksploatacja wód podziemnych – 9%. Odpływ w kierunku Zatoki Puckiej (0,3%) jest podrzędny.

W wewnętrznej strukturze przychodów w poszczególnych poziomach wodonośnych wyróżniają się dwa przeciwstawne strumienie filtracyjne. Pierwszy z nich jest skierowany w głąb systemu wodonośnego i przeważa na obszarach zasilania. Drugi strumień stanowi dopływ z głębszych poziomów wodonośnych, zwłaszcza w obrębie pradolin i dolin rzecznych. W oligoceńskim poziomie

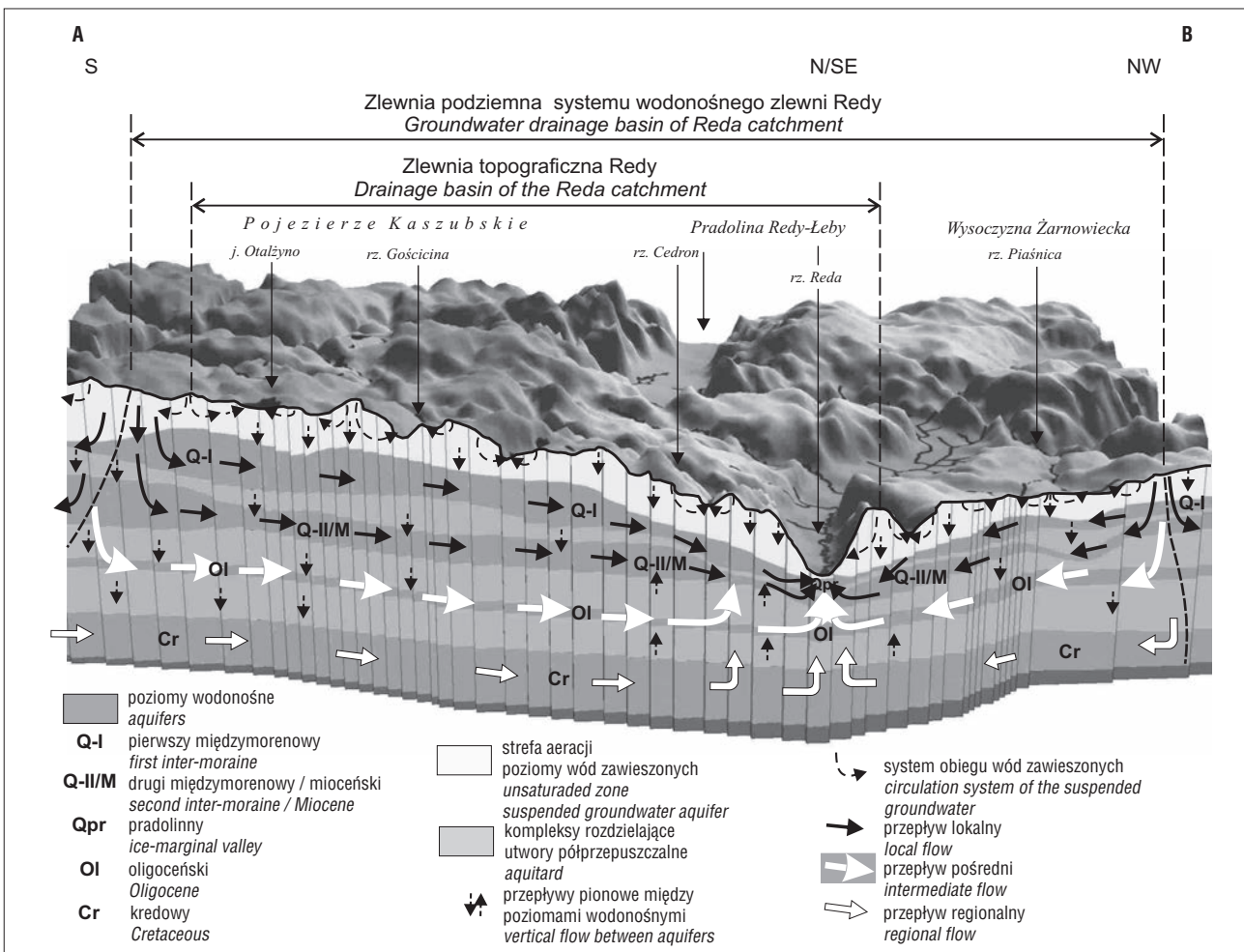
wodonośnym (VI warstwa modelowa) wartości obu strumieni ulegają wyrównaniu. W każdym poziomie wodonośnym (warstwa II, IV, VI i VIII) jest istotny dopływ i odpływ boczny. Znaczny udział składników wymiany między poszczególnymi warstwami wskazuje na intensywną wymianę pionową wód całego systemu wodonośnego. W najpłytszych warstwach modelowych, obrazujących strop systemu wodonośnego, najważniejszą rolę odgrywa infiltracja wód opadowych oraz drenaż rzek.

Infiltracja opadów atmosferycznych w granicach zlewni Redy i Zagórskiej Strugi wynosi 340 790 m<sup>3</sup>/d, co stanowił ok. 23% opadów atmosferycznych (przy uwzględnieniu poprawki na deszczomierz). Na wysoką wartość tego parametru wpływ ma dodatkowe zasilanie systemu wodonośnego na obszarze Pojezierza Kaszubskiego, które jest związane z przesączaniem wód powierzchniowych (cieki i liczne drobne „oczka”) oraz występującymi obszarami bezodpływowymi (chłonnymi), intensyfikującymi proces infiltracji wód opadowych. Na obszarach zasilania natężenie strumienia wód podziemnych skierowanego w głąb systemu wodonośnego ulega radykalnemu ograniczeniu między IV i VI warstwą modelową. Do warstwy VI (poziom oligoceński) przesącza się tylko 19% wód infiltrujących z powierzchni terenu. Przyczynia się do tego kompleks utworów słabo przepuszczalnych, występujący w stropie poziomu oligoceńskiego. Do piętra kredowego (VIII warstwa) dociera jeszcze mniej wód – ok. 9%. Z tego powodu należy uznać, że udział oligoceńskiego i kredowego poziomu wodonośnego w całym bilansie obiegu wody jest podrzędny.

Na szczególną uwagę zasługują Pradolina Redy-Łeby i Pradolina Kaszubska, stanowiące regionalną strefę drenażu wód (ryc. 6). Suma dopływu wód strumieni filtracyjnych, zasilających ten obszar bilansowy, wynosi 287 tys. m<sup>3</sup>/d, co



Ryc. 5. Jednostki bilansowe na obszarze zlewni Redy i Zagórskiej Strugi  
 Fig. 5. Balanced area in the Reda and Zagórska Struga catchment



Ryc. 6. System krążenia wód podziemnych na obszarze zlewni Redy  
 Fig. 6. Groundwater circulation system on the Reda catchment area

**Tab. 1.** Zasoby odnawialne wód podziemnych [m<sup>3</sup>/d]  
**Table 1.** Renewable resources of groundwater [m<sup>3</sup>/d]

| Obszary bilansowe<br><i>Balance areas</i> |                                              | Metody obliczeniowe<br><i>Computational methods</i> |                                         |                                              |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|
| nazwa<br><i>name</i>                      | powierzchnia<br><i>area [km<sup>2</sup>]</i> | infiltracyjna<br><i>infiltration</i>                | hydrologiczna<br><i>hydrogeological</i> | badania modelowych<br><i>numerical model</i> |
| Pojezierze Kaszubskie                     | 419,05                                       | 229 244                                             | 217 235                                 | 220 000                                      |
| Wysoczyzna Żarnowiecka                    | 105,00                                       | 48 793                                              | 22 680                                  | 50 100                                       |
| Kępa Oksywska                             | 4,45                                         | 1 069                                               | –                                       | 2 700                                        |
| Pradolina Redy-Leby                       | 68,25                                        | 33 035                                              | 116 418                                 | 145 600                                      |
| Pradolina Kaszubska                       | 67,40                                        | 28 649                                              | 114 204                                 | 102 200                                      |
| Razem: zlewnia Redy i Zagórskiej Strugi   | 664,15                                       | 340 790                                             | 470 537                                 | 520 605                                      |

stanowi ok. 55% wód biorących udział w krążeniu całego systemu wodonośnego zlewni Redy i Zagórskiej Strugi. Najważniejszym składnikiem bilansowym, kształtującym zasoby pradolin, jest dopływ boczny – ok. 69% sumy bilansowej. Ponadto bezpośrednie zasilanie infiltracją wód opadowych wynosi ok. 21%, a naturalne i wzbudzone zasilanie ze zbiorników wód powierzchniowych ok. 10%. Główny strumień, zasilający lateralnie obszar jednostki bilansowej jest kształtowany na Pojezierzu Kaszubskim (ok. 41% sumy bilansowej). Wysoczyzna Żarnowiecka stanowi drugi obszar zasilania, z którego dopływa ok. 28% wód zasilających pradolinę.

W strefie pradolin zachodzi intensywny drenaż wód podziemnych przez system hydrograficzny Redy i Zagórskiej Strugi oraz gęstą sieć rowów melioracyjnych w Pradolinie Kaszubskiej – 84% sumy bilansowej. Około 12% wód jest eksploatowanych przez ujęcia komunalne i zakładowe, a tylko 0,5% wód odpływa z Pradoliny Kaszubskiej do Zatoki Puckiej.

## WNIOSKI

1. Ustalenia prac badawczych wskazują na niezgodność granic topograficznych zlewni Redy i Zagórskiej Strugi z systemem wód podziemnych. Łączny obszar alimentacji wód obejmuje ok. 765 km<sup>2</sup>, z czego 135 km<sup>2</sup> znajduje się poza granicami badanych zlewni. Nie jest to jednak system zamknięty. Wody z poziomów oligoceńskiego i kredowego są zasilane również dopływem lateralnym spoza przyjętych granic systemu wodonośnego, przede wszystkim z centralnej części Pojezierza Kaszubskiego.

2. Cały kompleks wodonośny (strefa saturacji) w granicach zlewni Redy i Zagórskiej Strugi ograniczają rzędne od 165 do –260 m n.p.m. Objętość bryły skalnej, tak określonego systemu wodonośnego, wynosi ok. 200,5 km<sup>3</sup>. Dominują w niej osady dobrze przepuszczalne – ok. 65% objętości. Zasoby statyczne całej przestrzeni filtracyjnej wynoszą ok. 23,3 km<sup>3</sup>.

3. Wielkość zasobów odnawialnych wstępnie oceniono na podstawie metody infiltracyjnej i hydrologicznej. Ostatecznie zweryfikowano je o wyniki badań modelowych, które wynoszą 520 605 m<sup>3</sup>/d. Według metody hydrologicznej zasoby odnawialne omawianych zlewni są wyższe o prawie 130 000 m<sup>3</sup>/d od zasobów obliczonych wg metody infiltracyjnej. Różnica ta wynika z tego, że metoda infiltracyjna uwzględnia obszar zasilania tylko w granicach zlewni, natomiast przy zastosowaniu metody hydrologicznej zasoby odnawialne obejmują również wody pochodzące spoza granic zlewni (zasilanie lateralne). Przy uwzględnieniu systemu krążenia wód podziemnych dokonano

redyspozycji zasobów odnawialnych. Prawie 248 tys. m<sup>3</sup>/d wód przypada na pradolinny poziom wodonośny w obrębie GZWP nr 110, a 220 tys. m<sup>3</sup>/d na poziomy wodonośny występujące na Pojezierzu Kaszubskim. Z uwagi na niewielką powierzchnię Wysoczyzny Żarnowieckiej i tranzytowy charakter tego obszaru zasoby odnawialne zmniejszono do 50 tys. m<sup>3</sup>/d (tab. 1).

4. O wysokiej dynamice systemu krążenia wód podziemnych w zlewni Redy i Zagórskiej Strugi świadczy m.in. duże tempo wymiany wód. Najwyższa odnawialność, poniżej 30 lat, cechuje podsystemy pradolinne oraz podsystemy wód zawieszonych z uwagi na wysokie natężenie strumieni zasilających, płytkie występowanie oraz wysoką wartość infiltracji bezpośredniej. Z tempem wymiany wód koreluje czas przebywania w systemie wodonośnym. Najniższy jest w podsystemie wód zawieszonych i wynosi od kilku miesięcy do kilkunastu lat oraz w podsystemie czwartorzędowo-mioceńskim – od kilkunastu do 200 lat. Najdłużej przebywają wody w podsystemie kredowym – do kilku tysięcy lat.

5. Wyniki uzyskane w trakcie realizacji zadania badawczego oraz sformułowane wnioski mogą stanowić podstawę do rozwiązywania wielu zagadnień praktycznych, np.: dokumentowania zasobów dyspozycyjnych zlewni pojeziernych i przymorskich, weryfikacji zasobów eksploatacyjnych oraz stref ochronnych ujęć, modelowania migracji zanieczyszczeń, modyfikacji dotychczasowego sposobu poboru wód podziemnych oraz opracowania scenariuszy eksploatacji ujęć i studni w przypadku szczególnych zagrożeń.

6. Metoda modelowania trójwymiarowej przestrzeni filtracyjnej okazała się skutecznym narzędziem rozpoznania parametrów hydrogeologicznych systemu krążenia wód podziemnych. Jej zastosowanie wymaga jednak bardzo dobrego rozpoznania budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych.

## LITERATURA

- BALICKI H., BUTRYMOWICZ K. & FRIEDRICH M. 1981 — Analiza zasobów wód i wskaźników bilansu wodnego w zlewniach rzek Przymorza Zachodniego i dorzecza Dolnej Wisły za lata 1951–1975. Wiadomości IMGW, 7 (1/2): 19–29.
- CHOMICZ K. 1976 — Opady rzeczywiste w Polsce (1931–1960). Prz. Geofiz., 29 (1): 19–25.
- FRIEDRICH A., OSTROWSKI J. & RENERT K. 1984 — Charakterystyka hydrologiczna zlewni rzeki Redy i Zagórskiej Strugi. NOT Słupsk.
- HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K. & RODZIOCH A. 2014 — Metodyka określania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w obszarach bilansowych z uwzględnieniem potrzeb jednolitych bilansów wodno-gospodarczych. MŚ, Warszawa.

- KICIŃSKI T. 1963 — Zastosowanie metody Natermana do opracowania bilansu wodnego na przykładzie rzeki Pilicy w Przedborzu. Pr. Stud. Kom. Inż. i Gospod. Wod., 6: 139–155.
- KICIŃSKI T. 1970 — Odpływ wód gruntowych ze zlewni Wisły po Zawichost. Pr. Stud. Kom. Inż. i Gospod. Wod. Surow., 10: 151–219.
- KILLE K. 1970 — Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Zeitschrift Deutch. Geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem.: 89–95.
- KOZERSKI B. 1990 — Wody podziemne okolic Gdańska. Prz. Geol., 38 (5/6): 234–239.
- LIDZBARSKI M. 2007 — Systemy krążenia wód podziemnych w zlewni Redy i Zagórskiej Strugi [pr. doktor.]. Narod. Arch. PIG-PIB, Warszawa.
- NATHER M. i in. 1996 — Charakterystyka ogólna fizjograficzna i klimatyczna oraz warunki przyrodnicze i naturalne woj. gdańskiego [maszynopis]. Biuro Projektów i Doradztwa Technicznego „Hydroprojekt”, Gdańsk.
- PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1990 — Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- PIKIES R. & ZALESZKIEWICZ R. 1997 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski z objaśnieniami w skali 1 : 50 000, ark. Rumia. Narod. Arch. PIG-PIB, Warszawa.
- SKOMPSKI S. 1997 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Puck. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- SKOMPSKI S. 2001 — Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1 : 50 000, ark. Puck. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WUNDT W. 1953 — Gewässerkunde. Springer, Berlin, Heidelberg.