

IDENTYFIKACJA SYSTEMU KRĄŻENIA WÓD PODZIEMNYCH NA WYSPIE WOLIN

IDENTIFICATION OF GROUNDWATER FLOW SYSTEM OF THE WOLIN ISLAND

JACEK GURWIN¹, ARKADIUSZ KRAWIEC²

Abstrakt. W pracy przedstawiono wyniki badań modelowych i geofizycznych z obszaru wyspy Wolin. Wyniki obliczeń numerycznego modelu filtracji wykazały, że zasilanie wód podziemnych zachodzi głównie w północnej i centralnej części wyspy, zgodnie z wyniesieniem Pasma Wolińskiego (góra Grzywacz – 116 m n.p.m.). Układ krążenia jest dostosowany do bazy drenażu, którą stanowią: na północy Morze Bałtyckie, na wschodzie rzeka Dziwna, na zachodzie Świna, a na południu Zalew Szczeciński. Dopływ do obszaru badań jest lokalnie formowany w wyniku infiltracji wód powierzchniowych, co może mieć miejsce zwłaszcza w rejonach funkcjonowania dużych ujęć. Największa eksploatacja dotyczy rejonu Międzyzdrojów i Wolina oraz dwóch ujęć dla Świnoujścia w zachodniej części wyspy. Właśnie w zachodniej części wyspy (rejon ujęcia Odra) zachodzi infiltracja wód powierzchniowych z Zalewu Szczecińskiego/ Świny. Na podstawie przeprowadzonych badań elektrooporowych zlokalizowano strefy ascenzji i ingresji wód o podwyższonej mineralizacji. Zmniejszający się pobór wód podziemnych na tym obszarze w ostatnich kilkunastu latach oraz racjonalna gospodarka wodami słodkimi zmniejszyły stopień zagrożenia dopływem wód słonych w wyniku ingresji i ascenzji.

Słowa kluczowe: system krążenia wód, ingresja wód słonych, skład izotopowy wód podziemnych, modelowanie numeryczne, badania elektrooporowe/ tomografia.

Abstract. This paper presents the results of geophysical investigations and groundwater modelling from the Wolin Island. The simulation results of the numerical model have shown that groundwater recharge occurs mainly in the northern and central parts of the island (Mt. Grzywacz – 116 m a.s.l.). The groundwater flow system is adapted to the base level of groundwater drainage, which is: Baltic Sea in the north, Dziwna River in the east, Świna River in the west, and the Szczecin Lagoon in the south. Inflow to the research area is locally formed as a result of infiltration of surface water, which may take place especially in the areas of operation of major groundwater intakes. The major water intakes are located in Międzyzdroje and Wolin, and additional two in the western part of the Wolin Island for supplying the town of Świnoujście. Just in this extreme western part of the island – within the area of groundwater intake Odra, surface water infiltrates into the shallow aquifer from the Szczecin Lagoon and Świna River. Based on the geoelectrical imaging there was located a salt water intrusion and ascension of highly mineralized water. A decrease in consumption of groundwater in this area in recent years and the rational management of freshwater resources reduced the level of risk as a result of ingression and ascension of saline water.

Key words: groundwater flow system, salt water intrusion, groundwater isotopic composition, numerical modelling, electrical resistivity tomography.

WSTĘP

Obszar badań stanowi wyspa Wolin (fig. 1). Rejon ten znajduje się na pograniczu synklinorium szczecińskiego oraz antyklinorium pomorskiego. W podłożu osadów ke-

nozoicznych występują tu wody zmineralizowane, ograniczające możliwości wykorzystania wód podziemnych do celów użytkowych. Dodatkowo w strefach brzegowych

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, Zakład Hydrogeologii Stosowanej, Pl. Maxa Borna 9, 50-205 Wrocław; e-mail: jacek.gurwin@ing.uni.wroc.pl

² Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Wydział Nauk o Ziemi, ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń; e-mail: arkadiusz.krawiec@umk.pl



Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań

Location of the investigated area

(w skrajnie zachodniej i we wschodniej części wyspy) zaznaczają się procesy ingresji wód słonych, prowadzące do degradacji zasobów wód słodkich. Temat ten był poruszany w pracach hydrogeologicznych m.in. przez: Kłyżę (1988), Matkowską (1997), Krawca i in. (2000), Gurwina i Krawca (2010).

W pracy przedstawiono wyniki badań modelowych, izotopowych i hydrochemicznych wykonanych na próbkach wody pochodzących z ujęć wód podziemnych na wyspie Wolin. Pozwoliły one oszacować czas przebywania wody w ośrodku skalnym. Omówiono także wyniki badań elektrooporowych prowadzonych na tym obszarze.

BUDOWA GEOLOGICZNA I WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Wyspa Wolin jest położona w regionie Pobrzeża Szczecińskiego. Otoczona jest od północy wodami Zatoki Pomorskiej, a od południa Zalewem Szczecińskim, które są połączone poprzez Świnę i Dziwnę. Rzeźba terenu na wyspie jest zróżnicowana. Zachodnia i wschodnia jej część to młodoholocenijskie płaskie i rozległe obszary mierzejowo-deltowe, natomiast część centralna to urozmaicone formy kemowe oraz część wysoczyzny morenowej. Powierzchnia terenu w obniżeniu Świny oraz we wschodniej części wyspy jest zbudowana z holocenijskich piasków, mułków, torfów i namulów. Plejstocen reprezentują osady lodowcowe, wodnolodowcowe i zastoiskowe. Ich miąższość jest zróżnicowana i wynosi od kilkunastu metrów w zachodniej i wschodniej części wyspy do ponad 130 m w części centralnej. Przez wyspę przebiega granica pomiędzy synklinorium szczecińskim a antyklinorium pomorskim. Na powierzchni podkenozoicznej występują wyniesione utwory kredy i jury, które uległy miejscami znacznej redukcji.

Główny poziom wodonośny występuje w obrębie piasków i żwirów zlodowaceń wisły i warty. Niekiedy plejstoceński poziom wodonośny łączy się z płytkim poziomem

w warstwach holocenu. Miąższość utworów wodonośnych waha się od kilkunastu do ponad 30 m (fig. 2). Zwierciadło wody jest zazwyczaj swobodne albo lekko napięte pod warstwą torfów i namulów lub niewielkiej miąższości glin lodowcowych.

Obszar alimentacji znajduje się w centralnej części wyspy, w strefie wzgórz kemowych, których kulminacje dochodzą do 116 m n.p.m. Jest to obszar zbudowany głównie z dobrze przepuszczalnych utworów piaszczystych, a zasilanie warstw czwartorzędowych odbywa się poprzez infiltrację opadów atmosferycznych. Bazą drenażu dla wód podziemnych jest Morze Bałtyckie wraz z Zalewem Szczecińskim oraz rzeki Świna i Dziwna.

Na analizowanym obszarze wody słodkie w osadach mezozoicznych ujmowane są sporadycznie. Z utworów kredy wody nie są eksploatowane, natomiast wody podziemne w warstwach jury zostały ujęte w rejonie Lubin-Zalesie. Największe ujęcia znajdują się w miejscowościach: Międzyzdroje, Wolin, Wiselka i Kołczewo oraz w zachodniej części wyspy na Półwyspie Przytorskim.

Wody podziemne z warstw czwartorzędowych na wyspie Wolin są dobrej jakości i charakteryzują się niską mineralizacją. Zawartość jonu chlorkowego wynosi najczęściej od kilkunastu do kilkudziesięciu mg/dm^3 . Podwyż-

szone zawartości tego jonu w poziomach czwartorzędowych występują w rejonie Międzywodzia, Darzewic, Łuskowa i Wolina.

UKŁAD KRĄŻENIA I IDENTYFIKACJA CZASU PRZEPLYWU WÓD PODZIEMNYCH WEDŁUG BADAŃ MODELOWYCH

Do interpretacji zmian układu krążenia wód podziemnych wykorzystano numeryczny model filtracji, zbudowany zgodnie z metodyką konstrukcji przestrzennych modeli zintegrowanych z GIS. W pracy wykorzystano wyniki regionalnego modelu zrealizowanego dla celów bilansowych i zasobowych w obszarze Zalewu Szczecińskiego (Gurwin red., 2009). Wyniki modelu weryfikowano następnie na podstawie danych izotopowych i geofizycznych.

Symulacje w zakresie dynamiki wód podziemnych przeprowadzono przy użyciu programu Groundwater Vistas, w którym modulem obliczeniowym jest, pracujący w metodzie różnic skończonych, MODFLOW (McDonald, Harbaugh 1988). Do obliczeń prędkości, czasów przepływu i w konsekwencji do wyznaczenia przebiegu linii prądu zastosowano program MODPATH (Pollock, 1988, 1994), bazujący na teorii modelu przepływu tłokowego.

Wyniki obliczeń numerycznego modelu filtracji wykazały, że zasoby wód podziemnych zależą przede wszystkim od infiltracji efektywnej, która stanowi 85% całkowitej odnawialności wód podziemnych. Model został zbudowany

jako wielowarstwowy. Na figurze 3 przedstawiono układ krążenia w obrębie głównego użytkowego czwartorzędowego poziomu wodonośnego. Identyfikacja przestrzennego (3D) rozkładu strumieni filtracji wraz z polem prędkości pozwoliła wyznaczyć strefy zasilania i drenażu wód podziemnych, natomiast na wybranych fragmentach modelu można było przeprowadzić szczegółowe analizy tempa przepływu na podstawie symulacji w programie MODPATH.

Czas przepływu wód podziemnych symulowano na modelu metodą obliczania linii prądu w programie MODPATH, co przedstawiono na wybranym fragmencie modelu z rejonu Międzyzdroje–Przytor (fig. 4). W rejonie jeziora Wicko Małe czas dopływu od stref zasilania do brzegu Bałtyku wynosi przeciętnie 75–100 lat. Wartości z niższego zakresu występują w rejonie Międzyzdrojów, natomiast wartości w granicach 95–100 lat – bardziej ku zachodowi. W środkowej części strumienia filtracyjnego czas dopływu mieści się w przedziale 85–95 lat. Odpowiadające im drogi przepływu wynoszą w części środkowej i wschodniej 2200–2400 m, natomiast na zachodzie są krótsze i wynoszą około 1600–1750 m.

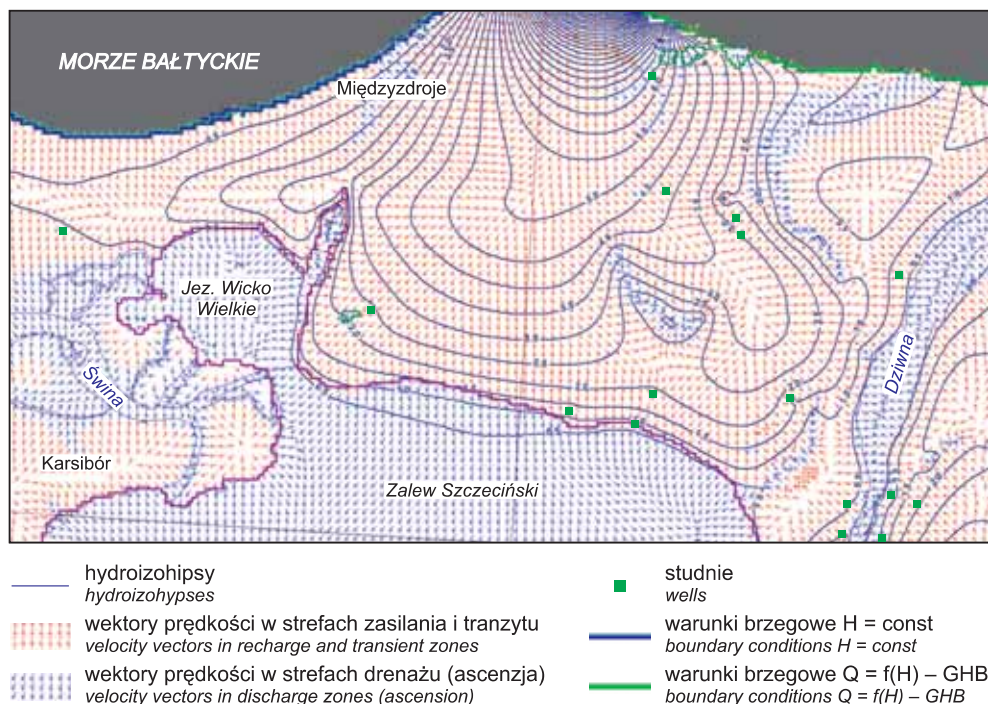


Fig. 3. Układ krążenia wód podziemnych według badań modelowych

Groundwater flow system according to modelling investigations

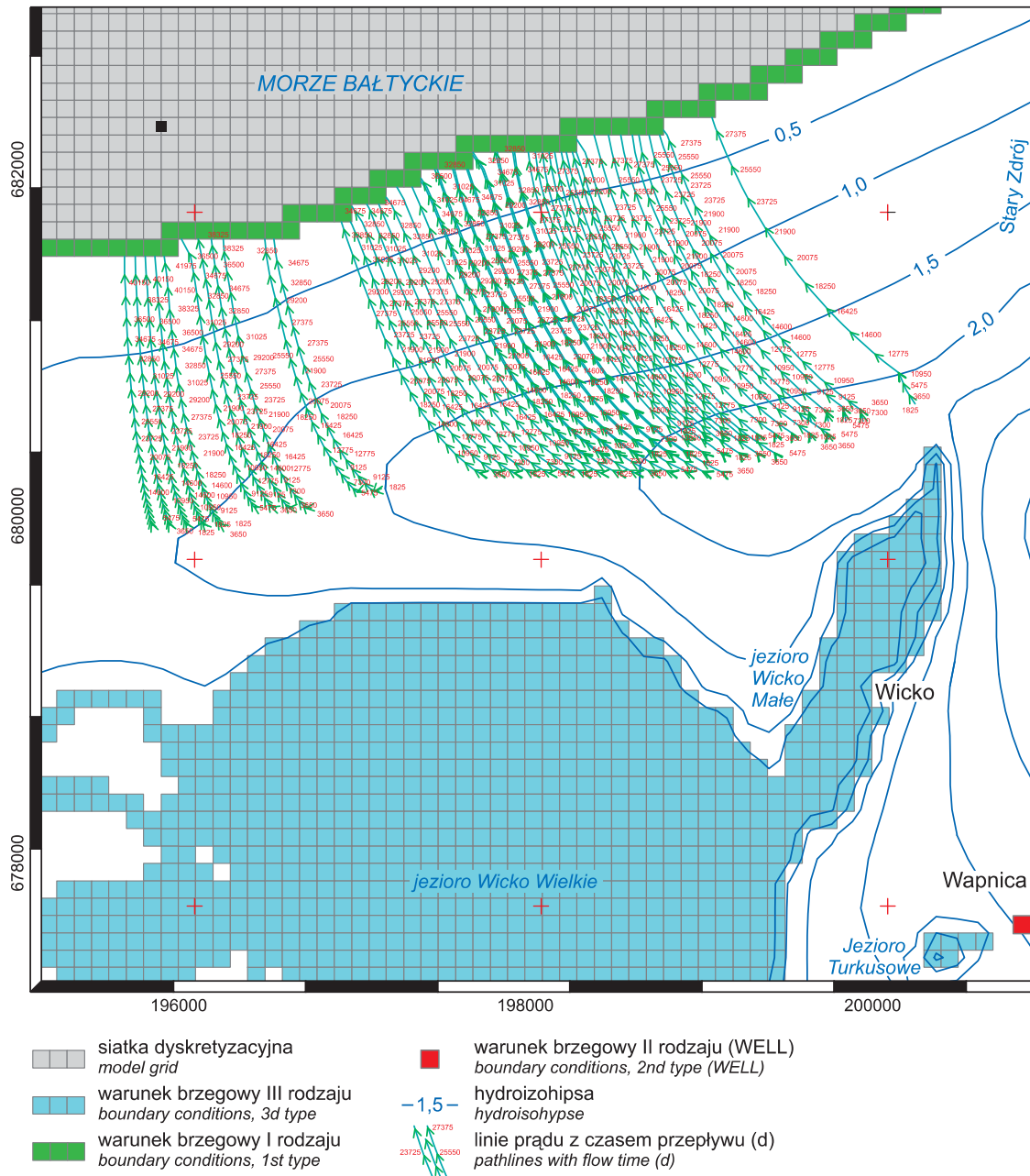


Fig. 4. Układ hydrodynamiczny w zachodniej części wyspy Wolin według symulacji MODFLOW/MODPATH

Groundwater flow system in the western part of the Wolin Island according to the MODFLOW/MODPATH simulation

Średnie prędkości filtracji są zróżnicowane w zakresie 20–50 m/rok.

Przy niższych spadkach hydraulicznych w części wschodniej i jednocześnie mniejszej odległości od brzegu morza obliczone linie prądu wskazują na mniejsze tempo filtracji. Przy założonej koncepcji modelu i warunkach brzegowych nie symulowano warunków ingresji wód słonych od strony Morza Bałtyckiego. Badania geofizyczne w rejonie Międzyzdrojów wykazały, że takie wpływy istnieją (fig. 5), jednak

ich zasięg w granicach 200–300 m od brzegu nie jest możliwy do odwzorowania w przyjętej siatce dyskretizacyjnej.

Analizując czas przepływu w północnej części obszaru, od głównej strefy zasilania w rejonie Pasma Wolińskiego i Pojezierza Wolińskiego w kierunku południowym i południowo-wschodnim, stwierdza się wartości czasu filtracji od stref zasilania do stref drenażu w przedziale 100–130 lat na dystansie ok. 4,0–4,5 km, co daje średnie prędkości w zakresie ok. 30–50 m/rok.

BADANIA IZOTOPOWE I GEOFIZYCZNE

Z wybranych ujęć zlokalizowanych na wyspie Wolin pobrano próbki wody do badań izotopowych w celu określenia czasu przebywania wody w ośrodku skalnym (tab. 1). Uzyskane wyniki posłużyły do weryfikacji numerycznego modelu filtracji. Wszystkie badane próbki reprezentują wody współczesne, które infiltrowały do systemu wodonośnego w czasie ostatnich kilkudziesięciu lat.

Próbki wody z Kołczewa, Dargobądz i Międzyzdrojów reprezentują słodkie wody współczesne, które przebywały w ośrodku skalnym kilkanaście lat. Świadczą o tym wyniki oznaczeń izotopowych oraz zawartość trytu. Próbka z Wolina reprezentuje wodę współczesną, a skład izotopowy sugeruje dopływ wody z Dziwny (Zalew Szczeciński). Najstarsze z badanych wód pochodzą z ujęcia w Wiselce oraz z ujęcia Przytor.

W wodzie z ujęcia w Wiselce w 1998 r. występowały śladowe stężenia trytu, a wykonane po kilku latach oznaczenia wykazały wzrost stężeń trytu, co oznacza początek dopływu wody współczesnej. Jest to woda współczesna z domieszką wody z dalszego obszaru zasilania, na co wskazuje wynik oznaczeń izotopów stabilnych z 1998 r. Średni wiek wody można oszacować na kilkadziesiąt do około 200 lat. Czas przepływu wody otrzymany na podstawie obliczeń z modelu szacuje się na około 100–130 lat, co dobrze koresponduje z wynikami oznaczeń izotopowych.

Próbka wody z ujęcia Przytor zawiera znaczne stężenie trytu. Skład izotopowy i stężenia trytu wskazuje na współczesne pochodzenie wody. Średni wiek wody z tego ujęcia na podstawie badań izotopowych i oznaczeń gazów szlachetnych można oszacować na około 30–60 lat. Na podstawie symulacji na modelu czas dopływu wody do tego ujęcia można ustalić również w tym samym zakresie lat.

Na figurze 5 przedstawiono wyniki badań geoelektrycznych przeprowadzonych na wyspie Wolin. Na przekroju A zaznacza się niewielki wpływ ingresji morskich od Morza Bałtyckiego, który można oszacować na około 50–250 m od brzegu. Do głębokości około 60–70 m występują wody słodkie, co oznacza, że stropowe partie osadów mezozoicznych także zawierają wody słodkie. Ascenzja wód słonych zaznacza się wyraźnie w części południowej przekroju. Inny obraz przedstawiają dane geofizyczne na przekroju B z rejonu Międzywodzia. Występuje tutaj całkowite zasolenie podłoża mezozoicznego oraz warstw czwartorzędowych. Wody słodkie mogą znajdować się jedynie w warstwie do głębokości 12 m poniżej terenu. Zasolenie to jest związane z ingresją wód słonych od Morza Bałtyckiego oraz Zalewu Kamieńskiego, a także z procesami ascenzji wód zmineralizowanych z podłoża.

Tabela 1

Oznaczenia izotopowe oraz wyniki badań gazów szlachetnych z wyspy Wolin

Isotope and noble gas data from the Wolin Island

Nazwa ujęcia, stratygr./głęb. [m]	Data pomiaru	TDS [mg/l]	Cl [mg/l]	Tryt [T.U.]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	δ [‰]	NGT* [°C]	$^4\text{He}_{\text{excess}}$ $10^{-6}\text{cm}^3\text{g}^{-1}$	„Wiek” wody
Wolin s.10 Q/27,5	1997	1280	196		-9,36	-66,0			współczesna z domieszką słonych wód
	2008	1300	200	8,6 ±0,5	-9,06	-63,2			
Kołczewo s.1 Q/31,8	1998	607	47	15,5 ±0,9	-9,70	-68,3			współczesna kilkanaście lat
	2008		38	10,0 ±0,6	-9,47	-65,4			
Wiselka s.3** Q/55,5	1998	300	16	3,0 ±0,5	-10,00	-70,4			współczesna >kilkadziesiąt lat
	2005		20	7,2 ±0,5	-9,82	-68,9			
Dargobądz ** Q/40	1998	420	28	15,2 ±0,8	-9,82	-69,2			wody współczesne kilkanaście lat
	2008		26	10,9 ±0,6	-9,60	-68,0			
Międzyzdroje s.6z Q/60	2000		24	9,1 ±0,4	-9,82	-69,0	9,5	0,002	współczesna kilkanaście lat
	2005		20	4,1 ±0,5	-9,80	-65,1			
Przytor P-5 Q/54	2000		82	10,8 ±0,4	-9,46	-64,4	8,2	0,18	wody młode 30–60 lat
	2005		80	10,2 ±0,6	-9,57	-65,1			

Dokładność pomiaru: $\delta^{18}\text{O}$ – ±0,05 do 0,1‰, δD – ±1‰, NGT – ±0,7°C, $^4\text{He}_{\text{excess}}$ – ±10 %

* wg Krawiec i in., 2000; ** próbki z 1998 r. wg Dokumentacji GZWP 102

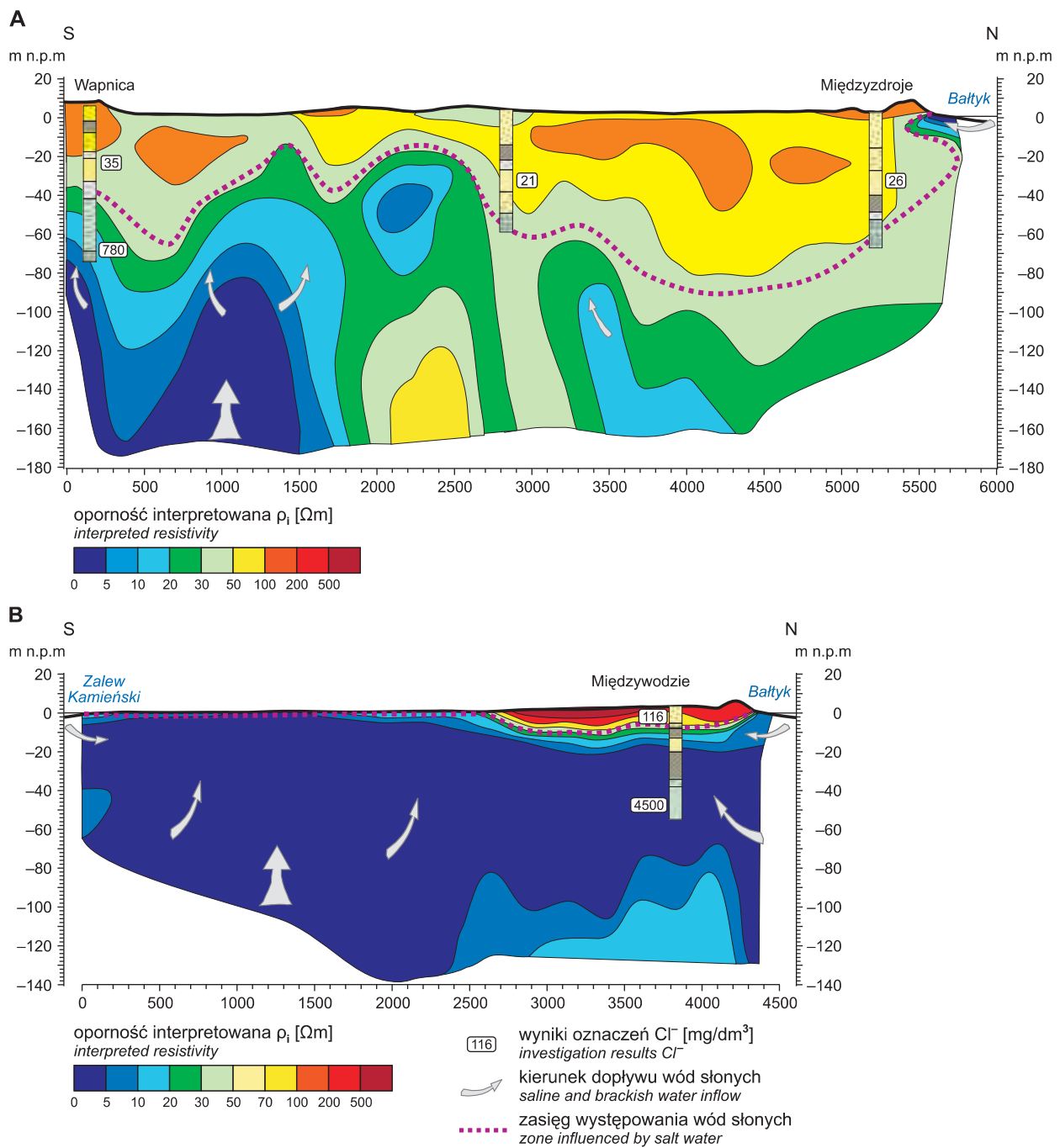


Fig. 5. Wyniki badań elektrooporowych na obszarze wyspy Wolin

Lokalizacja przekrojów na fig. 1

The results of geoelectrical logging in the Wolin Island

Location of cross-sections A and B in Fig. 1

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań modelowych, izotopowych i geofizycznych wykonanych na terenie wyspy Wolin. Analizowany obszar ze względu na swoją specyfikę jest wrażliwy na zmiany hydrodynamiczne (obniżenie zwierciadła wody, zwiększony pobór wód podziemnych), dlatego każde prace związane z budową nowych ujęć wody czy prace hydrotechniczne ingerujące w warstwę wodonośną należy poprzedzić wnikliwą analizą hydrogeologiczną opartą na modelowaniu numerycznym. Przydatne do takich analiz są także badania elektrooporowe oraz wyniki oznaczeń hydrochemicznych i izotopowych.

Wykonane badania pozwoliły jednoznacznie określić system krążenia wód podziemnych oraz oszacować czas przebywania wody w ośrodku skalnym. Na analizowanym obszarze w osadach czwartorzędowych występują wody „młode”, których czas przebywania w ośrodku skalnym szacuje się najczęściej na kilkanaście do kilkudziesięciu lat. Wody nieco starsze, przebywające w systemie wodonośnym około 200 lat, występują w głębszych poziomach czwartorzędowych.

Zasilanie wód podziemnych zachodzi w północnej i centralnej części wyspy. Lokalnie dopływ do obszaru ba-

dań jest formowany także w wyniku infiltracji wód powierzchniowych, co zaznacza się w skrajnie zachodniej części wyspy w rejonie ujęcia Odra, gdzie zachodzi infiltracja wód powierzchniowych z Zalewu Szczecińskiego/ Świny. Podobna sytuacja ma miejsce w części wschodniej wyspy wzdłuż rzeki Dziwny oraz w rejonie Międzywodzia. Wykonane na tym obszarze badania izotopowe oraz prace geofizyczne pozwoliły na wskazanie stref ingresji i ascencji wód słonych.

Analiza tempa przepływu strumieni wód podziemnych na wielowarstwowym numerycznym modelu filtracji wskazuje, że czas dopływu od stref zasilania do stref drenażu zawiera się przeciętnie w zakresie 70–120 lat, przy uśrednionych prędkościach filtracji rzędu 30–50 m/rok, biorąc pod uwagę główny użytkowy poziom wodonośny. Uzyskane wartości czasu przepływu wód zostały potwierdzone poprzez badania izotopowe.

Praca była współfinansowana ze środków na naukę w latach 2009–2010 – projekt badawczy nr N525 461336.

LITERATURA

- GURWIN J. (red.), 2009 — Monitoring środowiska wodnego i modelowanie hydrogeologiczne rejonu Zalewu Szczecińskiego. Projekt badawczy Litogeneza i geochemia osadów dna i strefy brzegowej Zalewu Szczecińskiego. Arch. Min. Środ., Warszawa.
- GURWIN J., KRAWIEC A., 2010 — Zagrożenia dla zasobów wód słodkich na wyspie Uznam w świetle badań modelowych i geofizycznych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **442**: 61–69.
- KŁYZA T., 1988 — Wody podziemne na Wolinie i polskim Uznamie. *W: Aktualne problemy hydrogeologii*: 83–92. Gdańsk.
- KRAWIEC A., RÜBEL A., SADURSKI A., WEISE S.M., ZUBER A., 2000 — Preliminary hydrochemical, isotope, and noble gas investigations on the origin of salinity in coastal aquifers of Western Pomerania, Poland. *W: Hydrogeology of the coastal aquifers* (red. A. Sadurski): 87–93. UMK, Toruń.
- MATKOWSKA Z., 1997 — Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Międzyzdroje i Wolin. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- McDONALD M.G., HARBAUGH A.W., 1988 — A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report, Washington.
- POLLOCK D.W., 1988 — Semianalytical computation of path lines for finite difference models. *Ground Water*, **26**, 6: 743–750.
- POLLOCK D.W., 1994 — User's guide for MODPATH, version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model. Reston, VA. U.S. Geological Survey.

SUMMARY

This paper presents the results of numerical modelling, and isotopic and hydrochemical investigations being done on data from groundwater intakes on the Wolin Island. The study was supported by resistivity survey conducted in this area. The study area is located in the border zone between the Szczecin Synclinorium and Pomeranian Anticlinorium. This is a region of separate hydrogeological system with diversified landscape and varied geological conditions. We-

stern and eastern parts of the island are flat and vast spit and delta areas, but the central part consists of various kame forms and partly moraine plateau. The major unconfined/confined aquifer occurs within Pleistocene sands and gravels and partially has a hydraulic connectivity with the shallow Holocene aquifer. The thickness of water bearing-horizon varies from several to over 30 m. The recharge zone is located in the central part of the island. At the base of Cenozoic occur

mineralized waters that restrict use of groundwater for supply purposes. Interpretation of the entire groundwater circulation system was conducted on a numerical flow model using the Groundwater Vistas MODFLOW environment. The velocity and pathline calculations in Modpath give an opportunity of detailed flow analysis from recharge zones to the Baltic Sea coast within the chosen part of the model between Międzyzdroje and Przytor, showing that the total flow time is on average 75–100 years. In the northern and central part of the Wolin Island, the flow time calculations from the major recharge zone within the Wolin Lakeland towards south and southeast showed the values of 100–130 years at a distance of approx. 4–4.5 km that gives velocities in the range

of 30–50 m/a. The water samples for isotopic tests were collected from selected water intakes located on the island of Wolin to determine the residence time of water in the system. All the samples represent waters of the recent age. The oldest waters occur in Wiselka, where the time was estimated in the range from decades to 200 years that is comparable with model results of 100–130 years. The results of geophysical investigations are presented in the cross-sections. An insignificant influence of sea water ingression occurred that was estimated at 50–250 m from the sea coastline. A delimitation of freshwater showed the range to the depth of 60 m. Apart from sea water ingression, a salinization process is related to the ascension from the bottom as well.

