

Bezpośrednie pomiary podmorskiego zasilania wodami podziemnymi Zatoki Puckiej

Emilia Bubliewska¹, Leszek Łęczyński¹, Marek Marciniak², Łukasz Chudziak²,
Żaneta Kłostowska¹, Dorota Zarzeczańska³

In situ measurements of submarine groundwater supply from the Puck Lagoon. Prz. Geol., 65: 1173–1178.

Abstract. Fresh water accumulated beneath the sea floor may flow through sediments into the sea water. This process, opposite to infiltration, is called Submarine Groundwater Discharge (SGD). The Southern Baltic Sea coastal zone represents an interesting object of study because its bottom deposits show seepages of fresh groundwater. The study involved Puck Bay and the adjacent coastal belt of the Kashubian Coast plateau. Research of potential outflows of fresh groundwater was done through a thermal imaging of the study area. An articulate thermal anomaly allowed predetermining the location of research points. Groundwater outflows in the seabed were confirmed by measurements of chloride content and electrical conductivity of water samples. The paper presents two new devices: a filtrometer that enables measurement of water filtration intensity during drainage, and a gradientmeter that measures the hydraulic gradient. The use of both devices allows determination of the in situ hydraulic conductivity. Results of the research have shown relationships between fresh groundwater and the sea-bottom sediments.

Keywords: SGD, submarine groundwater discharge, Southern Baltic Sea, Puck Lagoon, drainage

Wyniki badań z lat 90. minionego stulecia wskazały na występowanie drenażu podmorskiego poziomów wodonośnych strefy brzegowej i zalegających pod dnem morskim (Jankowska, 1990; Jankowska, Bolałek, 1990; Bolałek i in., 1991; Piekarek-Jankowska, 1996). Na podstawie danych z profilowania sejsmoakustycznego określono na dnie morskim rozprzestrzenienie osadów potencjalnie wodonośnych (Jankowska i in., 1992; Mojski, 1995). Ponadto podczas interpretacji warunków drenażu analizowano ciśnienia piezometryczne różnowiekowych warstw wodonośnych (Kozerski, Kwaternikiewicz, 1984; Sadurski, 1989; Piekarek-Jankowska, 1994).

Podstawowym problemem badawczym prezentowanym w pracy jest określenie parametrów drenażu wód podziemnych do Zatoki Puckiej na podstawie bezpośrednich pomiarów z wykorzystaniem gradientomierza i filtrometru. Punkty badawcze określono z użyciem termowizyjnego zdjęcia satelitarnego wykonanego w sierpniu 2015 r. Strefy zwiększonego drenażu wód podziemnych w okresie letnim powodowały obniżenie temperatury wody na powierzchni morza (<15°C), co oznaczono na zdjęciu termowizyjnym kolorem niebieskim.

Celem publikacji jest wskazanie nowych technik pomiarowych, które pozwolą w bezpośrednich badaniach dna morskiego uzyskiwać ilościowe dane natężenia i gęstości strumienia filtracji oraz współczynnika filtracji w strefach podmorskiego zasilania wodami podziemnymi.

OBSZAR BADAŃ

Zatoka Pucka należy do subregionu Zatoki Gdańskiej, jest oddzielona linią łączącą Cypel Helski z Kamienną Górą lub według innych autorów Przylądkiem Orłowskim. Ze względu na zróżnicowanie głębokościowe Zatoka Pucka dzieli się na dwie części: wewnętrzną, zwaną Zalewem

Puckim, oraz zewnętrzną, występującą w części południowo-wschodniej, która bezpośrednio graniczy z Zatoką Gdańską. Morfometria dna tych dwóch jednostek jest zróżnicowana, część zewnętrzna zatoki jest mało urozmaicona, lecz o znacznym zróżnicowaniu nachyleń i maksymalnej głębokości 54 m w rejonie cypla półwyspu (Nowacki, 1993). Zalew Pucki od części zewnętrznej Zatoki Puckiej jest oddzielony częściowo zatopioną barierą, tzw. Rewą Mew. Głównymi piętrami wodonośnymi kształtującymi podziemny drenaż Zatoki Puckiej są piętra paleogeńskie i neogeńskie. Intensywność drenażu wzrasta w miarę oddalania się od brzegu, ponieważ wraz ze wzrostem głębokości następuje redukcja miąższości nadkładu osadów słabo przepuszczalnych, przez które przesączają się wody piętra oligoceńskiego (Piekarek-Jankowska, 2007). Główne obszary drenażu wód podziemnych z poziomów czwartorzędowych są zróżnicowane w zależności od budowy geologicznej i warunków występowania wód podziemnych oraz położone na lądzie. Wśród nich należy wymienić głęboko wciętą pradolinę Redy-Leby, taras nadmorski i Żuławy Gdańskie (Piekarek-Jankowska, 2007). Drenaż wód czwartorzędowych jest konsekwencją kontynuowania się pod dnem zatoki poziomów międzymorenowych i podmorenowych. Sięga on przeważnie do 2–3 km od brzegu. Należy również wspomnieć o warunkach drenażu wzdłuż Półwyspu Helskiego. Górny poziom wodonośny jest rozwinięty w piaskach wydmowych i morskich wieku holoceniowego.

METODY BADAŃ

Metody badawcze stosowane do rozwiązywania problemów hydrogeologicznych tej strefy brzegowej obejmują oprócz metod z klasycznej hydrogeologii również te stosowane w oceanologii, geologii morza i hydrologii.

¹ Instytut Oceanografii, Uniwersytet Gdański, ul. Marszałka Piłsudskiego 46, 81-378 Gdynia; emilia.bubliewska@phdstud.ug.edu.pl, ocell@univ.gda.pl, zaneta.klostowska@phdstud.ug.edu.pl.

² Zakład Hydrometrii, Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Bogumiła Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; mmarc@amu.edu.pl.

³ Wydział Chemii, Uniwersytet Gdański, ul. Wita Stwosza 63, 80-308 Gdańsk; dorota.zarzeczańska@ug.edu.pl.

Wykorzystywane są wyniki modelowania zmienności temperatury wód morskich, procesów hydrodynamicznych, termowizyjne zdjęcia satelitarne, techniki poboru próbek osadów powierzchniowych oraz rdzeni. Obecnie stosowane nowe metody badawcze pozwalają dokonać na dnie morskim bezpośrednich pomiarów parametrów hydrogeologicznych, takich jak: współczynnik filtracji, gradient hydrauliczny i gęstości strumienia drenażu. Typowanie stref pomiarowych określono na podstawie analizy zdjęcia termicznego wód Zatoki Puckiej, wykonanego w sierpniu 2015 r. Inwersja temperatury wody jest związana z dopływem do dna morskiego wody podziemnej o niższej o kilka stopni temperaturze. Niektóre z tych stref w lipcu 2016 r. objęto pomiarami z wykorzystaniem filtrometru i gradientometru. Za pomocą tych urządzeń rozpoznano natężenie filtracji w strefach drenażu wód podziemnych. Pobrano także próbki wody do dalszych badań fizyczno-chemicznych. Analizy morskich wód przypowierzchniowych oraz pobranych ze strefy dna morskiego zostały wykonane w Katedrze Chemii Analitycznej Uniwersytetu Gdańskiego. Zrealizowane badania drenażu wód podziemnych do Zatoki Puckiej należy traktować jako pilotażowe. Miały one na celu potwierdzenie skuteczności pomiarowej filtrometru i gradientometru w badaniach morskich oraz korelacji stref anomalii temperaturowych ze zdjęciami termicznego zasilaniem w wodę podziemną Zatoki Puckiej.

Do wyznaczenia współczynnika filtracji k osadów skonstruowano filtrometr, który umożliwia pomiar gęstości strumienia filtracji q , oraz gradientometr, którym można zmierzyć gradient hydrauliczny i (Marciniak, Chudziak, 2015). Opis budowy oraz działania filtrometru i gradientometru można znaleźć w literaturze (Chudziak, Marciniak, 2012; Marciniak, Chudziak, 2015).

Pomiary wykonane filtrometrem i gradientometrem pozwalają na obliczenie wartości gęstości strumienia drenażu oraz współczynników filtracji wg wzorów [1] i [2].

Oznaczenie gęstości strumienia drenażu wody q_d jest możliwe dzięki pomiarowi w zbiorniku drenażu (ryc. 1) objętości wody V_d przepływającej przez klosz o znanej powierzchni F w określonym czasie t_d .

$$q_d = \frac{V_d}{F t_d} \quad [1]$$

W obliczeniach współczynnika filtracji podczas drenażu k_d gradient hydrauliczny i_d oblicza się, dzieląc różnicę ciśnień Δh_d przez głębokość wbicia Δl gradientomierza w osady denne.

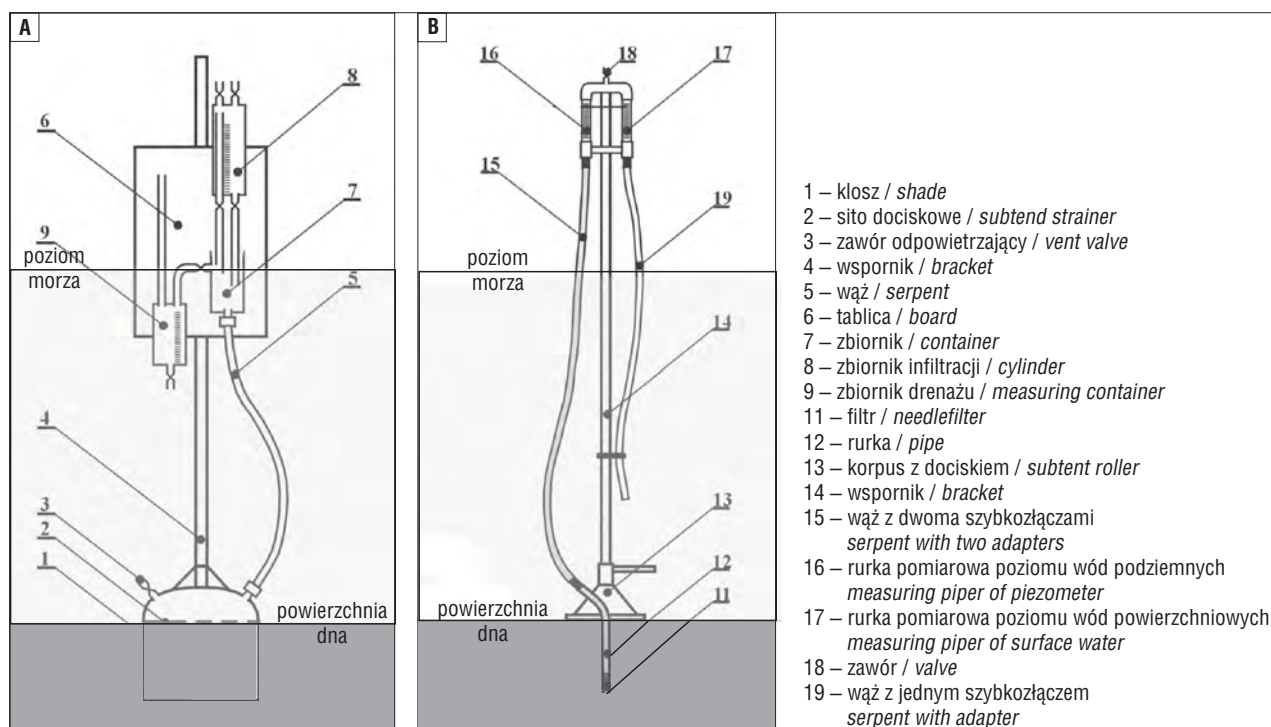
$$k_d = \frac{q_d}{i_d} = \frac{V_d \Delta l_d}{F t_d \Delta h_d} \quad [2]$$

Testy kalibracyjne nowej aparatury przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych (Marciniak, Chudziak, 2012). Metodę wykonania pomiarów oraz przykłady zastosowań szczegółowo opisał Chudziak (2013), zakres realizacji badań i instrukcję obsługi opisano w pracy Marciniaka (2017).

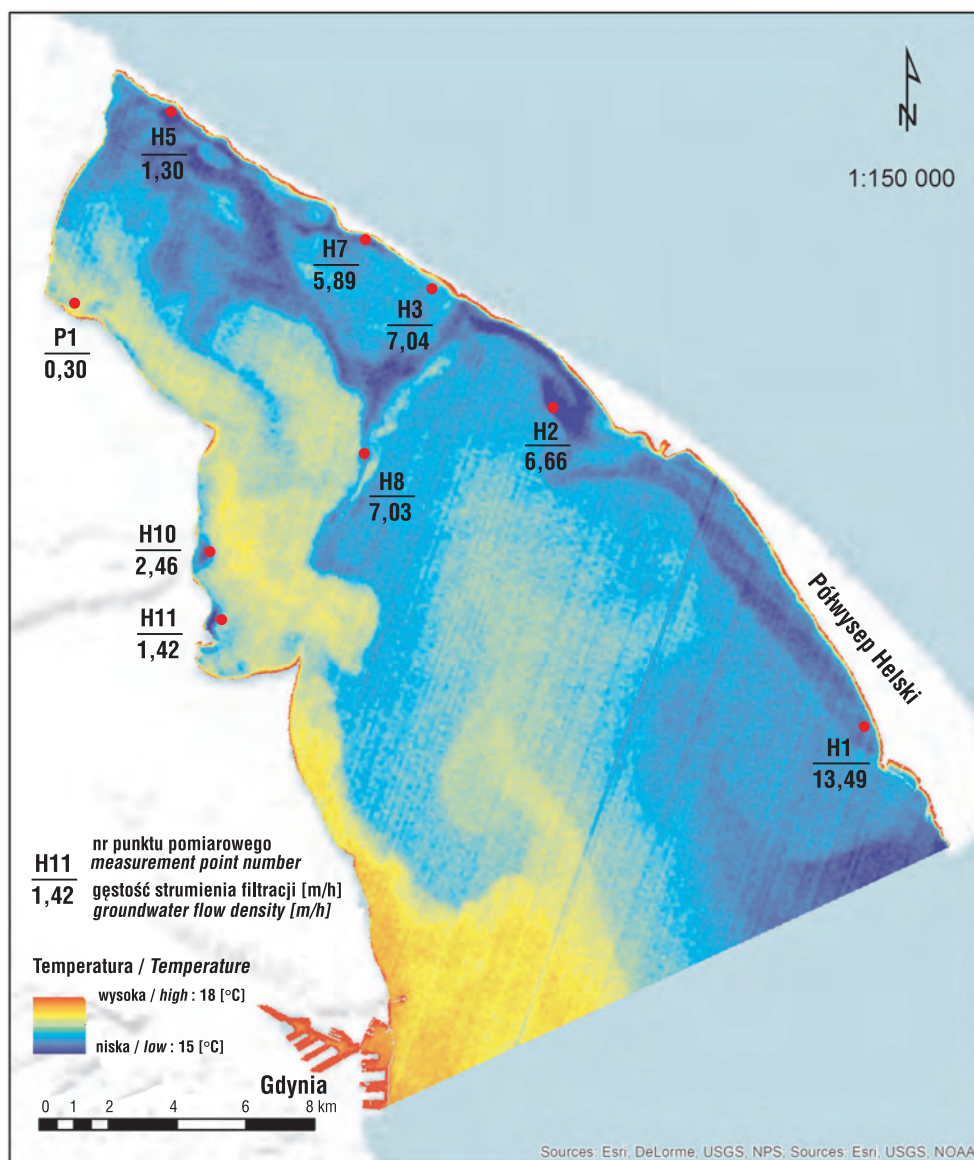
WYNIKI I DISKUSJA

Punktem wyjścia do oceny drenażu wód podziemnych przez Zatokę Pucką było termowizyjne zdjęcie satelitarne wykonane w sierpniu 2015 r. (ryc. 2). Miejsca oznaczone kolorem ciemnoniebieskim zidentyfikowano jako wody zimniejsze ($<15^\circ\text{C}$), a kolorami od żółtego do czerwonego jako cieplejsze ($>18^\circ\text{C}$). Strefy zwiększonego drenażu wód podziemnych cechują się niższymi temperaturami w okresie letnim.

Do oceny wielkości drenażu wód podziemnych wykonano pomiary gęstości strumienia oraz kierunku filtracji przez osady denne Zatoki Puckiej. Morskie badania terenowe wykonano z pokładu kutra hydrograficznego w lipcu 2016 r. Do badań wykorzystano filtrometr i gradientometr,



Ryc. 1. Schemat konstrukcji: A – filtrometru, B – gradientometra
Fig. 1. Schematic diagram of a filtrometer and a gradientmeter



Ryc. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych i rozkład gęstości strumienia filtracji na tle zdjęcia termowizyjnego Zatoki Puckiej
Fig. 2. Location of measurement points and the distribution of groundwater flow density against the background of the thermal image of Puck Bay

które zostały skonstruowane w Instytucie Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Badania wykonano w 9 punktach, których lokalizację przedstawiono na rycinie 2. Wyniki pomiarów filtrometrem i gradientometrem oraz wyniki obliczeń gęstości strumienia filtracji q , gradientu hydraulicznego i oraz współczynnika filtracji k zestawiono dla każdego punktu pomiarowego w odpowiednio przygotowanym formularzu (tab. 1).

W tabeli 2 zestawiono wartości temperatury wody morskiej w dniu pomiarów (14.07.2016 r.) oraz ze zdjęcia termowizyjnego wykonanego w sierpniu 2015 r. Wyniki te posłużyły do korelacji z parametrami drenażu pomierzonymi za pomocą filtrometru i gradientometru.

Podczas badań terenowych dodatkowo pobrano próbki wody morskiej z dwóch głębokości: ze strefy dna morskiego oraz z powierzchni. W pobranych próbkach wody powierzchniowej oraz wody pobranej przy użyciu filtrometru pomierzono stężenie anionu chlorkowego oraz przewodnictwo elektryczne. Udział badanego analitu wyznaczono zgodnie z reakcją [3], miareczkując potencjome-

tryczne próbki mianowanym roztworem azotanu (V) srebra (0,1 M), aparatem Cerko Lab System z kombinowaną elektrodą chlorkową (Schott Ag 6280). Porcje titranta $V = 0,041$ ml były dozowane automatycznie.



Stężenie jonów chlorkowych obliczano jako:

$$\text{Cl}^- = V\text{AgNO}_3 \times 0,1 V_p \quad [4]$$

gdzie :

$V\text{AgNO}_3$ – objętość roztworu titranta (0,1 M AgNO_3),
 V_p – objętość próbki analizowanej (analit).

Przewodnictwo właściwe mierzono konduktometrycznym aparatem SCHOTT INSTRUMENTS ProLab2000 z korektą temperaturową.

Pomierzone wartości jonu chlorkowego w badanych próbkach oscylowały w granicach 1,33–4,10 g/dm^3 , przy czym w warstwie przydennej wartości te nie przekraczały 2,40 g/dm^3 . Analogicznie kształtowały się wartości

Tab. 1. Formularz zawierający zestawienie wyników pomiarów terenowych oraz obliczenia parametrów drenażu wód podziemnych przez wody Zatoki Puckiej wykonanych w punkcie H1**Table 1.** An exemplary form containing the results of field measurements and parameters of calculation of groundwater drainage by the waters of Puck Bay, performed at point H1

Lokalizacja punktu pomiarowego <i>Location of the measurement point</i>					Opis lokalizacji / <i>Location description</i>	
Szerokość geograficzna <i>Latitude</i>	Długość geograficzna <i>Longitude</i>	Rzędna <i>Elevation</i> m n.p.m.	Głębokość <i>Depth</i> m p.p.m.	Data i godzina badania <i>Measurement date and time</i> rrrr-mm-dd gg:mm	H1, północny brzeg Zatoki Puckiej na wysokości Helu <i>North shore of Puck Bay at Hel Peninsula</i>	
54°37'40,9"N	18° 46'18,4"E	0,0	0,81	2016-07-14 13:30		
Badanie wykonali / <i>Measurement done by:</i> Marek Marciniak, Łukasz Chudziak, Leszek Łęczyński, Emilia Bubliewska						
Drenaż / <i>Drainage</i>						
Filtrometr / <i>Filtrometer</i>			Gradientomierz / <i>Gradientmeter</i>			
Głębokość wbicia filtrometru Δl_f <i>Filtrometer penetration depth</i>	20	cm	Głębokość wbicia gradientomierza Δl_g <i>Gradientometer penetration depth</i>	40	cm	
Średnica klosza $d_i = 2r_f$ <i>Shade diameter</i>	34,1	cm	Poziom wody w warstwie wodonośnej H_w <i>Aquifer water level</i>	10,4	cm	
Powierzchnia klosza F_k <i>Shade extent</i>	913,3	cm ²	Poziom wody w rzece / jeziorze / morzu H_r <i>Water level in the river / sea / lake</i>	6,6	cm	
Temperatura wody T <i>Water temperature</i>	20,0	°C	Różnica poziomów wody ΔH <i>Water level difference</i>	3,8	cm	
Objętość filtrującej wody ΔV <i>Volume of filtering water</i>	206	cm ³	Poziom wody w warstwie wodonośnej H_w <i>Aquifer water level</i>		cm	
	202	cm ³	Poziom wody w rzece / jeziorze / morzu H_r <i>Water level in the river / sea / lake</i>		cm	
	208	cm ³	Różnica poziomów wody ΔH <i>Water level difference</i>		cm	
Czas obserwacji t <i>Observation time</i>	60	s	Poziom wody w warstwie wodonośnej H_w <i>Aquifer water level</i>		cm	
	60	s	Poziom wody w rzece / jeziorze / morzu H_r <i>Water level in the river / sea / lake</i>		cm	
	60	s	Różnica poziomów wody ΔH <i>Water level difference</i>		cm	
Natężenie filtracji Q <i>Filtration intensity</i>	3,4333	cm ³ /s				
	3,3667	cm ³ /s	Średnia różnica poziomów wody ΔH <i>Average water level difference</i>	3,8	cm	
	3,4667	cm ³ /s	Gradient hydrauliczny $i = \Delta H / \Delta l$ <i>Hydraulic gradient</i>	0,0950	cm/cm	
Współczynnik filtracji / <i>Hydraulic conductivity</i>						
Średnie natężenie filtracji Q <i>Average filtration intensity</i>	3,4222	cm ³ /s	Współczynnik filtracji $k = q/i$ <i>Hydraulic conductivity</i>	3,94E-04	m/s	
Gęstość strumienia filtracji $q = Q/F$ <i>Groundwater flow density</i>	3,75E-03	cm/s	Współczynnik filtracji k_{10} <i>Hydraulic conductivity</i>	3,41E-04	m/s	
Gęstość strumienia filtracji $q = Q/F$ <i>Groundwater flow density</i>	13,49	m ³ /h		1,2290	m/h	
Gęstość strumienia filtracji $q = Q/F$ <i>Groundwater flow density</i>	323,76	m ³ /d		29,50	m/d	
Uwagi / <i>Comments:</i>						

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń parametrów drenażu wód podziemnych przez wody Zatoki Puckiej
Table 2. Summary of results of calculations of parameters of groundwater drainage by the waters of Puck Bay

Punkt pomiarowy <i>Measurement point</i>	Głębokość <i>Depth</i>	Temperatura w dniu pomiarów <i>Temperature on the day of measurement T</i>	Temperatura ze zdjęcia sierpień 2015 <i>Temperature on the photo of August 2015</i>	Gęstość strumienia filtracji <i>Groundwater flow density q</i>	Gradient hydrauliczny <i>Hydraulic gradient i</i>	Współczynnik filtracji <i>Hydraulic conductivity k</i>
	[m]	[°C]	[°C]	[m/h]	[m/m]	[m/h]
H1	0,81	20,0	15,0	13,49	0,0950	1,2290
H2	2,07	19,0	15,0	6,66	0,0100	5,8222
H3	2,20	20,5	16,0	7,04	0,0150	4,0410
H5	0,85	21,5	16,5	1,30	0,0650	0,1707
H7	0,80	20,5	16,0	5,89	0,0100	5,0717
H8	2,16	21,0	15,5	7,03	0,0125	4,8157
H10	2,65	17,5	16,5	2,46	0,1900	0,1151
H11	2,47	17,5	17,0	1,42	0,0650	0,1944
P1	0,73	20,0	17,5	0,30	0,0050	0,5118

przewodnictwa w próbkach warstwy przydennej, odnotowano wartości nie przekraczające 3,70 mS/cm, warstwę powierzchniową charakteryzowały wartości w zakresie 4,46–7,88 mS/cm (ryc. 3).

Analizując wyniki przeprowadzonych pomiarów podwodnych, sporządzono wykresy korelacyjne między temperaturą wody odczytaną ze zdjęcia termowizyjnego w sierpniu 2015 r. a parametrami drenażu obliczonymi na podstawie pomiarów wykonanych filtrometrem i gradientomierzem. Wykresy korelacyjne przedstawiono na rycinie 4.

WNIOSKI

Analizując uzyskane wyniki, należy w pierwszej kolejności zauważyć korelację na poziomie $R^2 = 0,76$ między temperaturą wód Zatoki Puckiej odczytaną ze satelitarnej fotografii termowizyjnej, a gęstością strumienia filtracji zmierzoną z pokładu kutra hydrograficznego za pomocą filtrometru (ryc. 4A). Na podstawie tej korelacji można postawić hipotezę, że w przyszłości będzie możliwe rozpoznanie rozkładu przestrzennego drenażu wód podziemnych

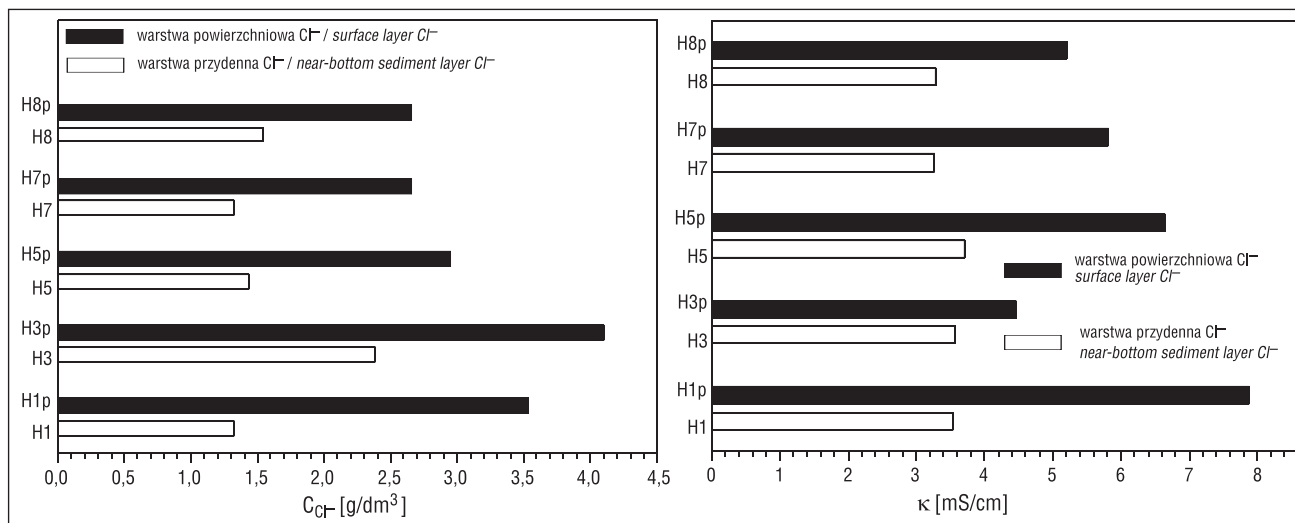
przez wyskalowanie mapy rozkładu temperatur za pomocą filtrometru i gradientometru.

Korelacji między gradientem hydraulicznym a temperaturą wód Zatoki Puckiej praktycznie nie zaobserwowano (ryc. 4B). Można to uzasadnić zależnością gradientu hydraulicznego od lokalnej litologii strefy hyporeicznej w miejscu wykonania pomiaru oraz od warunków hydrogeologicznych, różniących się od strony północnej (Półwysep Helski) i od strony wschodniej (Wysoczyzny Pucka).

Współczynnik filtracji strefy hyporeicznej, czyli osadów zatoki, jest słabo skorelowany z temperaturą wód zatoki (ryc. 4C), gdyż zależy w największym stopniu od budowy i litologii strefy hyporeicznej.

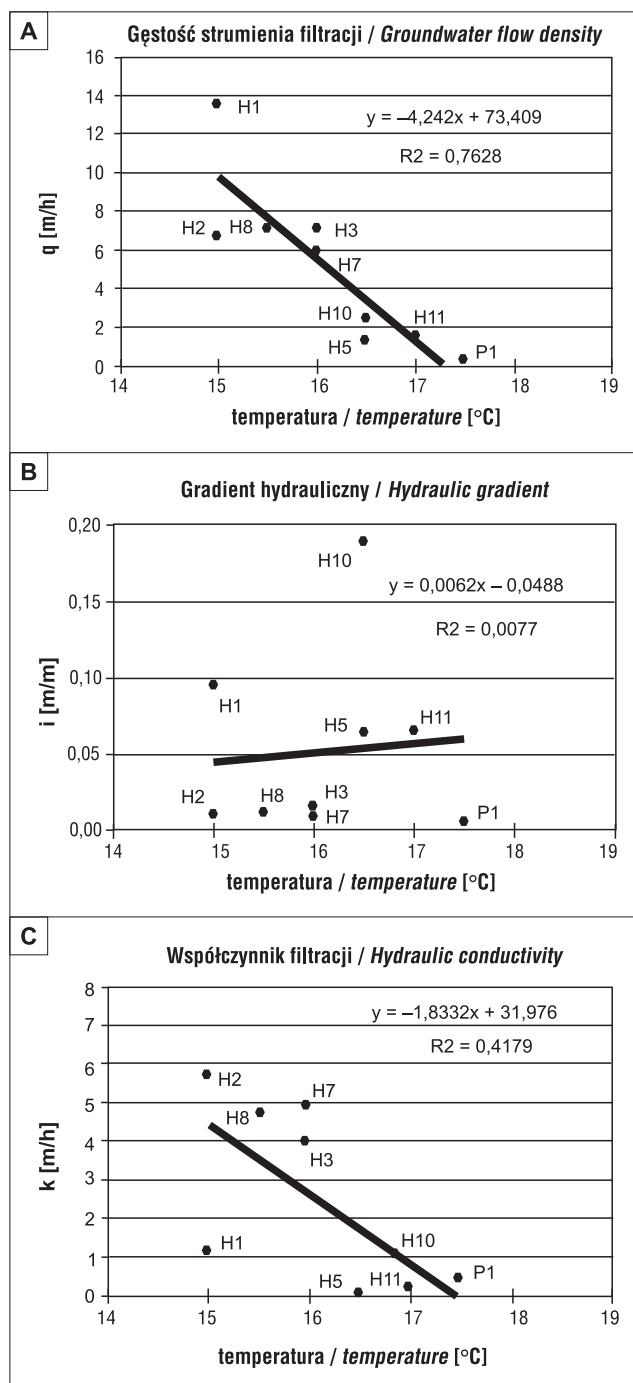
Przeprowadzone badania mogą stanowić punkt wyjścia do opracowania nowej metody oceny drenażu wód podziemnych przez przybrzeżne wody morskie. Wymagać to będzie dopracowania założeń metodycznych oraz uzupełnienia wyposażenia aparaturowego.

Temperatura wód Zatoki Puckiej zmienia się w zakresie zaledwie 3°C, przez co czułość proponowanej metody rozpoznania drenażu może być niewielka. Dlatego miejsca drenażu wód podziemnych o zróżnicowanym natężeniu



Ryc. 3. Zawartość jonu chlorkowego [g/dm³] i przewodnictwo elektryczne właściwe [mS/cm] w próbkach wody pobranych podczas pomiaru drenażu wód podziemnych w Zatoce Puckiej

Fig. 3. The concentration of chloride ion [g/dm³] and the value of electrical conductivity [mS/cm] in water samples taken during the groundwater drainage measurement in Puck Bay



Ryc. 4. Zależność: **A** – gęstości strumienia filtracji od temperatury; **B** – gradientu hydraulicznego od temperatury; **C** – współczynnika filtracji od temperatury

Fig. 4. Correlation between the coefficient of: **A** – groundwater flow density and temperature; **B** – hydraulic gradient and temperature; **C** – hydraulic conductivity and temperature

warto wyznaczać na podstawie rozkładu temperatur zarówno letnich, jak i zimowych, z kilkuletniego okresu obserwacji. Interpretacja obrazów termowizyjnych Zatoki Puckiej zarejestrowanych w dłuższym okresie czasu powinna prowadzić do podziału Zatoki Puckiej na strefy drenażu wód podziemnych o zróżnicowanym natężeniu. Dla każdej z wyznaczonych stref drenażu należy wykonać pomiary gęstości strumienia filtracji oraz gradientu hydraulicznego za pomocą filtrometru i gradientometru. Liczba i rozmieszczenie punktów pomiarowych w poszczegól-

nych strefach uzależnione będą od oczekiwanej dokładności rozpoznania hydrogeologicznego. Należy wybierać miejsca o dużych powierzchniach jednakowej temperatury wody. Niewielkie fragmenty zatoki o wyraźnie zróżnicowanej temperaturze mogą być trudne do odnalezienia na morzu. Wykonanie trudnych technicznie pomiarów gęstości strumienia filtracji oraz gradientu hydraulicznego wymagać będzie dostosowania filtrometru i gradientometru do badań w warunkach morskich. Konieczna będzie kontrola głębokości wbicia filtrometru i gradientomierza za pomocą kamery podwodnej na wysięgniku, bez konieczności angażowania nurka. Klosz filtrometru oraz korpus gradientometru trzeba będzie wyposażyć w czujnik temperatury, który umożliwi pomiar temperatury wody bezpośrednio przy dnie.

Badania związane z konstrukcją i kalibracją filtrometru i gradientomierza zostały częściowo sfinansowane w ramach projektów NCN:

1. UMO-2011/01/N/ST10/02012 zatytułowany: „Identyfikacja parametrów filtracyjnych utworów dennych w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych”.

2. NCN 2015/17/8/ST10/01833 zatytułowany: „Uwarunkowania dobowych fluktuacji poziomu wody w strefach źródłkowych i rzekach z uwzględnieniem oddziaływania strefy hyporeicznej”.

LITERATURA

- BOLAŁEK J., FALKOWSKA L., JANKOWSKA H., VERSHININ A. 1991 – Investigation on the transfer of chemical substances AT the water-sediment interface in the Puck Bay. *Oceanologia*, 30: 105–123.
- CHUDZIAK Ł., MARCINIAK M. 2012 – Badania laboratoryjne drenażu i infiltracji wody przez osady dennie na modelu fizycznym. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 451 (13): 17–25.
- CHUDZIAK Ł. 2015 – Identyfikacja parametrów filtracyjnych w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. *Bogucki Wyd. Nauk.*, Poznań.
- JANIK B., KOWALIK A., MARCINIAK M. 1989 – Pomiary infiltrometryczne jako podstawa oceny udziału wód rzecznych w zasileniu ujęcia drenażowego Reda-Pieleszewo. *Prz. Geol.*, 37 (10): 511–516.
- JANKOWSKA H. 1990 – Przejawy podmorskiego dopływu wód podziemnych do Zatoki Puckiej. *Przewodnik LXI Zjazdu PTG*. Wyd. AGH, Kraków: 92–98.
- JANKOWSKA H., BOLAŁEK J. 1990 – Jon chlorkowy w wodach porowych osadów dennych Zatoki Puckiej. *Prz. Geol.*, 38 (5/6): 253–259.
- JANKOWSKA H., RUDOWSKI S., UŚCINOWICZ S. 1992 – Sejsmokinastyczne badania dna Zatoki Gdańskiej. *Prz. Geof.*, 37 (1/2): 61–65.
- KOZERSKI B., KWATERKIEWICZ A. 1984 – Strefowość zasolenia wód podziemnych a ich dynamika na obszarze Delt Wisły. *Arch. Hydrotech.*, 31 (3): 232–255.
- NOWACKI J. 1993 – Hydrologia zlewiska i morfometria zatoki. [W:] Korzeniewski K. (red.), *Zatoka Pucka*. IO UG: 71–78.
- MARCINIAK M. 2017 – Badanie parametrów hydrogeologicznych strefy hyporeicznej za pomocą filtrometru i gradientomierza. *Metodyka wykonania pomiarów oraz instrukcja eksploatacji*. Mat. niepubl., WNGiG UAM, Poznań.
- MARCINIAK M., CHUDZIAK Ł. 2015 – Nowa metoda pomiaru współczynnika filtracji osadów dennych. *Prz. Geol.*, 63 (10/2): 919–925.
- MOJSKI E. (red.) 1995 – Atlas geologiczny południowego Bałtyku 1 : 500 000. Państw. Inst. Geol., Sopot–Warszawa.
- PIEKAREK-JANKOWSKA H. 1994 – Zatoka Pucka jako obszar drenażu wód podziemnych. Wyd. UG, Gdańsk.
- PIEKAREK-JANKOWSKA H. 1996 – Rodzaje drenażu wód podziemnych na wybrzeżu Zatoki Gdańskiej. *Prz. Geof.*, 3: 177–191.
- PIEKAREK-JANKOWSKA H. 2007 – Podmorski drenaż wód podziemnych gdańskiego systemu wodonośnego. [W:] Kozerski B. (red.), *Gdański system wodonośny*. Wyd. PG, Gdańsk.
- ROBINSON A.R., RÖHWER C. 1959 – Measuring seepage from irrigation channels. U.S. Dept. of Agriculture, Technical Bulletin, 1203, Washington, s. 82.
- SADURSKI A. 1989 – Górnokredowy system wód podziemnych Pomorza Wschodniego. *Zesz. Nauk. AGH*, 46, s. 140.
- UŚCINOWICZ S., ZACHOWICZ J., KRAMARSKA R. 2002 – Zarys budowy geologicznej dna Zalewu Puckiego. [W:] *Przewodnik LXXXIII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego*. Geologia regionu Gdańskiego: 95–100.