

## OCENA WPŁYWU NIEZGODNOŚCI POŁOŻENIA DZIAŁÓW WÓD PODZIEMNYCH I POWIERZCHNIOWYCH NA WIELKOŚĆ OBLICZONYCH ZASOBÓW ODNAWIALNYCH NA PRZYKŁADZIE OBSZARU BILANSOWEGO P-IX W REGIONIE WODNYM WARTY

### ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF DISCREPANCY OF THE LOCATION OF GROUNDWATER AND SURFACE WATERSHEDS ON THE QUANTITY OF CALCULATED RENEWABLE RESOURCES, EXEMPLIFIED BY THE P-IX BALANCE BASIN IN THE WARTA WATER REGION

ZBIGNIEW WIETESKA<sup>1</sup>, ANNA DOBKOWSKA<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W artykule przedstawiono rezultaty badań odnawialności wód podziemnych systemu wodonośnego, który charakteryzuje znaczna niezgodność położenia wododziałów wód powierzchniowych i podziemnych. Rozpoznanie warunków hydrogeologicznych i hydrologicznych oraz bilans zasobów wód podziemnych sporządzono dla fragmentu obszaru bilansowego P-IX (Warta od Proсны do Kanału Mosińskiego) usytuowanego na południe od rzeki Warty. Obliczenia bilansowe wykonano metodą modelowania matematycznego oraz hydrologiczną. Ponieważ w metodzie hydrologicznej stanowiącej powszechnie stosowaną metodę kontrolną w obliczeniach bilansowych zakłada się, że linie wododziałów wód powierzchniowych i podziemnych są tożsame, porównanie wyników obliczeń bilansowych uzyskanych obiema metodami wymagało przeprowadzenia oceny ich zgodności. Dokonano tego poprzez obliczenie różnicy między wielkościami zasobów odnawialnych wyznaczonych dwoma wariantami metody hydrologicznej. W pierwszym (standardowym) zasoby odnawialne określono na podstawie danych z profili wodowskazowych i hydrometrycznych zamykających zlewnie dopływów Warty drenujących analizowaną jednostkę bilansową. W drugim (rozszerzonym) obliczono na podstawie danych z posterunków kontrolujących zlewnię różnicową Warty. Powiększenie bilansowanej jednostki do granic zlewni różnicowej Warty było zgodne z zasadą, że wiarygodność obliczeń zasobów wód podziemnych rośnie proporcjonalnie do powierzchni bilansowanej zlewni oraz znaczenia jej strefy drenażu w krążeniu regionalnym (Toth, 1963). Wielkość zasobów odnawialnych określona standardowym i rozszerzonym wariantem metody hydrologicznej wyniosła odpowiednio: 107,1 tys. i 184,0 tys. m<sup>3</sup>/d. Różnica stanowi 72% wartości wyznaczonej metodą standardową. W artykule analizowano ponadto zmienny, w przestrzeni i czasie, charakter związku hydraulicznego wód powierzchniowych i podziemnych oraz wpływ tej zmienności na wiarygodność obliczeń bilansowych, bazujących na stacjonarnych obserwacjach przepływu wód powierzchniowych.

**Słowa kluczowe:** metoda hydrologiczna, modelowanie hydrogeologiczne, kaptaż zasobów wód podziemnych, odpływ podziemny.

**Abstract.** The article presents the results of research on the renewal of a hydrogeological system that is characterized by a significant discrepancy of the location of groundwater and surface watersheds. The area of the hydrological and hydrogeological studies is part of the P-IX balance region (Warta River from the Proсны to the Mosiński Canal) located south of the Warta River. The evaluation of groundwater renewability has been made using a hydrological method and mathematical modelling. When using the hydrological method, which is a commonly used control method for water balance calculations, it is assumed that the surface and groundwater watersheds are identical. Comparison of the results of water balance calculations obtained with both methods required the assessment of the compatibility of the groundwater catchment and morphological boundaries. This was done by calculating the difference between the quantities of renewable resources determined by two variants of the hydrological method. In the first (standard) variant, renewable resources were determined based on data from water-gauge and hydrometric profiles closing the catchments of the Warta tributaries draining the analyzed water-management regions. In the second (extended) method, they were determined based on data from water gauges controlling the Warta sub-basin. Enlargement of the balanced unit as far as the boundaries of the Warta basin was consistent with the principle that the reliability of calculations of groundwater resources increases proportionally to the analyzed catchment area and the significance of its drainage zone in the regional groundwater circulation (Toth, 1963). The quantity of renewable resources determined by the standard and extended variants

<sup>1</sup> SEGI-AT Sp. z o.o., ul. Korkowa 24A, 04-502 Warszawa; e-mail: zbyszek.wieteska@segi.pl, anna.dobkowska@segi.pl.

of the hydrological method amounted to 107,100 m<sup>3</sup>/day and 184,000 m<sup>3</sup>/day, respectively. The difference is 72% of the value determined using the standard method. The article also provides an analysis of the spatial and temporal variability of the nature of the hydraulic relationship between surface water and groundwater, and the influence of this variability on the reliability of water balance calculations, based on stationary observations of surface water flow.

**Key words:** hydrological method, modelling, groundwater resources capture, groundwater runoff.

## WSTĘP

Zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (RMŚ, 2016) wielkości zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych, ustalone metodą modelowania matematycznego, należy poddać ocenie metodą kontrolną. Najczęściej stosowaną i rekomendowaną przed Metodykę (Herbich i in., 2013), techniką służącą do weryfikacji obliczeń zasobowych jest metoda hydrologiczna, w której jako granicę systemu wodonośnego przyjmuje się wododział zlewni hydrograficznej. Określenie wielkości zasobów odnawialnych metodą hydrologiczną oraz metodą modelowania matematycznego wymaga zastosowania danych pochodzących z posterunków wodowskazowych. Na wiarygodność uzyskanych wyników obliczeń wpływa gęstość sieci wodowskazowej funkcjonującej w obrębie analizowanej jednostki bilansowej, długość ciągów obserwacyjnych oraz znaczenie kontrolowanego cieków w regionalnym systemie krążenia wód podziemnych. Porównanie rezultatów obliczeń wykonanych metodą modelowania matematycznego i metodą hydrologiczną wymaga przeprowadzenia oceny zgodności położenia wododziałów zlewni podziemnej i powierzchniowej. Im jest ona wyższa tym mniejsza powinna być rozbieżność pomiędzy wielkościami zasobów odnawialnych oszacowanych wymienionymi metodami.

Ocena zgodności położenia działów wód powierzchniowych i wododziałów poszczególnych poziomów wodonośnych jest możliwa do wykonania poprzez analizę przebiegu hydroizohips. Zazwyczaj jednak teren objęty pomiarami zwierciadła wód podziemnych jest ograniczony do zlewni hydrograficznej bądź do granic obszaru objętego badaniami modelowymi. Interpretację struktury pola hydrodynamicznego utrudnia ponadto struktura czwartorzędowych poziomów wodonośnych, którą, w przypadku omawianej jednostki bilansowej, cechuje nieciągły i wyspowy charakter.

W artykule zaproponowano metodę oceny wpływu niezgodności położenia działów wód podziemnych i powierzchniowych na obliczoną wielkość zasobów odnawialnych. Ocenę, która ma charakter ilościowy, oparto jedynie na analizie danych hydrologicznych. Dokonano tego poprzez obliczenie różnicy między wielkościami zasobów odnawialnych wyznaczonych dwoma wariantami metody hydrologicznej. W pierwszym (standardowym) zasoby odnawialne określono, bazując na danych z profili wodowskazowych i hydrometrycznych zamykających zlewnie dopływów Warty drenujących analizowaną jednostkę bilansową. W drugim (rozszerzonym) zostały obliczone z zastosowaniem danych z posterunków kontrolu-

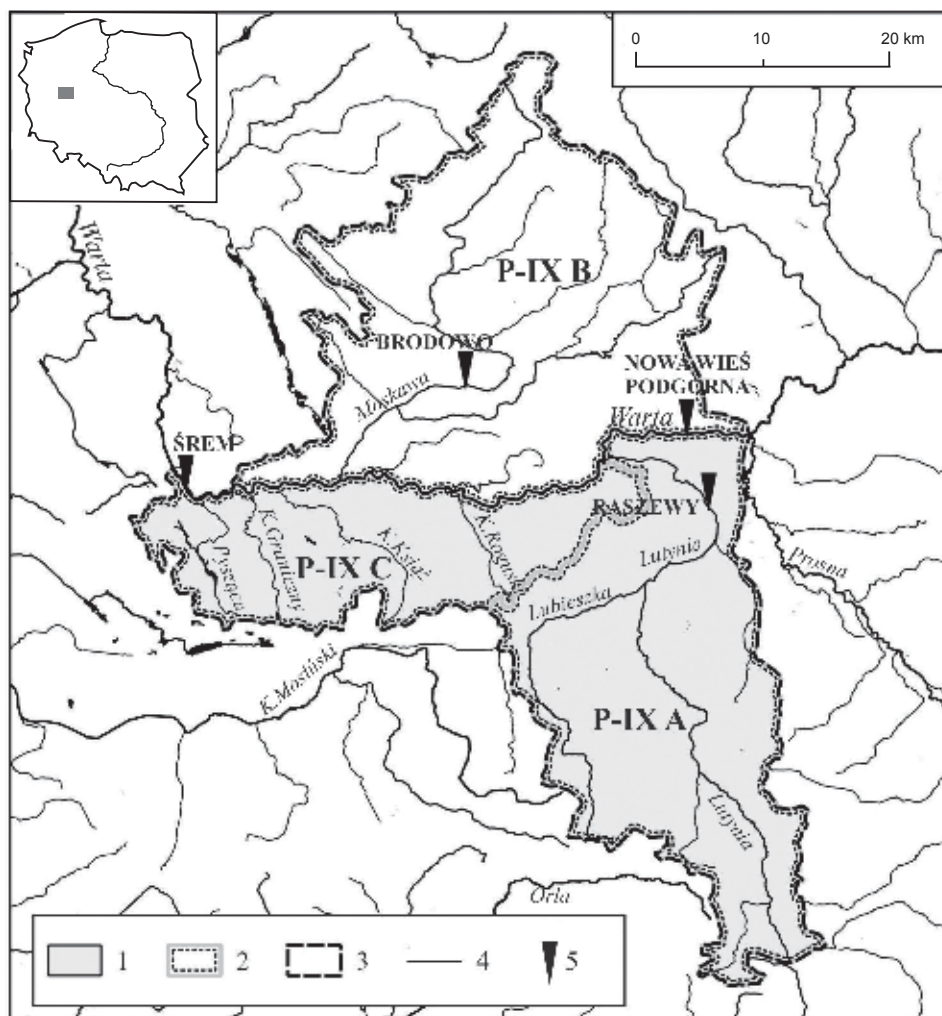
jących zlewnię różnicową Warty. Powiększenie obszaru bilansowanej jednostki do zlewni różnicowej Warty pozwoliło uwzględnić dopływ do rzeki pochodzący z regionalnego systemu krążenia oraz formowany w jej bezpośredniej zlewni. Było ponadto zgodne z zasadą mówiącą, że wiarygodność obliczeń zasobów wód podziemnych rośnie proporcjonalnie do powierzchni bilansowanej zlewni oraz znaczenia jej strefy drenażu w krążeniu regionalnym (Toth, 1963).

Należy podkreślić, że wyniki obliczeń hydrologicznych służą nie tylko do weryfikacji rezultatów badań modelowych. Są również niezbędne podczas tarowania modelu (Dąbrowski i in., 2011). Porównanie rzeczywistych wydatków drenaży cieków i zbiorników wód powierzchniowych z ustalonymi na modelu jest jednym z kluczowych etapów kalibracji modeli regionalnych. Wielkość odpływu podziemnego ustalona metodą hydrologiczną służy również wyznaczeniu warunków zasilania modelowanej struktury wodonośnej (Herbich i in., 2013).

## CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Mimo gęstej sieci obserwacyjnej funkcjonującej w Polsce odpływ z wielu rejonów wodnogospodarczych nie jest kontrolowany przekrojem wodowskazowym. Brak odpowiednich ciągów obserwacyjnych stanów wód powierzchniowych dotyczy głównie małych rzek nizinnych będących bezpośrednimi dopływami odbiorników stanowiących regionalne bazy drenażu. Przykładem tak usytuowanej jednostki bilansowej jest fragment obszaru P-IX (Warta od Proсны do Kanału Mosińskiego) położony na południe od Warty (Paczyński, Sadurski, 2007). Jednostka zajmuje powierzchnię 924 km<sup>2</sup>. W jej obrębie wyznaczono dwa rejonu wodnogospodarcze: P-IX A (Warta–Lutynia) obejmujący 594 km<sup>2</sup> oraz P-IX C (Warta od ujścia Lutyni do Kanału Mosińskiego) o powierzchni 330 km<sup>2</sup> (fig. 1).

Wymienione rejonu są odwadniane przez dopływy Warty: Lutynię, Kanał Książ, Kanał Graniczny, Kanał Roguski, Pyszącą oraz Odczepichę. Najważniejszym spośród wymienionych jest Lutynia licząca 62,7 km długości, która wraz ze swoim największym dopływem – Lubieszką, odwadnia zlewnię o powierzchni 561,3 km<sup>2</sup>, tj. 61% całkowitej powierzchni omawianego obszaru. Lutynia drekuje północny fragment Wysoczyzny Kaliskiej. W środkowym odcinku opływa od wschodu Wał Żerkowski wyznaczając zachodnią granicę Równiny Rychwalskiej. Dolny odcinek rzeki rozcina taras Warty usytuowany w obrębie Kotliny Śremskiej. Pozostałe ciek (z wyjątkiem Odczepichy) płyną południkowo przez Wał Żerkowski.



**Fig. 1. Położenie omawianego fragmentu obszaru bilansowego P-IX**

1 – obszar badań; 2 – granice rejonów wodnogospodarczych; 3 – wododział zlewni różnicowej Warty; 4 – rzeki; 5 – wodowskazy

Location of the discussed fragment of the P-IX balanced region

1 – study area; 2 – boundaries of water management regions; 3 – Warta sub-basin boundary; 4 – rivers; 5 – river gauges

Strukturę hydrogeologiczną buduje złożony układ warstw przepuszczalnych i słabo przepuszczalnych. Zwykle wody podziemne rozpoznano w utworach kenozoicznych i mezozoicznych. W obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego wyróżniono trzy poziomy wodonośne: przypowierzchniowy, międzyglinowy (górny, środkowy i dolny) oraz podglinowy. Niemal na całym obszarze – wyjątek stanowi GZWP nr 150 Pradolina Warszawa–Berlin – głównym użytkowym poziomem wodonośnym jest poziom mioceński (Paczyński, Sadurski, 2007). Jurajskie piętro wodonośne, które w obrębie omawianego obszaru jest eksploatowane tylko przez jedną studnię, budują wapienie i margle jury górnej (Dobkowska, 2017).

Przyjęty w badaniach modelowych schemat hydrogeologiczny zakładał trzy warstwy wodonośne (I, III i V) rozdzielone dwiema warstwami słabo przepuszczalnymi (II i IV). Warstwa nr I odzwierciedlała przypowierzchniowy

poziom wodonośny związany z utworami pradoliny warszawsko-berlińskiej oraz osadami dolinnymi oraz sandrowymi rozpoznany w obrębie wysoczyzny. Warstwa nr III reprezentowała międzyglinowy oraz podglinowy poziom wodonośny. Neogeński poziom wodonośny odzwierciedlała warstwa nr V (fig. 2). Badaniami modelowymi objęto powierzchnię 1451 km<sup>2</sup>.

Cieki odwadniające omawiane rejony wodnogospodarcze stanowią fragment układu hydrograficznego, w którym dominującą rolę odgrywa Warta oraz jej główne dopływy: Proсна oraz Kanał Mosiński. Dysproporcja średnich przepływów SSQ w wieloleciu 1980–1991 (okres funkcjonowania profili w wieloleciu rekomendowanym przez Metodykę; Herbich, 2013) między Lutynią i Proszą mieści się w przedziale 1–8 m<sup>3</sup>/s (1,98 m<sup>3</sup>/s dla Lutyni i 16,0 m<sup>3</sup>/s dla Prośni). Przepływy średnie Warty były we wspomnianym wieloleciu

wyższe niż Lutyni ponad 45-krotnie. Tak znaczna różnica wielkości przepływów oraz niekorzystne usytuowanie koryta Lutyni względem konkurencyjnych baz drenażu może wskazywać na niezgodność położenia wododziału wód podziemnych i powierzchniowych. Proсна i Warta prawdopodobnie przejmują część zasobów formowanych w obrębie zlewni hydrograficznej Lutyni i sąsiednich, lewobrzeżnych dopływów Warty.

Wyznaczona na podstawie badań modelowych wartość współczynnika określającego stosunek zasilania podziemnego dolinnej strefy drenażowej do wielkości infiltracji efektywnej w obszarze systemu zlewniowego wyniosła 1,18. Oznacza to około 18-procentowy udział układu krążenia regionalnego w bilansie analizowanej zlewni. Należy zauważyć, że przy obliczaniu współczynnika uwzględniono drenaż Warty stanowiącej północną granicę bilansowanego systemu wodonośnego. Dopływ i odpływ przez granice bilansowanej zlewni wyniósł odpowiednio: 77,4 tys. i 15,6 tys. m<sup>3</sup>/d. Wielkość wymiany wód poprzez boczne granice omawianego obszaru była równa 61,8 tys. m<sup>3</sup>/d, co stanowi niemal trzecią część wartości zasobów odnawialnych ustalonej badaniami modelowymi.

Wymienione argumenty oraz wartości składowych bilansu pozwoliły potwierdzić, że Lutynia oraz pozostałe dopływy Warty usytuowane w obrębie dokumentowanego obszaru stanowią bazę drenażu o znaczeniu lokalnym. Ich strefą zasilania są najpłycej położone poziomy wodonośne. Tylko górny odcinek Lutyni, oddalony od konkurencyjnych baz drenażu oraz charakteryzujący się głęboką doliną, drenuje głębiej położone poziomy wodonośne. Potwierdzają to obserwowane w tym rejonie źródła korytowe o znacznych

wydajnościach oraz wysoki, przekraczający 3,5 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> moduł odpływu podziemnego.

### METODA OCENY WPLYWU NIEZGODNOŚCI POŁOŻENIA DZIAŁÓW WÓD PODZIEMNYCH I POWIERZCHNIOWYCH NA OBLICZONĄ WIELKOŚĆ ZASOBÓW ODNAWIALNYCH

Ocena wpływu niezgodności położenia wododziałów powierzchniowych i podziemnych na wielkość oszacowanych zasobów odnawialnych wykonana w niniejszym artykule ma charakter ilościowy i została wykonana na podstawie danych pochodzących z posterunków wodowskazowych oraz profili hydrometrycznych. Zadanie zrealizowano w trzech etapach:

W etapie pierwszym wykonano obliczenia hydrologiczne, zakładając pełną zgodność przebiegu działów wód podziemnych i powierzchniowych. Przyjęto, że odpływ podziemny rejestrowany przez profil wodowskazowy w Raszewach na Lutyni jest tożsamy z całkowitymi zasobami odnawialnymi kontrolowanej zlewni. Ze względu na brak posterunków wodowskazowych w obrębie rejonu wodnogospodarczego P-IX A, zasoby odnawialne wyznaczono dla tej jednostki bilansowej metodą analogii hydrologicznej, uwzględniając rezultaty czterech serii pomiarów hydrometrycznych.

W drugim etapie obliczeniami hydrologicznymi objęto cały obszar zlewni różnicowej Warty usytuowanej między profilami wodowskazowymi w Nowej Wsi Podgórnjej i Śremie. Oznaczono to włączenie do obszaru badań rejonu wodnogospodarczego P-IX B obejmującego całą prawobrzeżną (północną) część

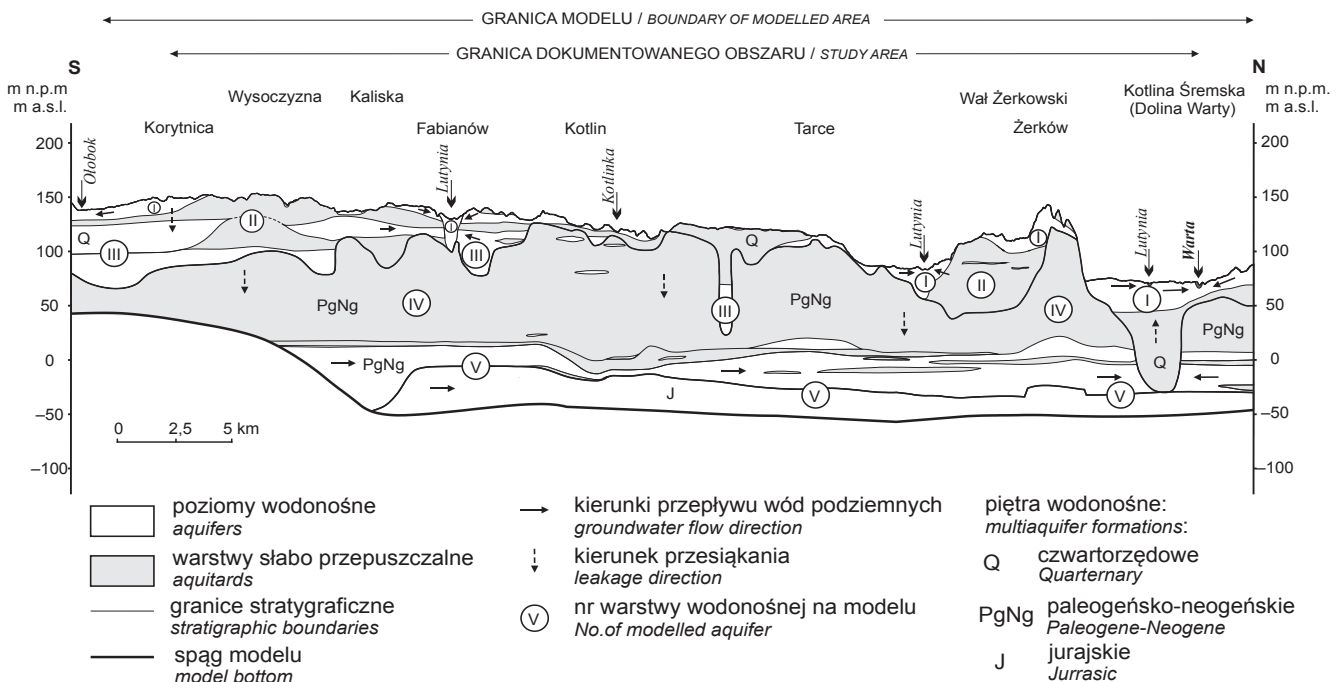


Fig. 2. Schematyczny przekrój hydrogeologiczny

Schematic hydrogeological cross-section

zlewni różnicowej. Wyznaczenie wielkości odpływu podziemnego na podstawie danych zgromadzonych przez profile kontrolujące przepływy Warty pozwoliło uwzględnić bezpośredni dopływ do tej regionalnej bazy drenażu, nierejestrowany przez posterunki wodowskazowe usytuowane na dopływach rzeki oraz dopływ formowany poza analizowaną jednostką bilansową pochodzący z regionalnego systemu krążenia. Udział południowej i północnej części zlewni różnicowej w kształtowaniu całkowitej objętości odpływu podziemnego oszacowano poprzez analizę zróżnicowania przestrzennego warunków infiltracji. Wartości modułów odpływu podziemnego oszacowane na podstawie danych pochodzących z profili wodowskazowych w Raszewach na Lutyni oraz w Brodowie na Moskawie (zamykający znaczną część północnej części zlewni różnicowej) posłużyły w metodzie rozszerzonej jedynie do weryfikacji wartości średniego wskaźnika infiltracji południowej i północnej części zlewni różnicowej.

W ostatnim, trzecim etapie obliczono różnicę między wartościami zasobów odnawialnych obliczonych w pierwszym i drugim etapie. Otrzymana wartość stanowi ilościową ocenę wpływu niezgodności wododziałów podziemnych i powierzchniowych na oszacowaną wielkość zasobów odnawialnych. Wyniki obliczeń skonfrontowano z rezultatami badań modelowych.

## PRZEBIEG OBLICZEŃ

### ETAPI – WYZNACZENIE WARTOŚCI ODPLYWU PODZIEMNEGO NA PODSTAWIE METODY STANDARDOWEJ

Standardowa ocena wielkości zasobów odnawialnych objęła określenie wielkości odpływu podziemnego zlewni Lutyni zamkniętej profilem wodowskazowym w Raszewach. Jest to jedyna zlewnia kontrolowana, która w całości znajduje się w obrębie analizowanej jednostki bilansowej. Przekrój wodowskazowy w Raszewach funkcjonował do 1991 r., był usytuowany w 11,6 km i zamykał zlewnię o powierzchni 533,07 km<sup>2</sup>, tj. 90% powierzchni rejonu wodnogospodarczego P-IX A. Obliczenia wielkości odpływu podziemnego wykonano metodą Killego. Wielkość odpływu podziemnego z pozostałej, niekontrolowanej wodowskazowo części oszacowano metodą analogii hydrologicznej. Jako zlewnię analog przyjęto Lutynię zamkniętą profilem w Raszewach. Profile badane zamykały zlewnie pozostałych lewobrzeżnych dopływów Warty usytuowanych w obrębie rejonu wodnogospodarczego P-IX C, zgodnie z zasadą, że profil-analog może być usytuowany na rzece uchodzącej do tego samego odbiornika (Stachy i in., 1987). W obliczeniach uwzględniono wartości chwilowego odpływu jednostkowego zarejestrowanego podczas realizacji czterech serii pomiarów hydrometrycznych wykonanych we wrześniu 2015 r. oraz w maju, lipcu i wrześniu 2016 r.

Zgodnie z uzyskanymi wynikami obliczeń, najkorzystniejsze warunki odnawialności zasobów wód podziemnych cechują południowy fragment rejonu P-IX A zajęty przez środkową i górną część zlewni Lutyni. Wielkość odpływu

podziemnego wyniosła tam 1,56 m<sup>3</sup>/s co stanowi 157% wartości odpływu podziemnego ustalonego dla zlewni Lutyni zamkniętej profilem wodowskazowym w Raszewach usytuowanym poniżej, w pobliżu ujścia do Warty. Podczas czterech serii pomiarów hydrometrycznych odpływ z tej części zlewni Lutyni był średnio 2,5-krotnie wyższy od przepływu pomierzonego w profilu hydrometrycznym w Raszewach (na miejscu zlikwidowanego wodowskazu). Należy podkreślić, że wszystkie serie pomiarowe zostały wykonane podczas występowania niskich stanów wód powierzchniowych.

Przedstawiona powyżej inwersja przepływu jest rezultatem niekorzystnego usytuowania profilu wodowskazowego w Raszewach. Przekrój zlokalizowano na tarasie pradolinowym Warty. Znaczne straty przepływu wynikają z infiltracji wód Lutyni w dobrze przepuszczalne osady. Natężenie zjawiska jest zmienne w czasie i stanowi rezultat interferencji wahań zwierciadła przypowierzchniowego poziomu wodonośnego oraz stanów wód powierzchniowych. Udział infiltracji rzeki w całkowitym przepływie jest najwyższy podczas okresów współwystępowania niżówek hydrologicznych i niżówek wód podziemnych. Na podstawie dostępnych danych nie sposób określić czy infiltracyjny charakter Lutyni w jej ujściowym odcinku ma charakter permanentny czy epizodyczny. Ponieważ hydrologiczne metody oceny odnawialności zasobów wód podziemnych (w tym metoda Killego) opierają się na analizie statystycznej niskich miesięcznych wartości przepływów przyjęto, że wielkość odpływu podziemnego – wyznaczona na podstawie danych pochodzących z posterunku w Raszewach – jest zaniżona. Zjawisko utraty przepływu wzdłuż dolnych odcinków cieków było obserwowane również w innych rejonach Polski (Tott, 2014; Skrzypczyk, 2015). Wydaje się ono tym silniejsze im większa dysproporcja przepływów między dopływem i odbiornikiem. Ponieważ scharakteryzowane powyżej zjawisko infiltracji ma nieustalony w czasie charakter nie zostało odzwierciadlone podczas badań modelowych.

Wielkość zasobów odnawialnych określona standardowym wariantem metody hydrologicznej w oparciu o przedstawione powyżej dane wyniosła 107,1 tys. m<sup>3</sup>/d i była niższa o 44% od przyjętej w badaniach modelowych wielkości infiltracji efektywnej i o 52% od oszacowanej wielkości drenażu przez ciek i jeziora. Należy podkreślić, że obliczenia metodą hydrologiczną dotyczyły 75% powierzchni obszaru badań. Nieuwzględniona część obejmowała zlewnie dolnych odcinków dopływów Warty oraz bezpośrednią zlewnię Warty. Ze względu na scharakteryzowane powyżej zjawisko infiltracji wód powierzchniowych wzdłuż odcinków cieków usytuowanych w obrębie tarasu Warty, nie ekstrapolowano oszacowanych wskaźników odpływu podziemnego na niekontrolowane fragmenty analizowanego obszaru.

Rezultaty obliczeń zasobów odnawialnych otrzymane standardowym wariantem metody hydrologicznej uznano za niewystarczająco wiarygodne. Wśród najważniejszych zastrzeżeń należy wymienić ograniczoną przydatność do wyznaczenia wielkości odpływu podziemnego danych pochodzących z posterunku wodowskazowego w Raszewach oraz brak profili kontrolowanych w obrębie rejonu wodnogospo-

darczego P-IX C. Przyjęcie założenia o zgodności przebiegu wododziałów podziemnych i powierzchniowych tak specyficznemu usytuowanej jednostki bilansowej uznano jako błędne. Rozwiązaniem, które częściowo niwelowało wymienione powyżej wady metody standardowej było rozszerzenie obszaru objętego obliczeniami na zlewnię całą różnicową Warty.

#### ETAP II – WYZNACZENIE WARTOŚCI ODPLYWU PODZIEMNEGO NA PODSTAWIE METODY ROZSZERZONEJ

Zlewnia różnicowa Warty (Śrem-Nowa Wieś Podgórna) zajmuje powierzchnię 1646,3 km<sup>2</sup> i obejmuje obszar bilansowy P-IX Warta od Proсны do Kanału Mosińskiego. Jej południową, lewobrzeżną część zajmują omawiane w niniejszym artykule rejonu wodnogospodarcze A oraz C. Północną, prawobrzeżną część zajmuje rejon wodnogospodarczy B, którego 81% powierzchni zajmuje zlewnia Moskawy. Pozostałe 19% powierzchni prawobrzeżnej części zlewni różnicowej drenuje Kanał Bobrowski oraz ciek Baba. Około 48% (354,2 km<sup>2</sup>) powierzchni zlewni Moskawy kontrolował do 1980 roku profil wodowskazowy w Brodowie. Razem prawobrzeżna część zajmuje 44,6% powierzchni zlewni różnicowej tj. 744,15 km<sup>2</sup>. Zlewnię zamykają profile wodowskazowe usytuowane odpowiednio w 341,5 i 290,8 km Warty. Profil w Nowej Wsi Podgórnjej kontroluje zlewnię o powierzchni 20755,9 km<sup>2</sup>. Przekrój w Śremie zamyka zlewnię o powierzchni 22402,2 km<sup>2</sup>.

Wielkość odpływu podziemnego z analizowanej zlewni różnicowej Warty oszacowana metodą Killiego wyniosła 3,93 m<sup>3</sup>/s, tj. 2,39 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Wartość średniego wskaźnika zasilania wyniosła 14% (po uwzględnieniu poprawki Chomicza przy obliczaniu średniej rocznej sumy opadów w wieloletniu 1981–2010). Udział południowej i północnej części zlewni różnicowej w kształtowaniu wskazanej powyżej całkowitej objętości odpływu podziemnego oszacowano poprzez analizę zróżnicowania przestrzennego warunków infiltracji. W tym celu zagregowano wydzielenia litologiczne i nadano im wartości średniego wskaźnika infiltracji, zgodnie z klasyfikacją warunków infiltracji ustaloną przez Z. Pazdro (Pazdro, 1990). W kolejnym etapie dla północnej i południowej części zlewni różnicowej obliczono średnie moduły zasilania będące średnimi ważonymi (gdzie wagą była wartość wskaźnika

infiltracji). Należy podkreślić, że warunki infiltracji zostały wyznaczone na podstawie wartości tylko jednego czynnika: przepuszczalności osadów powierzchniowych. Ponieważ obie części zlewni różnicowej są podobne pod względem czynników kształtujących warunki odnawialności nie uwzględniono m.in. spadków terenu, form pokrycia terenu, litologii osadów usytuowanych powyżej stropu górnego poziomu wodonośnego oraz stref o uprzywilejowanych warunkach infiltracji. Potwierdzeniem zbliżonych warunków infiltracji północnej i południowej części zlewni różnicowej (fig. 3) są wartości modułu odpływu podziemnego zarejestrowane przez profile wodowskazowe w Brodowie i Raszewach wynoszące odpowiednio: 1,78 i 1,86 dm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>

Średni wskaźnik infiltracji efektywnej północnej i południowej części analizowanej zlewni wyniósł odpowiednio 17,3 i 16,5% i jest zbliżony do wynoszącej 16,2% średniej wartości wyznaczonej dla sąsiadującej zlewni Orli (Tarka i in., 2017). Po uwzględnieniu powierzchni omawianych fragmentów zlewni obliczono ich udział w całkowitym odpływie podziemnym zlewni różnicowej. Północna część formuje 46% odpływu tj. 1,80 m<sup>3</sup>/s. Pozostałe 54% tj. 2,13 m<sup>3</sup>/s dostarcza południowa część tj. analizowana w niniejszym artykule jednostka bilansowa. Odpływ podziemny z rejonów P-IX A i P-IX C wyniósł odpowiednio 1,36 i 0,77 m<sup>3</sup>/s. Wielkość zasobów odnawialnych ustalona rozszerzonym wariantem metody hydrologicznej wyniosła 184,0 tys. m<sup>3</sup>/d

#### ETAP III – PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Wielkość zasobów odnawialnych określona standardowym i rozszerzonym wariantem metody hydrologicznej wyniosła odpowiednio: 107,1 tys. i 184,0 tys. m<sup>3</sup>/d. Różnica między wynikami obliczeń wyniosła 76,9 tys. m<sup>3</sup>/d. Stanowi to 72% wielkości zasobów odnawialnych oszacowanych metodą standardową.

Wyniki obliczeń uzyskane metodą rozszerzoną pozwoliły przyjąć w badaniach modelowych bardziej korzystne warunki infiltracji. W efekcie różnica między oszacowanymi metodą modelowania matematycznego i metodą kontrolną wielkościami zasobów odnawialnych wyniosła niespełna 4%.

Sięgająca 18% różnica między wartością drenażu cieków i zbiorników wód powierzchniowych ustaloną podczas badań

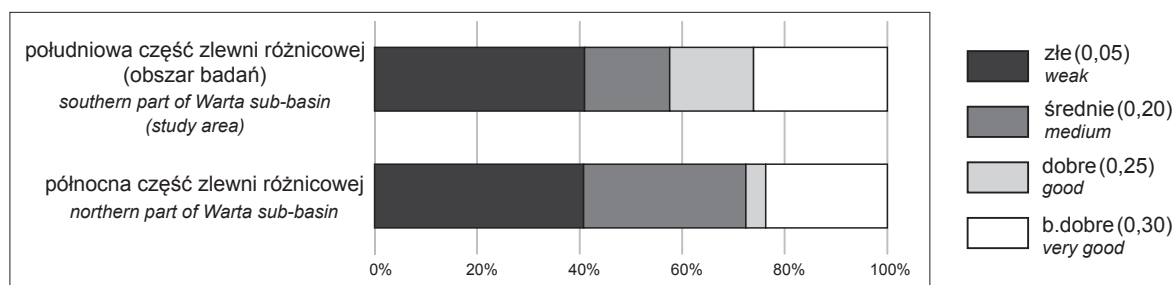


Fig. 3. Warunki infiltracji w północnej i południowej części zlewni różnicowej Warty (w nawiasie podano wartość wskaźnika infiltracji efektywnej)

Groundwater recharge conditions in the northern and southern part of the Warta sub-basin (the value of effective infiltration coefficient is given in brackets)

modelowych (225,5 tys. m<sup>3</sup>/d) i obliczoną metodą hydrologiczną może wynikać z nieuwzględnienia w obliczeniach hydrologicznych wielkości drenażu ewapotranspiracyjnego, który w obrębie łozyska Warty stanowi istotną część zasobów odnawialnych.

## PODSUMOWANIE

Przyjęcie założenia o zgodności położenia działów wód podziemnych i powierzchniowych skutkowało w przypadku omawianej jednostki bilansowej niedoszacowaniem wielkości zasobów odnawialnych o 72%. Przedstawiona w artykule metoda ilościowej oceny wpływu niezgodności położenia zlewni podziemnej i hydrograficznej na wielkość zasobów odnawialnych pozwoliła wyznaczyć wartość nieuwzględnionej części dopływu. Utożsamiono ją z różnicą między wielkością zasobów odnawialnych obliczonych standardowym (107,1 tys. m<sup>3</sup>/d) i rozszerzonym (184,0 tys. m<sup>3</sup>/d) wariantem metody hydrologicznej. Różnica wyniosła 76,9 tys. m<sup>3</sup>/d, co stanowi wielkość zbliżoną do ustalonej w toku badań modelowych wartości wymiany wód poprzez boczne granice jednostki bilansowej (61,8 tys. m<sup>3</sup>/d). Przyjmując założenie, że system wodonośny jest jednorodny a wskaźnik odnawialności w omawianym regionie nie jest przestrzennie zróżnicowany, obszar zlewni hydrograficznej zajmowałby niespełna 60% zlewni podziemnej. Powiększenie obszaru objętego obliczeniami hydrologicznymi do zlewni różnicowej Warty pozwoliło uwzględnić udział regionalnego systemu krążenia w formowaniu zasobów wód podziemnych analizowanych rejonów wodnogospodarczych oraz tę część zasobów która infiltruje w obrębie analizowanej jednostki bilansowej, ale nie jest drenowana przez jej sieć hydrograficzną. Wysoka wartość różnicy jest dodatkowo efektem niekorzystnego przy wyznaczeniu wielkości odpływu podziemnego metodami statystycznymi usytuowania profilu wodowskazowego w Raszewach na Lutyni.

## SUMMARY

The assumption about the correspondence of the location of groundwater and morphological watersheds resulted in an underestimation of the quantity of renewable resources by 72%. The method of quantitative assessment of the influence of the discrepancy of the groundwater and hydrographic catchments on the quantity of renewable resources, presented in this article, has allowed determining the value of the omitted part of the groundwater runoff. It was identified with the difference between the size of renewable resources calculated with the standard (107,100 m<sup>3</sup>/d) and extended (184,000 m<sup>3</sup>/d) variants of the hydrological method. The difference between the calculation results is 76,000 m<sup>3</sup>/d, which is similar to the value of groundwater exchange through the lateral boundaries of the balance region, determined by modelling (61,000 m<sup>3</sup>/d). Assuming that the hydrogeolo-

## LITERATURA

- DĄBROWSKI S., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., PRZYBYŁEK J., SZCZEPAŃSKI A. (red.), 2011 – Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Bogucki Wydaw. Nauk., Poznań.
- DOBKOWSKA A. i in. (red.), 2017 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne obszaru bilansowego zlewni Warty od ujścia Lutyni do Kanału Mosińskiego z Lutynią włącznie. SEGI-AT Sp. z o.o. Generalny Wykonawca Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB [1911/2018], Warszawa.
- HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., RODZUCH A., 2013 – Metodyka określania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w obszarach bilansowych z uwzględnieniem potrzeb jednolitych bilansów wodnogospodarczych. Poradnik metodyczny. Wydaw. Med., Warszawa.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.), 2007 – Hydrogeologia regionalna Polski. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wydaw. Geol., Warszawa.
- RMŚ, 2016 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (DzU 2016 poz. 2033).
- SKRZYPCZYK A i in. (red.), 2016 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych zlewni Pregoty (bez Łyny). SEGI-AT Sp. z o.o. Generalny Wykonawca Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB [910/2017], Warszawa.
- STACHY J. i in. (red.), 1987 – Atlas hydrologiczny Polski. Wydaw. Geol., Warszawa.
- TARKA R., OLIHWER T., STAŚKO S., 2017 – Evaluation of groundwater recharge in Poland using the infiltration coefficient method. *Geol. Quart.*, **61**, 2: 384–395.
- TOTH J., 1963 – A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophysic. Res.*, **68**, 16.
- TOTT M. i in. (red.), 2015 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych rejonów Popowo, Serock i Legionowo. P.G. S.A. Generalny Wykonawca Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB [6729/2016], Warszawa.

gical system is homogeneous and the effective infiltration coefficient in the discussed region is spatially invariable, the hydrographic catchment area would include less than 60% of the groundwater catchment. Enlargement of the area covered by hydrological calculations as far as the Warta sub-basin has allowed taking into account the contribution of the regional groundwater circulation system to the formation of renewal resources of the analyzed water-economic regions and the part of resources that infiltrates within the analyzed balance region but is not drained by its hydrographic network. Furthermore, the high value of the difference is an effect of the unfavourable location of the Raszewy water gauge for determining the quantity of the groundwater runoff using statistical methods.

