

MARIUSZ KOSTECKI

REKONSTRUKCJA NATURALNYCH WARUNKÓW KRAŻENIA WÓD W DOLINIE RZECZNEJ Z WYKORZYSTANIEM NUMERYCZNYCH MODELI SYMULACYJNYCH

ZARYS TREŚCI

W niniejszym opracowaniu przedstawiono zastosowanie numerycznych modeli symulacyjnych do rekonstrukcji naturalnych warunków krążenia wód w dolinie rzecznej. W badaniach zastosowano program obliczeniowy SWPRN, na podstawie którego zbudowano modele numeryczne, uwzględniające m.in.: strukturę hydrogeologiczną badanego obszaru, wody powierzchniowe, parametry filtracyjne, lokalizację i wydajność studni. Uzyskane wyniki badań potwierdziły możliwość zastosowania modeli matematycznych do rozwiązywania skomplikowanych zagadnień z zakresu hydrogeologii i hydrologii, przy dowolnym poziomie dokładności, uzależnionym od stopnia rozpoznania obszaru filtracji i zastosowanego programu obliczeniowego.

WSTĘP

Opierając się na analogii między opisem matematycznym zjawisk fizycznych a opisem procesu filtracji, metody analogowe dały początek rozwojowi metod modelowania matematycznego, szczególnie w dziedzinie hydrogeologii. Konsekwencją stałego rozwoju i udoskonalania tego kierunku badawczego było pojawienie się numerycznych metod obliczeniowych, umożliwiających rozwiązywanie skomplikowanych zagadnień dotyczących ruchu wód w ośrodkach porowatych, bez konieczności wprowadzania zasadniczych uproszczeń w odwzorowaniu warunków przyrodniczych. Metoda ta znalazła zastosowanie głównie w badaniach obszarów ujęć wód podziemnych w zakresie bilansu wód, do określania wielkości zasobów, wyznaczania stref ochronnych, granic obszarów zasobowych, zasięgu oddziaływania eksploatacji lub też w ce-

lach prognostycznych, najczęściej dotyczących określenia warunków zasilania przy zwiększonej (zmienionej) eksploatacji ujęć. Na podstawie analizy zastosowań metody modelowania matematycznego w odwzorowaniu obiegu wody w złożonych układach hydrogeologicznych podjęto próbę zastosowania tej metody do zrekonstruowania naturalnych warunków krążenia wód w dolinie rzecznej.

METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Do badań wytypowano rejon ujęcia wody zlokalizowany w dolinie Warty w Krajkowie, ze względu na istnienie rozwiniętej sieci obserwacyjnej wód podziemnych i powierzchniowych, będącej podstawą monitorowania pracy ujęcia, bardzo dobre rozpoznanie struktur hydrogeologicznych, jak również istnienie materiałów archiwalnych za-

wierających wyniki pomiarów wód podziemnych oraz powierzchniowych tego rejonu z okresu sprzed eksploatacji ujęcia.

W procesie badawczym założono dwa etapy prac. Dysponując danymi pochodzącymi z pomiarów i obserwacji sieci monitoringowej ujęcia wody w Krajkowie, przystąpiono do realizacji pierwszej fazy badań, zakładającej odwzorowanie pola filtracji w warunkach eksploatacji ujęcia. Skonstruowany model matematyczny, wykorzystany do przeprowadzenia symulacji komputerowych i odwzorowania warunków eksploatacji ujęcia, posłużył w drugiej fazie badań do odwzorowania systemu krążenia wód w naturalnych warunkach filtracji w dolinie rzecznej w strefie ujęcia wody.

Wybór odpowiedniego programu symulacyjnego uwarunkowano założeniami, które umożliwiałyby:

- odwzorowanie struktury hydrogeologicznej z założoną dokładnością odpowiadającą poziomowi jej rozpoznania,

- precyzyjne odwzorowanie istniejącego układu wód powierzchniowych oraz infrastruktury technicznej ujęcia (studni pionowych, piezometrów, studni promienistej),

- analizę parametrów filtracyjnych aluwii rzecznych, uwarunkowanych eksploatacją ujęcia, z możliwością dokonania analizy parametrów filtracyjnych wzdłuż oraz na przekroju poprzecznym koryta rzecznej oraz w starorzeczach i niewielkich ciekach,

- odtworzenie istniejącego obecnie oraz pierwotnego układu starorzeczy oraz koryta Warty i określenie ich wpływu na kształtowanie układu hydrodynamicznego,

- odtworzenie, zgodnie z założeniami dla modelu matematycznego, stref kontaktu hydraulicznego lub jego braku między rzeką a wodami podziemnymi

dla dowolnego stanu wód powierzchniowych i podziemnych.

Zgodnie z powyższymi założeniami, do przeprowadzenia badań wybrano program należący do biblioteki programów komputerowych HYDRYLIB. Odwzorowanie i symulacje rejonu ujęcia brzegowego w Krajkowie zrealizowano, korzystając z programu symulacyjnego SWPRN (wersja 8.05). Algorytm obliczeniowy tych programów opierający się na metodzie iteracyjnej (Successive Over Relaxation) pozwala na bardzo precyzyjne określenie wielkości parametrów przyjętych do obliczeń (dane startowe), jak i otrzymanych wyników, rzędu 10^{-6} wielkości danego parametru na poziomie przyjętej jednostki czasu (doba lub godzina) i w odniesieniu do powierzchni elementarnego bloku obliczeniowego (ŚMIETAŃSKI 1972; EMSALLEM 1975; BRYLSKA, DĄBROWSKI, PRZYBYŁEK 1982).

Ze względu na występujące praktycznie w całym odwzorowanym polu filtracji dynamiczne zwierciadło wód podziemnych (eksploatacja ujęcia) przyjęto do obliczeń schemat filtracji ustalonej w warunkach naporowego zwierciadła wód podziemnych. Przyjęcie schematu obliczeniowego opierało się również na dokładnym rozpoznaniu przewodności hydraulicznej analizowanych poziomów wodonośnych, głównie na podstawie wyników próbnych pompowań, wykonanych w okresie eksploatacji ujęcia. Założono tym samym przeprowadzenie symulacji na modelach numerycznych poprzez realizację zadania odwrotnego, polegającego na odtworzeniu określonego położenia zwierciadła wody na podstawie korekty ściśle określonych parametrów filtracyjnych oraz warunków brzegowych (BRYLSKA, DĄBROWSKI, PRZYBYŁEK 1982).

Algorytm obliczeniowy zastosowanego programu bazuje na matematycznym opisie procesu filtracji zachodzącym

w ciągłym polu fizycznym, zgodnym z liniowym prawem filtracji Darcy:

$$V = -k \frac{\Delta H}{\Delta l}$$

gdzie V – prędkość filtracji [m/s], k – współczynnik filtracji [m/s], ΔH – różnica ciśnień piezometrycznych [m], Δl – droga filtracji [m].

Sam proces filtracji ustalonej w warunkach naporowych można przedstawić w postaci algebraicznej następująco:

$$\frac{\delta}{\delta x} = \left(k_x \cdot m \frac{\delta H}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_y \cdot m \frac{\delta H}{\delta y} \right) + q_{\text{pionowe}} = 0$$

przy założeniu $\frac{\delta H}{\delta t} = 0$.

Uwzględniając izotropowy charakter warstwy wodonośnej, powyższe równanie można przedstawić następująco:

$$k \cdot m \left[\frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta H}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\delta H}{\delta y} \right) \right] = q_{\text{pionowe}}$$

i dalej

$$k \cdot m \left(\frac{\delta^2 H}{\delta^2 x} + \frac{\delta^2 H}{\delta^2 y} \right) = q_{\text{pionowe}}$$

gdzie $k \cdot m = T$ – przewodność hydrauliczna warstwy [m²/s], k – współczynnik filtracji [m/s], m – miąższość warstwy wodonośnej [m]

W konstrukcji stacjonarnych modeli symulacyjnych (dla programów obliczeniowych biblioteki HYDRYLIB) dla warunków filtracji ustalonej stosuje się następujące warunki brzegowe:

– warunek brzegowy I rodzaju (Dirichleta) – ciśnienie w dowolnym punkcie na brzegu obszaru nie zmienia się w czasie, funkcja $H' = f(x, y, z) = \text{const.}$; bloki z warunkami I rodzaju umieszczone są na granicy dyskretyzowanego obszaru,

– warunek brzegowy II rodzaju (Neumanna): przepływ na brzegu w dowolnym punkcie jest stały, a więc funkcja

postaci $Q = f(x, y, z) = \text{const.}$; bloki modelu matematycznego z warunkami II rodzaju służą na przykład do odwzorowania wielkości infiltracji, jak również wielkości eksploatacji studni – w tym przypadku bloki te są oznaczane jako odpowiedni typ warunków II rodzaju (infiltracja „ujemna”),

– warunek brzegowy III (Dirichleta-Neumanna) – interpretowany jako przepływ o natężeniu będącym funkcją zadanego ciśnienia $Q = f(H)$ dla $H = \text{const.}$; za pomocą bloków siatki dyskretyzacyjnej z warunkami III rodzaju odwzorowuje się wody powierzchniowe w formie rzek lub jezior; w blokach tych symuluje się efekt filtracji (drenaż lub infiltracja) wód poprzez warstwę słabo przepuszczalną do warstwy wodonośnej.

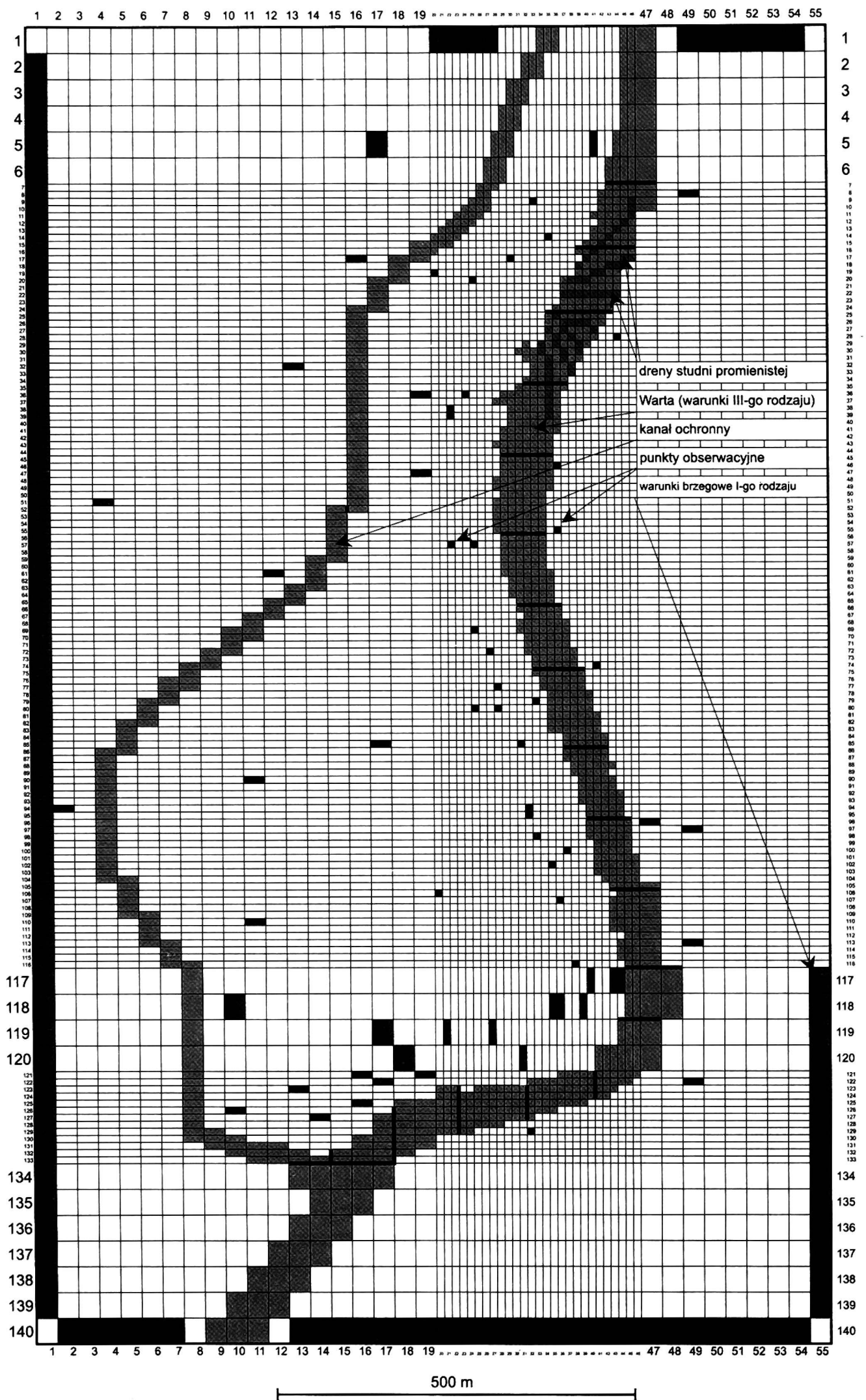
Parametry warstwy słabo przepuszczalnej określa wielkość TRP, wyrażająca jednostkowe przesączenie przez warstwę osadów dennych (FLISOWSKI, WIECZYŃSKI 1979; ŚMIETAŃSKI 1972).

Matematyczna interpretacja parametru TRP przy zastosowaniu w modelowaniu matematycznym jest następująca:

$$\text{TRP} = \frac{F}{x^2} \cdot \frac{k'}{m'}$$

gdzie F – powierzchnia czynna rzeki w danym bloku obliczeniowym, x^2 – powierzchnia elementarnego bloku obliczeniowego, k' – współczynnik filtracji osadów słabo przepuszczalnych, m' – miąższość warstwy słabo przepuszczalnej.

Istotnym kryterium doboru programu komputerowego była konieczność zastosowania odpowiedniego kroku siatki dyskretyzacyjnej oraz liczba węzłów obliczeniowych, ponieważ maksymalna liczba elementarnych bloków (węzłów obliczeniowych) modelu matematycznego, ograniczona algorytmem obliczeniowym programu komputerowego, w powiązaniu z przyjętym krokiem siatki



Rys. 1. Układ dyskretyzacyjny modelu matematycznego – warstwa I, ujęcie wody w Krajkwie – stan z września 1993 r.

Fig. 1. Digitizing system of a mathematical model – layer I, water intake in Krajkwow – state of September 1993

wpływa decydująco na możliwość odwzorowania obszaru o powierzchni odpowiadającej przyjętym założeniom. Założeniem podstawowym było bowiem maksymalnie dokładne odwzorowanie wszystkich elementów mających wpływ na przebieg procesu filtracji w badanym obszarze oraz możliwość pełnej kontroli i analizy wartości elementów obliczeniowych w dowolnym punkcie modelu matematycznego. W szczególności zwrócono uwagę na dokładność odwzorowania elementów infrastruktury technicznej ujęcia, mających istotny wpływ na kształtowanie pola filtracji: studni, piezometrów, zbiorników wód powierzchniowych, a przede wszystkim rzeki Warty oraz naturalnych zbiorników wodnych (starorzeczy).

Wybór wariantu programu obliczeniowego SWPRN podyktowany był również koniecznością odwzorowania warstwy wodonośnej w układzie dwuwarstwowym, ze względu na sposób ujmowania warstwy wodonośnej (studnie pionowe oraz studnia promienista) w powiązaniu z oddziaływaniem Warty na układ filtracji wód w obrębie doliny rzecznej.

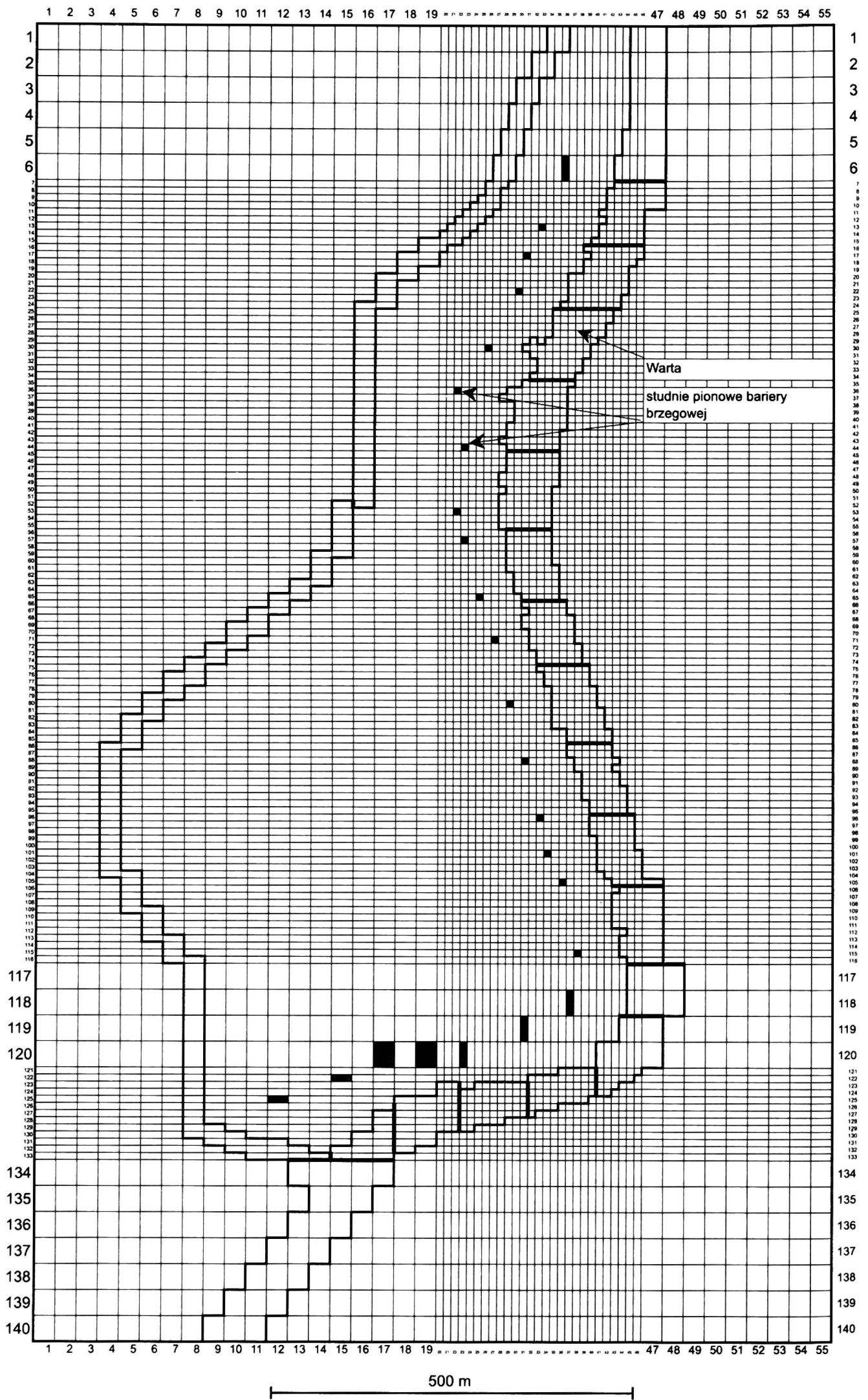
Badany obszar zdyskretyzowano siatką prostokątną, składającą się z 7700 (55 kolumn, 140 wierszy) elementarnych pól obliczeniowych o wymiarach 10×10 , 10×30 , 10×40 oraz 30×40 m, odwzorowując obszar o powierzchni ponad 2 km^2 (1110×1870 m) (rys. 1). Mając na uwadze znaczenie zarówno rzeki Warty, jak i eksploatacji studni pionowych bariery brzegowej dla kształtowania pola filtracji na wybranym obszarze, układ siatki dyskretyzacyjnej przyjęto w ten sposób, aby zagęszczenie bloków obliczeniowych o najmniejszym kroku (10×10 m) przypadało zarówno w obrębie koryta Warty, jak i bariery studni pionowych (rys. 2). Krok siatki dyskretyzacyjnej zwiększono w kierunku granicy modelu maksymalnie do 40 m w ce-

lu uniknięcia błędów wynikających z procedury obliczeniowej, tzn. aby nie przekroczyć dopuszczalnego przyrostu wielkości sąsiadujących bloków obliczeniowych (GURWIN, SZCZEPAŃSKI, WAŚSIK 1994).

Identyfikacja modelu matematycznego była prowadzona na podstawie rzędnych zwierciadła wód podziemnych dla wybranych punktów obserwacyjnych (piezometrów) odwzorowanych na modelu. W początkowej fazie weryfikacji modelu zmianom poddano parametry filtracyjne osadów w obrębie koryta Warty. Zmian tych dokonywano poprzez dobieranie wartości metodą kolejnych przybliżeń wartości parametru TRP odpowiednio dla Warty, jak i dla kanału ochronnego. W fazie tarowania modelu symulowano również wpływ infiltracji efektywnej w całym analizowanym obszarze. Kolejne symulacje i proces kalibracji modelu przeprowadzono, dokonując zmian warunków filtracyjnych osadów dennych w obrębie koryta Warty i kanału ochronnego – redukując względnie zwiększając wartość parametru TRP.

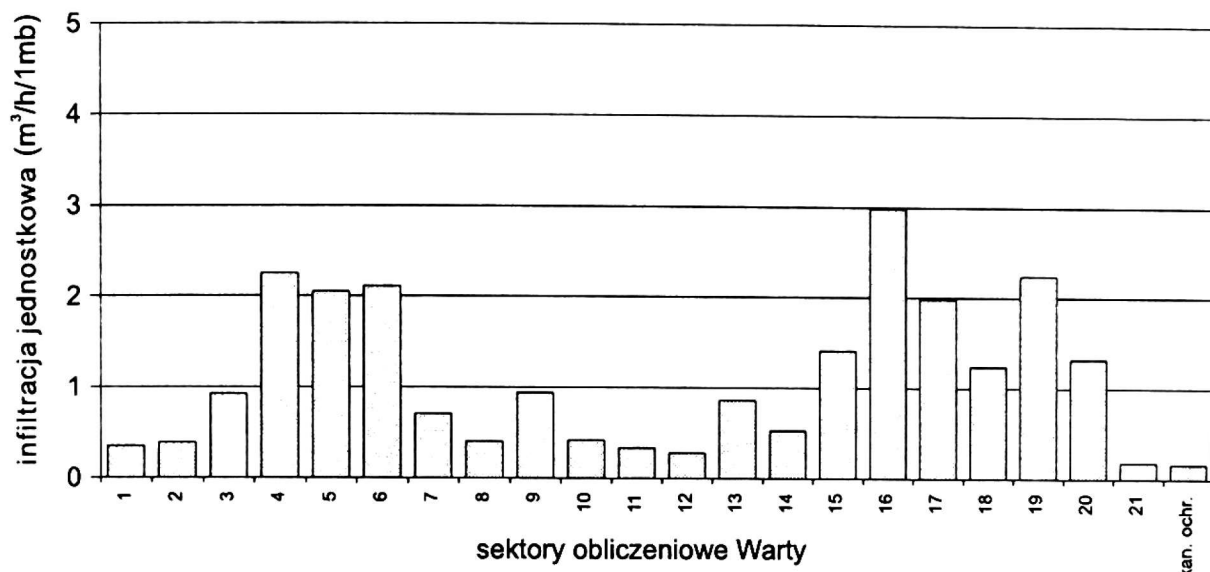
W celu uzyskania porównywalnych wyników oraz dla uproszczenia procesu obliczeniowego i weryfikacji danych wydzielono na całej długości Warty oraz kanału ochronnego sektory (ciągi bloków elementarnych), w obrębie których dokonywano zmian parametru TRP. Podziału na sektory dokonano na podstawie analizy rozmieszczenia punktów obserwacyjnych (piezometrów prawy i lewostronnych wzdłuż koryta Warty) oraz elementów infrastruktury ujęcia (studnie pionowe oraz drenaże studni promienistej).

W efekcie przeprowadzonych symulacji zidentyfikowano wartości współczynnika filtracji pionowej osadów pod dnem Warty oraz kanału ochronnego w warunkach eksploatacji ujęcia. War-



Rys. 2. Układ dyskretyzacyjny modelu matematycznego – warstwa II, ujęcie wody w Krajkowie – stan z września 1993 r.

Fig. 2. Digitizing system of a mathematical model – layer II, water intake in Krajkowo – state of September 1993



Rys. 3. Infiltracja wód Warty oraz kanału ochronnego w okresie eksploatacji ujęcia. Wynik obliczeń komputerowych – stan eksploatacji ujęcia z 1993 r.

Fig. 3. Infiltration of the Warta waters and of the protective channel while exploiting. The intake results of computer calculations – intake exploitation state of 1993

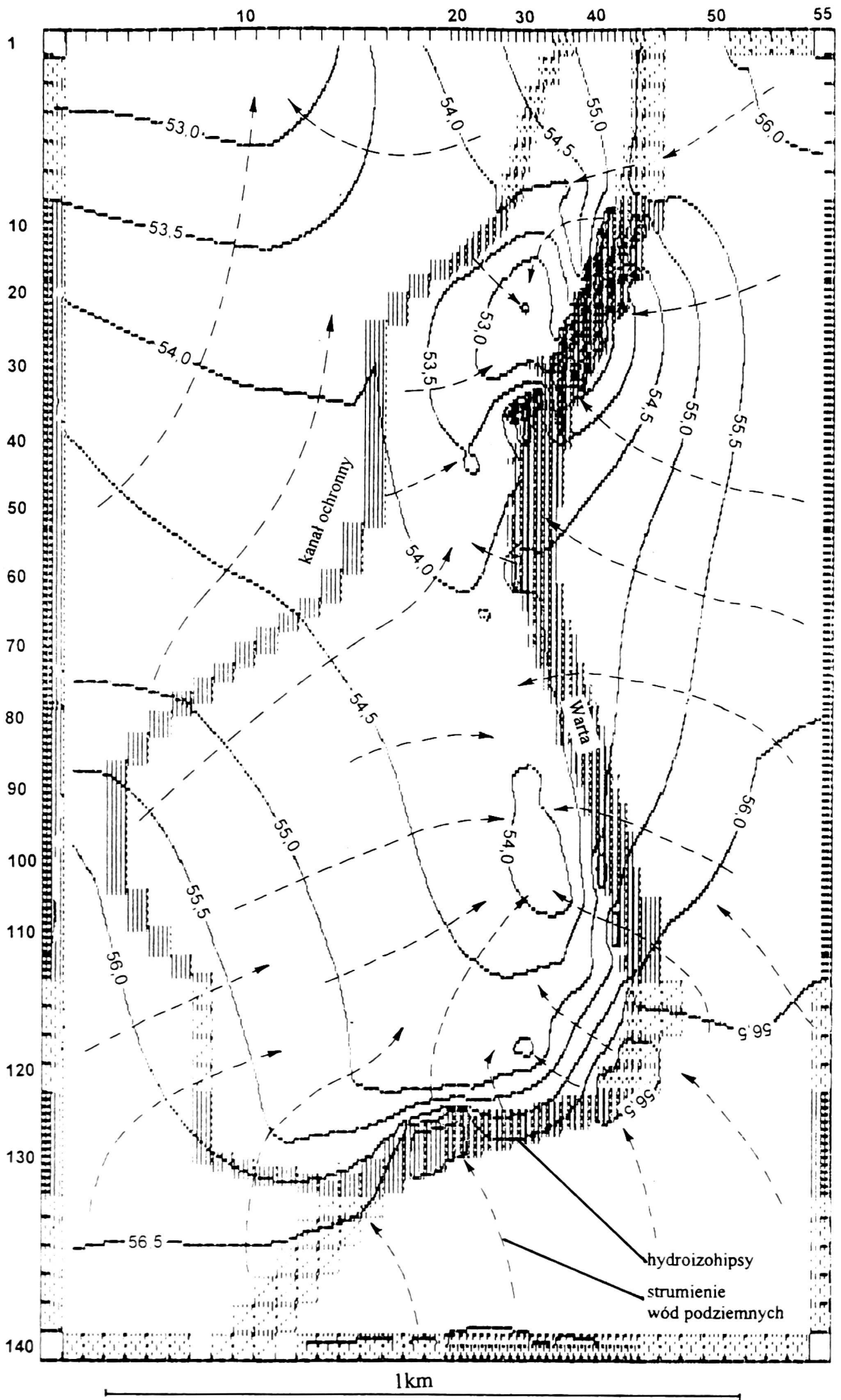
tości parametru TRP, wyrażonego za pomocą (przedstawionej powyżej) formuły, przeliczono na wartość współczynnika filtracji pionowej osadów dennych k' [m/h]. Proces tarowania modelu numerycznego uznano za zakończony w momencie uzyskania zgodności w rozkładzie rzędnych zwierciadła wód podziemnych pomierzonych w terenie i obliczonych na modelu w zakresie $\pm 0,2$ m.

Zgodnie z przyjętymi założeniami schematyzacji modelu matematycznego wartości przepływów międzywarstwowych, naliczające się w zestawieniu bilansowym dla modeli dwuwarstwowych, bilansowały się do wartości poniżej $1 \text{ m}^3/\text{h}$ i wynosiły dla warstwy górnej (pierwszej) $+0,7 \text{ m}^3/\text{h}$, natomiast dla warstwy dolnej (drugiej) błąd wynosił poniżej $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Wyznaczona na podstawie obliczeń modelowych wartość infiltracji na poziomie około $0,4\%$ w stosunku do wielkości eksploatacji ujęcia odpowiada infiltracji efektywnej na poziomie $9,3\%$ (w stosunku do średniej wartości sumy rocznej opadów z wielolecia). Procentowy udział wód Warty w zasilaniu warstwy wodonośnej wyniósł około 64% wielkości eksploatacji

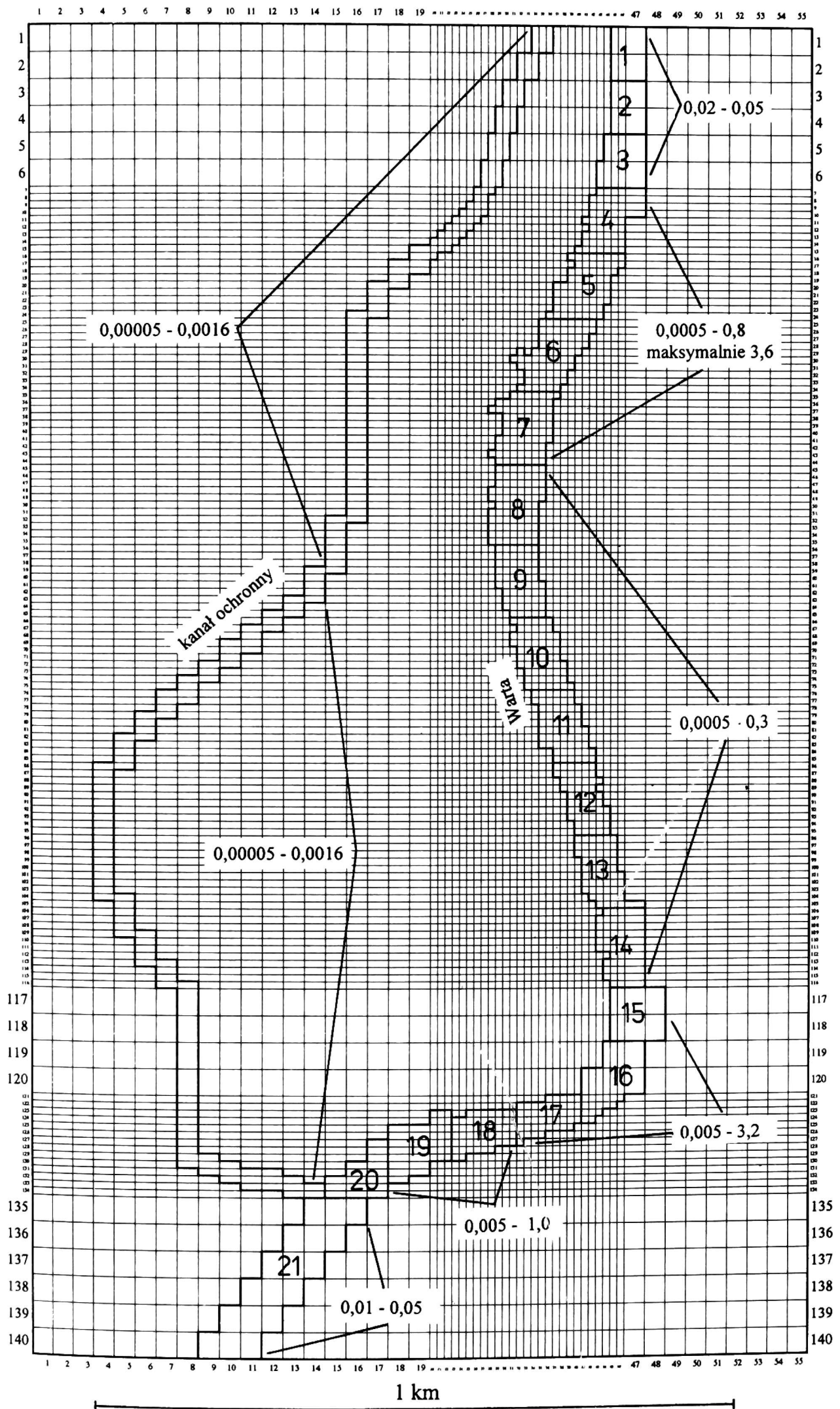
ujęcia brzegowego, studni bariery brzegowej oraz studni promienistej łącznie.

Dla wytarowanego modelu na stan eksploatacji z września 1993 r. układ hydroizohips oraz kierunki głównych strumieni wód podziemnych w polu filtracji ujęcia wody w Krajkwie przedstawiono na rys. 4. Badania modelowe wykazały, że w warunkach eksploatacji ujęcia (wartości przeciętne w sektorach obliczeniowych) ≈ 1 metra bieżącego koryta rzeki infiltruje do warstwy wodonośnej od $0,12 \text{ m}^3/\text{h}$ (strefy o najniższych wartościach współczynnika filtracji pionowej osadów rzecznych) do $2,9 \text{ m}^3/\text{h}$, a lokalnie w poszczególnych blokach, w przeliczeniu na 1 metr bieżący, do $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Przeciętna ilość infiltrującej wody z koryta Warty na 1 km biegu rzeki (na wysokości ujęcia) wynosi $1072 \text{ m}^3/\text{h}$. Przyjmując wartość średnią, odpowiada to ilości $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Wytarowane wartości współczynnika filtracji pionowej osadów dennych przedstawiono na rys. 5.

Dla minimalnych wartości współczynnika filtracji pionowej, obliczonych na modelu matematycznym, infiltracja wód Warty do warstwy wodonośnej na odcin-



Rys. 4. Układ hydroizohips na modelu matematycznym – stan z września 1993 r.
 Fig. 4. System of hydroisohips on the mathematical model – state of September 1993



Rys. 5. Wytarowane wartości współczynnika filtracji pionowej [m/h]. Warta i kanał ochronny

Fig. 5. Tared values of the vertical filtration index [m/h]. The Warta and the protective channel

Tabela 1. Bilans krążenia wód w strefie ujęcia (stan eksploatacji z września 1993 r.)

Table 1. Water circulation balance in the intake zone (exploitation state of September 1993)

Składniki bilansowe	[m ³ /h]	Procentowy udział w bilansie całkowitym
Eksploatacja studni bariery brzegowej	2328	75,3
Eksploatacja studni promienistej	762	24,7
Infiltracja z Warty	1983	64,2
Infiltracja z kanału	272	8,8
Infiltracja efektywna	11	0,4
Dopływ gruntowy	824	26,6

ku 1 km wynosi 120 m³/h (0,03 m³/s). Wartości maksymalne wyniosły odpowiednio 6200 m³/h, co odpowiada 1,72 m³/s z jednego kilometra biegu rzeki.

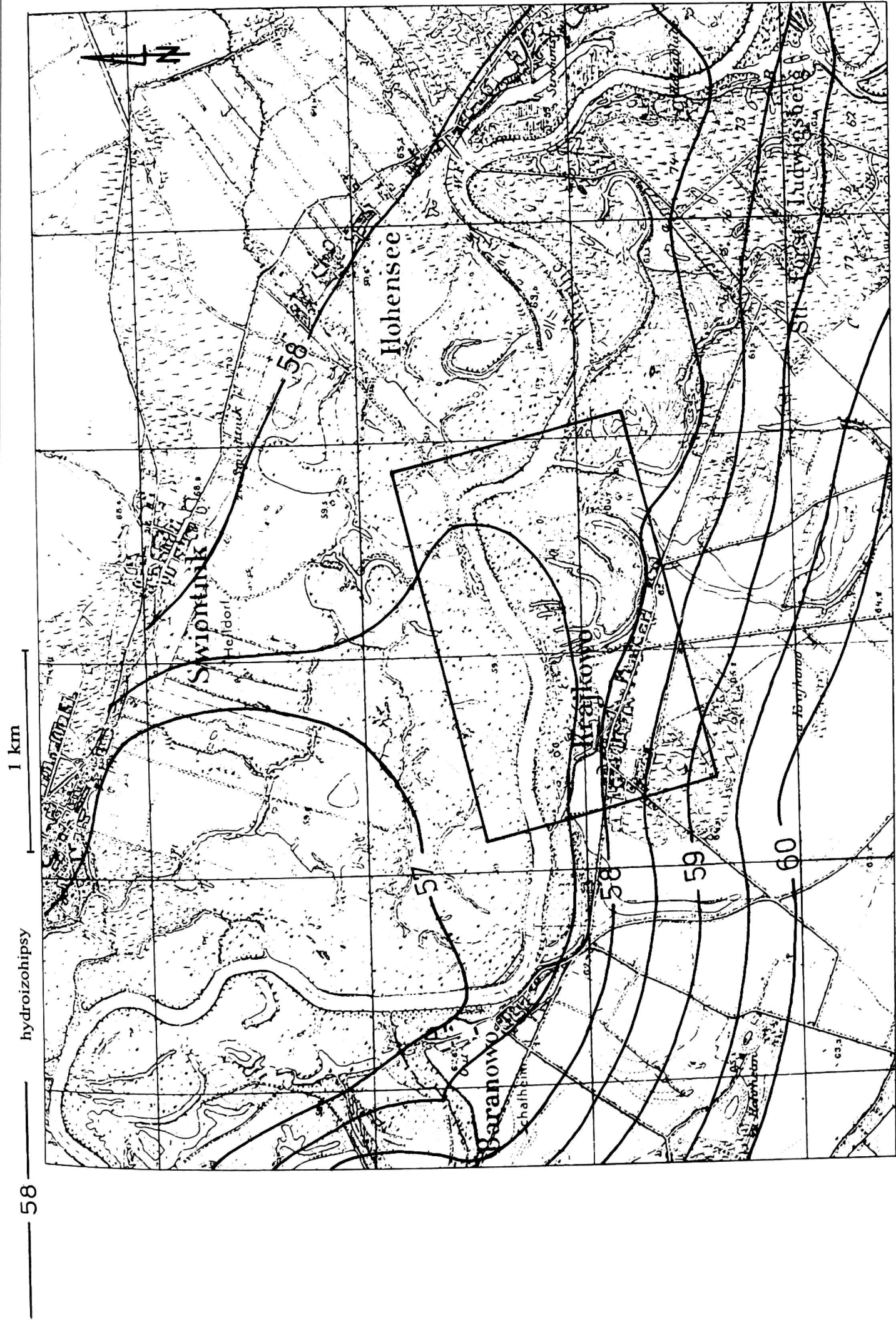
Model matematyczny systemu wodonośnego rejonu ujęcia Krajkowo, udokumentowany kompleksowo oraz poddany weryfikacji na drodze wielokrotnych symulacji, stworzył możliwość analizy strukturalnej składników bilansowych system krążenia wód powierzchniowych i podziemnych. Stanowił również podstawę do dalszych badań symulacyjnych, polegających na odwzorowaniu układu krążenia wód powierzchniowych i podziemnych w warunkach naturalnych jako udokumentowany i rozpoznany układ pod względem hydrodynamicznym, a przede wszystkim hydrostrukturalnym.

Podstawą do przyjęcia struktury modelu matematycznego za wiarygodny był poziom identyfikacji modelu matematycznego, wynikający z porównania rzędnych zwierciadła wód podziemnych i powierzchniowych uzyskanych z obliczeń na modelu matematycznym z wartościami pomierzonymi w terenie. Uzyskany na podstawie obliczeń rozkład ciśnień piezometrycznych różnił się od wartości pomierzonych w terenie w zakresie od kilku do kilkunastu, a tylko w kilku punktach kontrolnych mak-

symalnie kilkudziesięciu centymetrów. Dało to podstawę do stwierdzenia, że model został odwzorowany z zakładaną dokładnością, na poziomie kilku procent, przy uwzględnieniu wielkości parametrów bilansowych i ogólnej ilości wody biorącej udział w systemie krążenia w odtworzonym fragmencie systemu dolinnego.

Na podstawie materiałów archiwalnych sporządzono mapę hydroizohips terenu, na którym obecnie zlokalizowane jest brzegowe ujęcie wody w Krajkowie. Materiały te oraz treść zawarta na mapach topograficznych z lat 1888 oraz 1942 pozwoliły na odtworzenie warunków hydrograficznych oraz ukształtowania zwierciadła wód podziemnych z okresu sprzed eksploatacji ujęć w rejonie Krajkowa, stanowiąc jednocześnie podstawowe źródło danych do weryfikacji wyników symulacji komputerowych (rys. 6).

Odwzorowanie rejonu ujęcia w Krajkowie dla warunków naturalnych wymagało wprowadzenia zmian, głównie w zakresie odwzorowania lokalizacji zbiorników wód powierzchniowych (starorzeczy) istniejących w ówczesnym okresie. Ponadto konieczne było wyeliminowanie i zastąpienie w węzłach siatki dyskretyzacyjnej bloków odwzorowujących eksploatację studni blokami



Rys. 6. Mapa odtworzonej powierzchni piezometrycznej. Stan z lipca 1942 r.

Fig. 6. Map of reconstructed piezometric surface. State of July 1942

z zadanymi (dla warunków naturalnych) warunkami brzegowymi II rodzaju. Węzły siatki dyskretyzacyjnej odwzorowujące eksploatację studni zastąpiono w przypadku lokalizacji drenów studni promienistej blokami z warunkami III rodzaju, natomiast studni pionowych odwzorowanych w warstwie II blokami z warunkami II rodzaju.

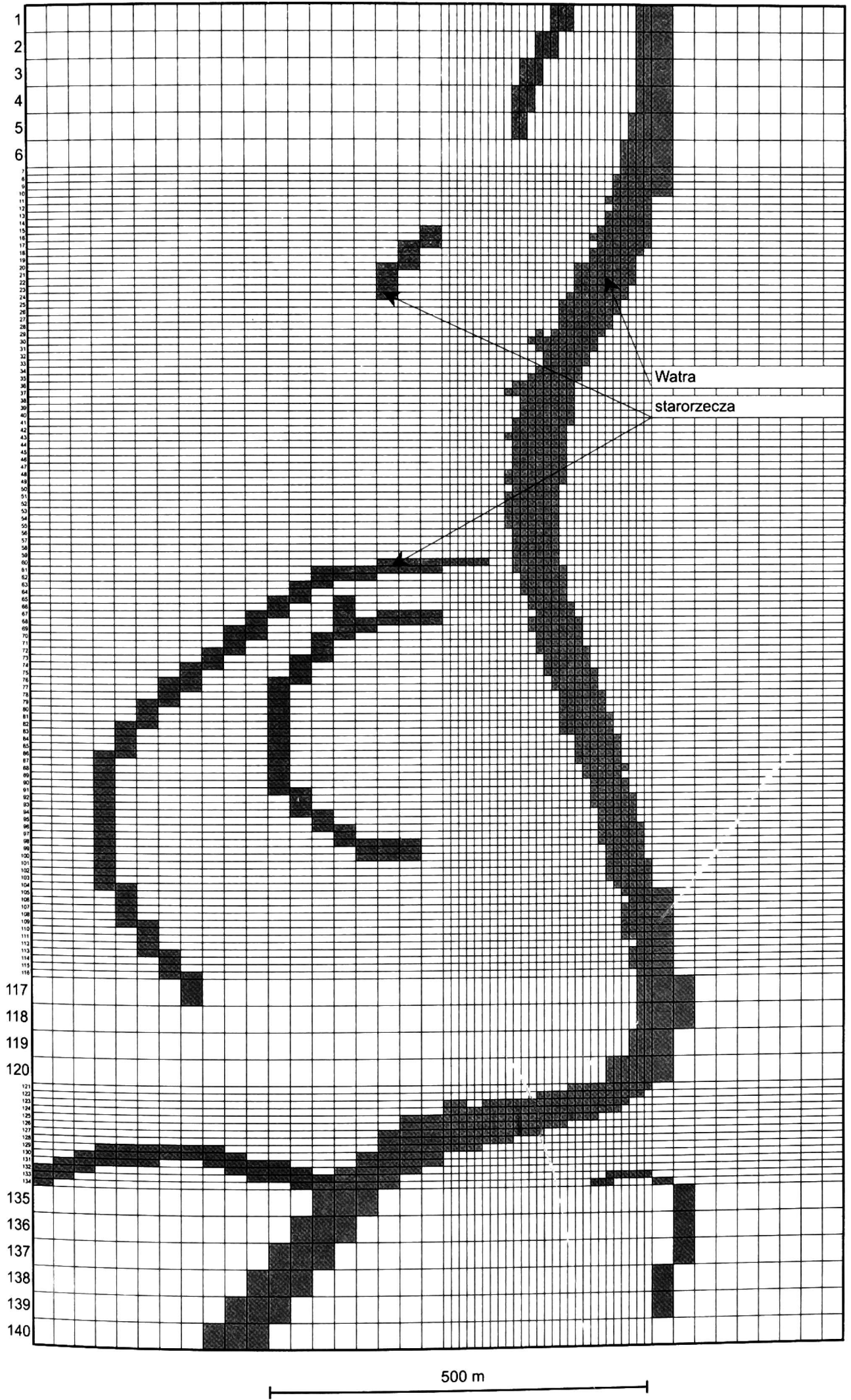
Na bazie przyjętego schematu dyskretyzacyjnego, sporządzonego dla ujęcia w Krajkowie na stan eksploatacji z 1993 r., za pomocą bloków z warunkami brzegowymi III rodzaju odwzorowano układ zbiorników wód powierzchniowych (starorzeczy) oraz układ koryta Warty (rys. 7). Przyjęto jednocześnie parametry hydrogeologiczne warstwy wodonośnej z wytarowanego modelu dla stanu eksploatacji ujęcia z 1993 r. Zawarte w materiałach archiwalnych dane, po zweryfikowaniu, pozwoliły na określenie względnego położenia zwierciadła wód w starorzeczach oraz stanów wód Warty na wysokości ujęcia w Krajkowie, który miał miejsce w lipcu 1942 r., a który kształtował się na poziomie 57,10 m n.p.m. W granicach modelu matematycznego sporządzonego dla warunków występujących w lipcu 1942 r. odwzorowano zasięg starorzeczy o łącznej powierzchni 73 300 m².

Zakładając wariant symulacji w warunkach szybszej reakcji stanów wód rzecznych w odniesieniu do zmian piezometrycznych w strefie krawędziowej doliny rzecznej (na granicy modelu) do obliczeń przyjęto układ bloków z warunkami brzegowymi I rodzaju, rozmieszczonymi na granicy modelu matematycznego. Uzyskano w ten sposób, w warunkach symulacji modelu stacjonarnego, możliwość analizy układu hydrodynamicznego przy założeniu wolniejszej reakcji stanów wód gruntowych na zmiany stanów wód rzecznych. Z punktu widzenia możliwości

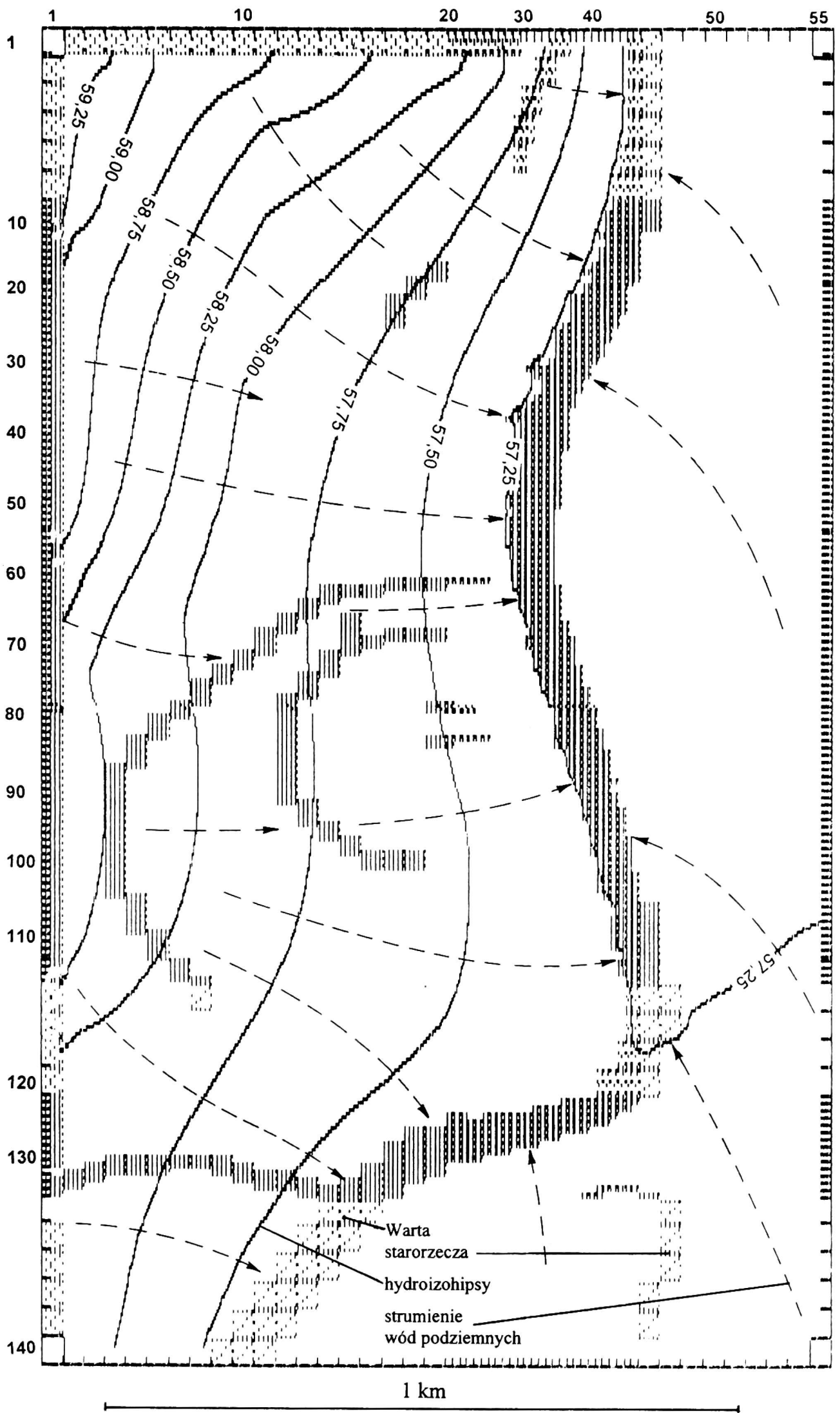
odwzorowania dynamicznego procesu filtracji na bazie modeli stacjonarnych koncepcję tę uznano za odwzorowującą zmieniające się warunki hydrologiczne w sposób najbardziej zbliżony do warunków naturalnych. Zachowanie na granicy modelu bloków z warunkami I rodzaju dało efekt „podparcia” ciśnień piezometrycznych na określonym poziomie względem stanów wód rzeki Warty. Zabieg ten miał na celu uzyskanie, w warunkach symulacji stacjonarnej, efektu w postaci reakcji układu hydrodynamicznego maksymalnie zbliżonych do tych, które zachodzą w warunkach naturalnych z jednoczesną możliwością dokonywania zmian warunków hydrologicznych przy zachowaniu pozostałych parametrów modelu matematycznego. Analizy wielkości infiltracji wód rzecznych do warstwy wodonośnej dokonano wzdłuż modelowanego odcinka rzeki oraz na przekrojach poprzecznych koryta rzecznej, w strefach, gdzie stwierdzono występowanie osadów o zróżnicowanej wartości współczynnika filtracji pionowej. W celu uzyskania porównywalnych wyników w efekcie obliczeń numerycznych zachowano układ dwuwarstwowy modelu matematycznego, przy odwzorowaniu naturalnych (niewymuszonych) warunków filtracji wód.

Pozostałe parametry modelu matematycznego przyjęto z odwzorowania stanu eksploatacji z 1993 r., mając na celu uzyskanie informacji (na drodze tarowania modelu poprzez rozwiązanie zadania odwrotnego) dotyczących zakresu zmian parametrów filtracyjnych osadów dennych Warty, starorzeczy oraz parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej.

W pierwszym etapie na modelu matematycznym odwzorowano warunki hydrostrukturalne występujące w rejonie Krajkowa według odtworzonych na podstawie danych archiwalnych, do-



Rys. 7. Układ dyskretyzacyjny modelu matematycznego – warstwa I, warunki naturalne – 1942 r.
Fig. 7. Digitizing system of mathematical model – layer I, natural conditions – July 1942



Rys. 8. Układ hydroizohips na modelu matematycznym. Stan naturalny – lipiec 1942 r.
 Fig. 8. System of hydroisohips on the mathematical model. Natural state – July 1942

tyczących warunków hydrologicznych z 1942 r., przy stanie Warty 57,10 m n.p.m. Jest to stan rzeki przypadkowo w pełni korespondujący ze stanami wód Warty z września 1993 r., który wynosił 57,06 m n.p.m. Stan wód Warty 57,10 m n.p.m. mieści się w górnej strefie stanów niskich dla profilu wodowskazowego zlokalizowanego na analizowanym odcinku rzeki.

Etap drugi obejmował kalibrację parametrów modelu matematycznego drogą kolejnych przybliżeń w celu uzyskania maksymalnej zgodności wyników obliczeń matematycznych z danymi początkowymi dla symulowanych warunków naturalnych.

W efekcie odwzorowano powierzchnię piezometryczną w rejonie ujęcia wody w Krajkowie dla warunków naturalnych z lipca 1942 r. (rys. 8).

Do przeprowadzenia symulacji komputerowych wykorzystano parametry wytarowanego modelu numerycznego rejonu ujęcia w Krajkowie dla stanu z 1993 r., po wprowadzeniu cytowanych wcześniej modyfikacji parametrów modelu matematycznego. Stopień identyfikacji modelu matematycznego weryfikowano w trakcie symulacji komputerowych na podstawie rozkładu wartości ciśnień w powierzchni piezometrycznej według stanu z lipca 1942 r., odtworzonej m.in. na podstawie kartograficznych materiałów archiwalnych. Powierzchnię tę odwzorowano z zakładaną dokładnością, z odchyleniem $\pm 0,2$ m.

Odtworzony na podstawie symulacji numerycznych układ hydrodynamiczny wskazuje w sposób jednoznaczny, że cały symulowany fragment Warty (w warunkach naturalnych) zachowuje charakter rzeki drenującej.

Drenaż Warty w przeliczeniu na 1 metr biegnący rzeki wynosił od $0,12 \text{ m}^3/\text{h}$ do $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Najwyższe wartości drenażu stwierdzono na zakolach rzeki, nato-

miast wartości najniższe na tych odcinkach, których przebieg pokrywa się z geometrycznym przedłużeniem osi starorzeczy (w układzie poprzecznym do koryta rzeczno). Konieczność wprowadzenia wyższych wartości parametru TRP na tych odcinkach rzeki w stosunku do pozostałych jej fragmentów jednoznacznie wskazuje miejsca występowania osadów charakteryzujących się niską wartością współczynnika filtracji. Prawdopodobnie sytuacja ta spowodowana jest występowaniem w osadach pod dnem rzeki oraz w strefie brzegowej sedymentów zastoiskowych z dawnych starorzeczy Warty. Wytarowane wartości współczynnika filtracji pionowej dla osadów dennych Warty mieszczą się w zakresie od $0,1 \text{ m/h}$ do maksymalnie $3,2 \text{ m/h}$ (w poszczególnych blokach obliczeniowych).

Wszystkie odwzorowane na modelu starorzecza mają charakter zbiorników infiltracyjnych. Stosunkowo niewielka ilość wód infiltrujących z tych zbiorników zdeterminowana jest występowaniem osadów zastoiskowych o niskich parametrach filtracyjnych, co znalazło swoje odzwierciedlenie w wytarowanych na modelu wartościach parametru TRP, za pomocą którego odwzorowano jednostkowe natężenie przesączania przez osady denne. Na podstawie przeprowadzonych symulacji i uzyskanych tą drogą wyników stwierdzono, że osady denne starorzeczy charakteryzują się niskimi parametrami współczynnika filtracji pionowej i wynoszą przeciętnie $0,0002 \text{ m/h}$. Porównując te wyniki z wartościami otrzymanymi z obliczeń modelowych dla kanału ochronnego na ujęciu w Krajkowie (przy stanie eksploatacji z września 1993 r.), okazuje się, że są to wartości zbliżone. Wartości te uznano za odpowiadające parametrom filtracyjnym osadów dennych występujących w starorzeczach w warunkach

Tabela 2. Bilans krążenia wód w warunkach naturalnych przy stanach niskich wód Warty
Table 2. Water circulation balance in natural conditions at low water levels of the Warta

Składniki bilansowe	[m ³ /h]	Procentowy udział w bilansie całkowitym
Drenaż Warty	377	100%
Infiltracja ze starorzeczy	17	4,5
Infiltracja efektywna	21	5,6
Dopływ gruntowy	339	89,9

naturalnej kolmatacji osadów, charakterystycznych dla starorzeczy w dolinie rzeki Warty w środkowym jej biegu.

Wyniki obliczeń na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych w zakresie podstawowych składników bilansowych modelowanego obszaru przedstawiono w tabeli 2.

Gdy bierze się pod uwagę wielkość składników bilansowych, najistotniejszym elementem jest drenaż Warty. W przeliczeniu na wielkości modułowe, na 1 km biegu rzeki przypada ponad 171 m³/h wody pochodzącej z drenażu warstwy wodonośnej (długość odwzorowanego na modelu odcinka Warty wynosi 2200 m).

Uwzględniając specyfikę algorytmu obliczeniowego (liczba przyjętych do obliczeń parametrów w modelu dwuwarstwowym) wykorzystanego programu SWPRN oraz przyjmując wielkość drenażu Warty na poziomie 377 m³/h jako 100%, można stwierdzić, że w drenażu całkowitym rzeki 89,9% przypada na dopływ gruntowy spoza granicy modelowanego obszaru.

W trakcie prowadzonych symulacji nie stwierdzono konieczności wprowadzenia stref o zróżnicowanej infiltracji efektywnej w całym analizowanym obszarze. Uzyskana z obliczeń na modelu matematycznym całkowita wielkość infiltracji 21 m³/h odpowiada 17,6% zasilania warstwy wodonośnej z opadów atmosferycznych (infiltracja efektywna).

Tak więc, mając na uwadze przedstawione wyniki badań uzyskane w efekcie przeprowadzonych symulacji, wydaje się, że osiągnięto cel w postaci odwzorowania powierzchni piezometrycznej oraz rozpoznania warunków hydrologicznych i hydrogeologicznych występujących w rejonie Krajkowa w lipcu 1942 r., a tym samym założonych na wstępie możliwości zastosowania numerycznych modeli matematycznych do odwzorowania naturalnych warunków krążenia wód w obrębie doliny rzecznej. Numeryczne modele symulacyjne, znajdujące obecnie zastosowanie głównie w badaniach obszarów ujęć wód podziemnych do celów prognostycznych oraz bilansowych, z powodzeniem wykorzystano do odwzorowania warunków krążenia wód w dolinie rzecznej pod wpływem czynników naturalnych.

LITERATURA:

- BRYLSKA E., DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J., 1982: Sposób odwzorowania warunkami brzegowymi regionalnych stref drenażu. [W:] Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej. Zeszyty Nauk. Politechniki Krakowskiej, 19, 5–14.
- EMSELLEM Y., 1975: Modele matematyczne w hydrogeologii (tłum. z franc.). Wyd. Komb. Geol. Zachód, Poznań.
- FLISOWSKI J., WIECZYSTY A., 1979: Analogowe dyskretne modelowanie ujęć wody podziemnej. Kombinat Geolog. Zachód, Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- GURWIN J., SZCZEPAŃSKI J., WAŚIK M., 1994: Opis programu Modflow wykorzystanego w regional-

nych badaniach hydrogeologicznych. [W:] Bilansowanie zasobów wodnych w dorzeczu Odry. Mat. I Symp. Nauk.-Techn. Zeszyty Nauk. AR we Wrocławiu, 248, 125-134.

ŚMIETAŃSKI Z., (red. Brylska E., Dąbrowski S., Pleczyński J., Przybyłek J., Szczepański A.), 1972: Modelowanie filtracji wód podziemnych w rejonie ujęć wodnych. Wyd. Geol., Warszawa.

Recenzent: prof. dr hab. Alfred Kaniecki

*Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej
Instytut Geografii Fizycznej
i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu*

RECONSTRUCTION OF NATURAL CONDITIONS OF WATER CIRCULATION IN A RIVER VALLEY USING DIGITAL SIMULATION MODELS

Summary

The aim of the paper is to present application of digital simulation models for the reconstruction of natural conditions of water circulation in a river valley. The calculating program SWPRN, used in the research, was the basis for the formation of digital models considering: hydrogeological structure of the studied area, surface waters, filtration

parameters, location and the well discharge. The obtained results confirmed the possibility of application of mathematical models to solve complex problems of hydrogeology and hydrology of any level of precision, which depends on the degree of the infiltration area recognition and on the applied calculating program.