

## MODELOWA OCENA ZASILANIA I DRENAŻU WÓD PODZIEMNYCH W DOLINIE WISŁY

### MODELLING ASSESSMENT OF GROUNDWATER RECHARGE AND DRAINAGE IN VISTULA RIVER VALLEY

EWA KROGULEC<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Dolina Wisły tworzy system hydrogeologiczny zasilany wskutek infiltracji opadu atmosferycznego oraz dopływu lateralnego ze strony hydrogeologicznych jednostek otaczających. Zasilanie infiltracyjne warstwy wodonośnej w dolinie Wisły stanowi jeden z podstawowych dynamicznych czynników, od których zależy system krążenia wód, bilans wodny oraz podatność wód podziemnych na zanieczyszczenia. Ocena wielkości zasilania i drenażu wód podziemnych przeprowadzono w rejonie Kampinoskiego Parku Narodowego (KPN) oraz Włocławka przy zastosowaniu modelowania numerycznego, co umożliwiło określenie intensywności tych procesów w wydzielonych podobszarach, uzyskanie wartości średnich dla całego obszaru badań oraz przeprowadzenie obliczeń bilansowych. Wyniki badań modelowych wskazują na różny udział zasilania infiltracyjnego w systemie krążenia wód w dolinie Wisły. Wielkość zasilania infiltracyjnego jest szczególnie zróżnicowana w poszczególnych hydrostrefach w rejonie KPN i wynosi 74,0–160,9 mm/r w pasach wydmych, 10,5–43,9 mm/r w pasach bagiennych oraz 56,1–94,5 mm/r na tarasie zalewowym Wisły. Średnia wartość zasilania infiltracyjnego dla całego obszaru KPN wynosi 87 mm/r i jest zbliżona do rejonu Włocławka, gdzie osiąga wartość nieco ponad 110 mm/r.

**Słowa kluczowe:** dolina rzeki, badania modelowe, zasilanie infiltracyjne, ewapotranspiracja, drenaż wód podziemnych, dopływ lateralny.

**Abstract.** The Vistula River valley forms a hydrogeological system recharged by the infiltration of precipitation as well as lateral inflow from the surrounding hydrogeological units. Infiltration recharge of the aquifer in the Vistula River valley is one of the main dynamic factors influencing groundwater circulation, water balance and groundwater vulnerability to contamination. Evaluation of groundwater recharge and drainage has been carried out in the vicinity of the Kampinos National Park (KNP) and Włocławek with the application of numerical modelling, what allowed determining the intensity of these processes in selected sub-regions, obtaining mean values characterizing the entire area, as well as making balance calculations. The results of modelling indicate that infiltration recharge may vary between particular parts of the water circulation system in the Vistula River valley. The value of infiltration recharge differs mainly in the particular hydrozones in the KNP area, and reaches 74.0–160.9 mm/y in dune belts, 10.5–43.9 mm/yr in swamp zones, and 56.1–94.5 mm/y in the Vistula River floodplain. The mean value of infiltration recharge for the entire KNP area attains 79 mm/y and is similar to the value of infiltration recharge from the Włocławek area, where it reaches just over 110 mm/y.

**Key words:** river valley, numerical modelling, infiltration recharge, evapotranspiration, groundwater drainage, lateral inflow.

### WSTĘP

Ocenę wielkości zasilania infiltracyjnego w dolinie Wisły środkowej przeprowadzono w rejonie Kampinoskiego Parku Narodowego (KPN) oraz Włocławka. Warunki geologiczne i hydrogeologiczne są w badanych obszarach typowe dla dolin na Niżu Polskim (Baraniecka, Konecka-Betley,

1987; Krogulec, 2004a), co pozwala na porównanie wyników oraz przyjęcie uzyskanych rezultatów w innych jednostkach dolinnych.

Doliny rzeczne, w tym także dolina Wisły, to tereny lokalizacji największych ujęć wód podziemnych. Wynika to, mię-

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa, e-mail: ewa.krogulec@uw.edu.pl

dzy innymi, z możliwości utrzymania stałej, dobrej jakości ujmowanej wody oraz wielokrotnie niższego kosztu produkcji wody przeznaczonej do konsumpcji w stosunku do kosztów eksploatacji wód powierzchniowych. Wyjątkowa pozycja do-

liny Wisły w gospodarce i ogromna rola w systemie obszarów chronionych jest przyczyną szczegółowych badań hydrogeologicznych, w tym jednego z najważniejszych elementów systemu krążenia – wielkości zasilania i drenażu.

## CHARAKTERYSTYKA REJONÓW BADAŃ

### WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Kampinoski Park Narodowy wraz z otuliną jest położony w środkowej części doliny Wisły. Na całym obszarze badań występują osady czwartorzędowe o miąższości od 20 do 50 m (lokalnie ponad 100 m). Obszar KPN charakteryzuje się pasowym układem form rzeźby terenu, wzdłuż Wisły występuje taras zalewowy oraz tarasy nadzalewowe z dwoma pasami bagiennymi rozdzielonymi dwoma pasami wydmyowymi. Granicę hydrogeologiczną jednostki dolinnej stanowi fragment wysoczyzny oraz równiny akumulacji zastoiskowej. Badania geofizyczne przeprowadzone na przekrojach prostopadłych do Wisły (Krogulec i in., 2003) wskazują na generalną dwudzielność warstwy wodonośnej w profilu pionowym: wyższą warstwę piaszczystą i piaszczysto-żwirową, miąższości od 8 do 30 m, podścieloną ciągłą warstwą piaszczysto-pylastą, mułkową, miejscami przechodzącą w glinę piaszczystą i glinę pylastą, miąższości od 15 do 28 m. Dwudzielna warstwa wodonośna w dolinie Wisły charakteryzuje się przewodnością wynoszącą w górnej części warstwy od 226 do 846 m<sup>2</sup>/d ( $k_{sr} = 28,2$  m/d), a w dolnej części od 304 do 568 m<sup>2</sup>/d ( $k_{sr} = 20,3$  m/d) (Krogulec, Marciniak, 2003).

Drugi obszar badań położony w rejonie Włocławka nie został szczegółowo sprecyzowany lokalizacyjnie ze względu na fakt, iż badania realizowane były w ramach dokumentacji hydrogeologicznych, które zostały utajnione przez zleceniodawcę. Współwykonawcą dokumentacji i realizacji badań modelowych był Tomasz Gruszczyński (Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego). Uzyskane wyniki, nawet bez szczegółowego określenia miejsca realizacji badań, są ciekawe i mogą być zaprezentowane jako typowe dla doliny Wisły. W opisywanym fragmencie doliny występuje taras zalewowy (dolny) oraz nadzalewowy (górnym). Taras dolny budują plejstocenijskie utwory piaszczyste, miejscami piaszczysto-żwirowe. Na tarasie górnym, do głębokości około 25–40 m występuje kompleks osadów piaszczysto-żwirowych pochodzenia fluwioglacjalnego. W jego części stropowej przeważają piaski drobno- i średnioziarniste, natomiast w części dolnej przeważają piaski grubo- i różnoziarniste z przewarstwieniami żwiru oraz żwiru z otoczkami. Miąższość osadów czwartorzędowych wynosi od 25 do 50 m. We wszystkich analizowanych profilach otworów archiwalnych na badanym terenie (18 otworów) współczynnik filtracji wyniósł około 10–15 m/d.

Oba poligony badawcze są położone w obrębie czwartorzędowych Głównych Zbiorników Wód Podziemnych. Obszar KPN wchodzi w skład GZWP nr 222 – Dolina Środko-

wej Wisły; Warszawa–Puławy (Kleczkowski, red., 1990). Zbiornik ten, o powierzchni 2674 km<sup>2</sup>, związany jest z utworami aluwialnymi i fluwioglacjalnymi doliny Wisły między ujściem Pilicy i Sochaczewem. Poligon w rejonie Włocławka stanowi fragment GZWP nr 220 – Pradolina rzeki Środkowa Wisła. Zbiornik budują osady aluwialne i fluwioglacjalne, charakterystyczne dla doliny Wisły i Kotliny Płockiej. Wody podziemne w obu zbiornikach są praktycznie nieizolowane od powierzchni, w związku z tym użytkowa warstwa wodonośna jest potencjalnie zagrożona zanieczyszczeniem, a jednocześnie zbiorniki są podstawowym źródłem zaopatrzenia w wodę miast i wsi zlokalizowanych na ich terenie.

### POŁOŻENIE ZWIERCIADŁA WÓD PODZIEMNYCH – DANE DO MODELI MATEMATYCZNYCH

Dolina rzeczna stanowi system hydrogeologiczny, w którym zwierciadło wód podziemnych jest położone na niewielkiej głębokości i podlega znacznym wahaniom sezonowym, dlatego szczególną uwagę poświęcono uzyskaniu wiarygodnych i reprezentatywnych pomiarów stanów wód. Monitoring stanów wód podziemnych oraz ich interpolacja na mapach hydroizohips stanowiły bazę danych do identyfikacji i weryfikacji przeprowadzonych badań modelowych.

Dane o położeniu zwierciadła wód podziemnych w rejonie KPN pochodzą z wieloletnich obserwacji (tab. 1). Z uwagi na podstawowe znaczenie uśrednionych stanów wód podziemnych w przeprowadzonych badaniach modelowych w warunkach ruchu ustalonego, w skrócie zostanie przedstawiona interpretacja danych z obserwacji terenowych o różnej częstotliwości pomiaru. Sieć monitoringowa wód KPN II (Krogulec, Sikorska-Maykowska, 2001; Krogulec, 2004a) składa się z 56 piezometrów, w tym w 7 z nich zostały zamontowane elektroniczne czujniki pomiaru. Punkty obserwacyjne wód podziemnych zgrupowano w siedmiu przekrojach obserwacyjnych, przebiegających prostopadle do linii Wisły. Wzdłuż przekrojów przeprowadzono badania geofizyczne oraz przekroje te były podstawą badań modelowych. Obserwacje w sieci KPN II od 1998 r. są standardowo prowadzone z częstotliwością raz na 2 tygodnie, w czujnikach pomiar jest ciągły. Porównano wartości średnie roczne z pomiarów terminowych i pomiarów ciągłych. Analiza danych wskazuje na zbliżone średnie wartości z obu sposobów pomiaru stanów. Największa różnica pomiędzy różnymi technikami pomiaru wynosiła 4,5 cm (piezometr nr 33). Istotna jest niewielka skala błędów, stanowiąca mniej niż 4% amplitu-

**Tabela 1****Charakterystyka głębokości położenia zwierciadła wody w rejonach Kampinoskiego Parku Narodowego i Włocławka**

Depth characteristics of groundwater table in the Kampinos National Park and Włocławek regions

Hydrostrefa	Średnia głębokość do zwierciadła wody [m]	Średnia rzędna zwierciadła wód podziemnych [m]
Rejon KPN		
Taras zalewowy i nadzalewowy Wisły	2,13	71,19
Taras nadzalewowy wyższy, pasy bagienne	1,40	72,71
Taras nadzalewowy wyższy, pasy wydmore	2,57	72,23
Wysoczyzna i równina zastoiskowa	2,32	86,53
Rejon Włocławka		
Taras dolny (zalewowy)	0,5–2,2	72,21
Taras górny (nadzalewowy)	4,0–7,8	76,41

dy rocznych wahań stanów wynoszących we wspomnianym piezometrze 117,9 cm (Krogulec, Andrzejewska, 2005).

Podsumowując, można stwierdzić, że pomiary manualne dają wystarczająco dobre przybliżenie podstawowych statystyk rocznych. Wyniki pomiarów ciągłych stanowią konieczną bazę danych do rozważań na temat zaspokajania potrzeb wodnych poszczególnych biocenoz KPN, charakterystyki zmian zasilania i drenażu wód w ciągu doby, zmian sezonowych i wielu innych zagadnień. Natomiast obserwacje stacjonarne terminowe w sieci KPN II stanowią wystarczająco dokładne dane do badań modelowych.

W rejonie Włocławka pomiary położenia zwierciadła wody podziemnej zostały wykonane podczas jednego sezonu badawczego. Jednakże doświadczenie w monitoringu prowadzonym w dolinie Wisły pozwoliło na wybór optymalnego okresu badań. Zwierciadło wody podziemnej w badanym obszarze ma charakter swobodny, występuje na głębokości 0,5–2,2 m na tarasie dolnym oraz 4,0–7,8 m na tarasie górnym (tab. 1). Głębokość położenia zwierciadła wody podziemnej jest zbliżona do danych z KPN.

**BADANIA MODELOWE**

Istnieje wiele metod oceny wielkości zasilania, wybór jest uzależniony od celu i zakresu badań oraz przyjętej skali czasowo-przestrzennej. W dolinie Wisły ocenę wielkości zasilania i drenażu określono, między innymi, na podstawie badań modelowych. Do modelowania numerycznego zastosowano program ModFlow (McDonald, Harbaugh, 1988) w pakiecie Visual Modflow v. 2.8.2.

W rejonie Kampinoskiego Parku Narodowego badania modelowe wykonano na dwóch przekrojach, zgodnych z liniami ciągów monitoringowych sieci obserwacyjnej KPN II oraz badań geofizycznych (wzdłuż kierunku filtracji wód podziemnych). Badania modelowe umożliwiły przeprowadzenie obliczeń bilansowych na modelach oraz dla ich wybranych fragmentów – hydrostref, wytypowanych na podstawie analizy warunków hydrogeologiczno-środowiskowych (Krogulec, 2004a). W rejonie Włocławka model obejmował wybrany fragment jednostki dolinnej.

Symulacje modelowe przeprowadzono dla warunków filtracji ustalonej, modele kalibrowano biorąc pod uwagę uśrednione stany wód podziemnych zmierzone w piezometrach i innych punktach obserwacyjnych. Ocenę zasilania infiltracyjnego i ewapotranspiracji przeprowadzono rozwiązując zadanie odwrotne, wielkość dopływu lateralnego ustalono na podstawie obliczeń bilansowych.

Dyskretyzacja przestrzeni na modelach w rejonie KPN przebiegała w dwóch etapach. W pierwszym dokonano podziału obszaru na bloki o  $\Delta x = 500$  m ( $\Delta y = 1$  m – modele w układzie przestrzennym 2D pionowym), natomiast  $\Delta z$  była dostosowana do rozpoznanych warunków geologicznych. W kolejnym etapie zagęszczono bloki obliczeniowe, głównie w rejonie kontaktu doliny z równiną zastoiskową i wysoczyzną oraz w sąsiedztwie mniejszych cieków.

Modelowany obszar w rejonie Włocławka odwzorowano za pomocą ortogonalnej siatki dyskretyzacji o wymiarach bloków 100×100 m. W kierunku pionowym podziału przestrzeni dokonano na podstawie budowy geologicznej modelowanego obiektu hydrogeologicznego. Dodatkowo poprowadzono powierzchnie podziału w obrębie poszczególnych warstw, najczęściej z zachowaniem stałej proporcji podziału warstwy. Na podstawie analizy dostępnych materiałów wejściowych dotyczących rozpoznania geologicznego zdecydowano się na podział analizowanej warstwy wodonośnej na trzy podwarstwy o zróżnicowanej miąższości.

Prawidłowe określenie warunków brzegowych jest zasadniczym etapem konstrukcji modelu. W warunkach przepływu ustalonego granice w dużym stopniu wpływają na charakter i deformacje systemu krążenia wód. W przedstawianych modelach zastosowano zewnętrzne warunki brzegowe I, II i III rodzaju. Dla granic wyznaczonych przez koryto Wisły przyjęto warunek III rodzaju (do jego zadania na wszystkich modelach wykorzystano pakiet RIVER) na podstawie danych dotyczących stanów wód powierzchniowych. W blokach z warunkiem III rodzaju wartości współczynnika przewodności osadów dennych oszacowano na etapie kalibracji modelu. Modele od strony jednostek otaczających ograniczono warunkiem II lub I rodzaju. Na modelach w rejonie KPN zastosowano we wszystkich warstwach warunek II rodzaju typu  $Q = 0$ , w przypadku gdy granica przebiegała wzdłuż strefy wododziałowej lub na innej granicy, przyjmując konkretną wartość dopływu (typu  $Q = \text{const}$ ; Krogulec, 1997). W rejonie Włocławka przyjęto warunek I rodzaju ( $H = \text{const}$ ) we wszystkich podwarstwach na podstawie danych z pomiarów stanów wód podziemnych. Dolne granice modeli zostały ograniczone spągami warstw wodonośnych,

których podłoże uznano za praktycznie nieprzepuszczalne i dlatego przypisano tej granicy warunek II rodzaju (typu  $Q = 0$ ). Na granicach modelu fragmentu doliny Wisły w rejo-

nie Włocławka, w przybliżeniu zgodnych z przebiegiem linii prądu, zadano warunek II rodzaju ( $Q = 0$ ).

## WARTOŚĆ ZASILANIA I DRENAŻU W DOLINIE WISŁY

Najbardziej optymalne wartości infiltracji efektywnej oraz ewapotranspiracji dla danej klasy modelu uzyskano na etapie kalibracji modeli. Zastosowana procedura kalibracji (metodą prób i błędów) polegała na porównaniu pracy (reakcji) modelu z pracą systemu rzeczywistego. Przy identyfikacji modeli z rejonu KPN minimalną wartość funkcji celu, którą uznano jako wyznacznik prawidłowo przeprowadzonego tego etapu modelowania, określono poprzez różnicę pomierzonej w punktach i obliczonej wartości wysokości hydraulicznej (Macioszczyk, Kazimierski, 1984). W modelu z rejonu Włocławka, oprócz wspomnianej wyżej metody, obliczono również błąd średni (ME), błąd średni absolutny (MAE) oraz błąd średni kwadratowy (RMS). Na etapie kalibracji modelu przeprowadzono analizę jego czułości według przedstawionych metod liczenia błędów, testowano osobno wpływ zmian wartości zasilania infiltracyjnego, ewapotranspiracji i współczynnika przewodności osadów dennych na wartości błędów. Uzyskane wyniki –  $ME = -0,0047$ ,  $MAE = 0,494$  m,  $RMS = 0,590$  m – pozwoliły na przyjęcie optymalnych wartości poszczególnych parametrów do dalszych obliczeń.

Obliczenia modelowe umożliwiły ocenę wielkości zasilania infiltracyjnego w poszczególnych wydzielonych na obszarze KPN hydrostrefach, a także uzyskano wartości średnie dla całego obszaru oraz przestrzenny rozkład wartości, przydatny do innych analiz hydrogeologicznych, np. ocen

podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia lub obliczeń zasobowych (Krogulec, 2004b). Wyniki obliczeń w rejonie Kampinoskiego Parku Narodowego wskazują, że infiltracja efektywna jest szczególnie intensywna na obszarze pasów wydmych, gdzie wynosi od 74,0 do 160,9 mm/r (śr. 152,6 mm/r) – tabela 2. Średnie zasilanie infiltracyjne na obszarze całego modelu w centralnej części rejonu KPN ma wartość 48 mm/r, a we wschodniej części 94 mm/r. Najmniejszą wartość zasilania infiltracyjnego stwierdzono w obrębie pasów bagiennych, od 10,5 do 43,9 mm/r (śr. 28,6 mm/r).

Zasilanie lateralne całej jednostki dolinnej w rejonie KPN ze strony wysoczyzny i równiny zastoiskowej, określone na podstawie bilansowych obliczeń modelowych, przekracza  $17\,400\text{ m}^3/\text{d}$  (długość strefy kontaktu dolina–wysoczyzna wynosi ok. 59 km), czyli stanowi 7% średniego zasilania infiltracyjnego wynoszącego ponad  $252\,500\text{ m}^3/\text{d}$  (powierzchnia jednostki dolinnej ok.  $600\text{ km}^2$ ; wartość infiltracji – tab. 3). A zatem dopływ lateralny, nawet zintensyfikowany wskutek lokalnie skupionej eksploatacji wód podziemnych, odgrywa niewielką rolę w zasilaniu całej jednostki dolinnej w rejonie KPN.

Na podstawie skalibrowanego modelu przepływu obliczono bilans zasilania i drenażu analizowanego fragmentu doliny w rejonie Włocławka. W zasilaniu modelowanego fragmentu warstwy wodonośnej istotną rolę odgrywa również infiltracja efektywna, chociaż znaczny udział ma także lateralny dopływ wód podziemnych od strony wysoczyzny. Wielkość infiltracji efektywnej osiąga wartość powyżej 110 mm/r. Zasilanie lateralne jednostki dolinnej ze strony wysoczyzny wynosi  $4715,9\text{ m}^3/\text{d}$  (długość strefy kontaktu

**Tabela 2**

### Wartość infiltracji efektywnej w dolinie Wisły w rejonie Kampinoskiego Parku Narodowego – wyniki modelowania (modele płaskie na przekrojach)

Values of infiltration recharge in the Vistula River valley, Kampinos National Park – results of model simulation

Model 1 – centralna część KPN		Model 2 – wschodnia część KPN	
Obszar	Infiltracja efektywna [mm/r]	Obszar	Infiltracja efektywna [mm/r]
Taras zalewowy Wisły	56,1	Taras zalewowy Wisły	94,5
Strefa przejściowa	97,4	Strefa przejściowa	102,8
Północny pas bagienny	10,5	Południowy pas bagienny	43,9
Południowy pas bagienny	33,2	Strefa przejściowa	80,0
Północny pas wydmy	82,2	Południowy pas wydmy	160,9
Południowy pas wydmy	74,0	Wysoczyzna	83,4

**Tabela 3**

### Wielkość zasilania i drenażu w dolinie Wisły w rejonie Kampinoskiego Parku Narodowego – wyniki modelowania numerycznego

Values of recharge and drainage in the Vistula River valley, Kampinos National Park – results of model simulation

Zasilanie			Drenaż		
Czynnik	Model 1	Model 2	Czynnik	Model 1	Model 2
Infiltracja efektywna [mm/r]	48,0	94,0	Ewapotranspiracja [mm/r]	32,5	60,0
Dopływ lateralny [ $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ ]	0,248	0,308	Drenaż rzeczny [ $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ ]	1,17	1,96

Tabela 4

**Wielkość zasilania i drenażu w dolinie Wisły w rejonie Włocławka – wyniki modelowania numerycznego**

Values of recharge and drainage in the Vistula River valley, Włocławek region – results of model simulation

Zasilanie		Drenaż	
Czynnik	Taras zalewowy i nadzalewowy	Czynnik	Taras zalewowy i nadzalewowy
Powierzchnia modelu [km <sup>2</sup> ]	18,04	Powierzchnia modelu [km <sup>2</sup> ]	18,04
Infiltracja efektywna [mm/r]	110,2	Ewapotranspiracja [mm/r]	26,3
Dopływ lateralny [m <sup>3</sup> /d·m]	0,962	Drenaż rzeczny [m <sup>3</sup> /d·m]	1,59

około 5 km), czyli jest niemalże równe średniemu zasilaniu infiltracyjnemu przekraczającemu 4554 m<sup>3</sup>/d (tab. 4).

Wielkość drenażu warstwy wodonośnej przez Wisłę w obu poligonach badawczych jest podobna, w rejonie Włocławka wynosi 1,59 m<sup>3</sup>/d·m, natomiast w rejonie KPN – maksymalnie 1,96 m<sup>3</sup>/d·m rzeki. W dolinie rzecznej drenaż warstwy wodonośnej odbywa się także poprzez ewapotranspirację, szczególnie intensywną w rejonach płytko położonego zwierciadła wody podziemnej. W badaniach modelowych stwierdzono, że intensywność tego procesu wynosi średnio od 32,5 do 60,00 mm/r w wydzielonych hydrostrefach w rejonie KPN, głównie w pasach bagiennych, a rejonie Włocławka – 26,3 mm/r.

**PODSUMOWANIE**

Wartość zasilania infiltracyjnego stanowi kluczowy element w ocenie zasobów wód oraz stopnia zagrożenia ich jakości w hydrogeologicznej jednostce dolinnej. W dolinie Wisły ocenę zasilania infiltracyjnego oraz ewapotranspiracji wykonano przy zastosowaniu modelowania numerycznego, co umożliwiło określenie wielkości zasilania w wydzielonych podobszarach bilansowych, uzyskanie wartości średnich dla całego obszaru badań, przeprowadzenie obliczeń bilansowych i prognostycznych. Obliczenia wielkości zasilania infiltracyjnego oraz ewapotranspiracji poprzez rozwiązanie zadania odwrotnego było możliwe przy bardzo dokładnym rozpoznaniu rozkładu wysokości hydraulicznych, co warunkuje i uzasadnia monitoring stanów wód podziemnych.

Wielkość zasilania infiltracyjnego w dolinie Wisły jest szczególnie zróżnicowana w rejonie KPN w poszczególnych hydrostrefach, w których stwierdzono także znaczne różnice w głębokości położenia zwierciadła wody podziemnej. Średnie wartości szacowane dla całego obszaru są jednak zbliżone, wynoszą dla rejonu Włocławka ponad 110 mm/r, a w obszarze KPN – 79 mm/r.

Obliczenia bilansowe na modelach numerycznych pozwoliły na ocenę wielkości zasilania lateralnego ze strony wysoczyzny, stanowiącej „otoczenie” hydrogeologicznej jednostki dolinnej. W rejonie KPN dopływ lateralny stanowi 7% średniego zasilania infiltracyjnego, a w dolinie Wisły w rejonie Włocławka jest prawie równy zasilaniu infiltracyjnemu.

**LITERATURA**

- BARANIECKA D.M., KONECKA-BETLEY K., 1987 – Fluvial sediments of the Vistulian and Holocene in the Warsaw basin. *Geograph. Stud.*, **4**: 151–170.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.), 1990 – Mapa obszarów głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony, skala 1:500 000. AGH, Kraków.
- KROGULEC E., 1997 – Numeryczna analiza struktury strumienia filtracji w strefie krawędziowej poziomu błońskiego. Wyd. UW, Warszawa.
- KROGULEC E., 2004a – Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrodynamicznych. Wyd. UW, Warszawa.
- KROGULEC E., 2004b – Zasilanie wód podziemnych – wyniki badań modelowych. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Hydrogeologia*, **2729**: 121–128.
- KROGULEC E., ANDRZEJEWSKA A., 2005 – Zastosowanie automatycznych pomiarów stanów wód podziemnych w lokalnym systemie monitoringowym. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 12: 397–405.
- KROGULEC E., MARCINIAK M., 2003 – Badania laboratoryjne i terenowe współczynnika filtracji na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 11, cz. 1: 361–368.
- KROGULEC E., POMIANOWSKI P., KROGULEC P., 2003 – Results of geophysical research in the Kampinoski National Park area. *Ecohydrology & Hydrobiology*, **3**, 3: 267–272.
- KROGULEC E., SIKORSKA-MAYKOWSKA M., 2001 – Optymalne warunki dla projektowania monitoringu lokalnego wód podziemnych i powierzchniowych – na przykładzie Kampinoskiego Parku Narodowego. *Gospodarka Wodna*, **6**: 251–255.
- MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B., 1984 – Struktura bilansu wód podziemnych centralnego regionu niecki mazowieckiej. *Mat. Konferencji „Metody badań wód podziemnych, użytkowanie i ochrona. Tuczno*.
- McDONALD M., HARBAUGH A., 1988 – A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey. Washington.

## SUMMARY

The Vistula River valley forms a hydrogeological system recharged by the infiltration of precipitation as well as lateral inflow from the surrounding hydrogeological units. Infiltration recharge of the aquifer in the Vistula River valley is one of the main dynamic factors influencing groundwater circulation, water balance and groundwater vulnerability to contamination.

Evaluation of groundwater recharge and drainage has been carried out in the vicinity of the Kampinos National Park (KNP) and Włocławek with the application of numerical modelling, what allowed determining the intensity of these processes in selected hydrozones, obtaining mean values characterizing the entire area, as well as making balance calculations.

The results of modelling indicate that infiltration recharge may vary between particular parts of the water circulation system in the Vistula River valley. The value of infiltration recharge differs mainly in the particular hydrozones in the KNP area, and reaches 74.0–160.9 mm/y in dune belts, 10.5–43.9 mm/y in swamp zones, and 56.1–94.5 mm/y in the

Vistula River floodplain. The mean value of infiltration recharge for the entire KNP area attains 79 mm/y and is similar to the value of infiltration recharge from the Włocławek area, where it reaches just over 110 mm/y. Balance calculations on numerical models allowed evaluation the value of lateral inflow from the plateau that surrounds the hydrogeological valley unit. In the KNP, lateral inflow reaches 7% of the mean infiltration recharge, and in the Vistula River valley near Włocławek it is almost equal to infiltration recharge. The values of drainage of the aquifer by the Vistula River in both the study areas are similar; they reach 1.96 m<sup>3</sup>/d per 1 m of river in the KNP, whereas near Włocławek it attains 1.59 m<sup>3</sup>/d per 1 m of the river. In the river valley, drainage of the aquifer takes place seasonally through evapotranspiration that is particularly high in areas where the groundwater level is located at small depths. Modelling studies showed that the intensity of the process reaches an average of 32.5 to 60.0 mm/y in particular hydrozones of the KNP, whereas it does not exceed 30 mm/y near Włocławek.