

Filtrometr i gradientometr – nowe urządzenia do badania wymiany hyporeicznej

Marek Marciniak¹



Filtrometr and gradientometr – new devices for hyporheic exchange study. Prz. Geol., 73: 495–504; doi: 10.7306/2025.57

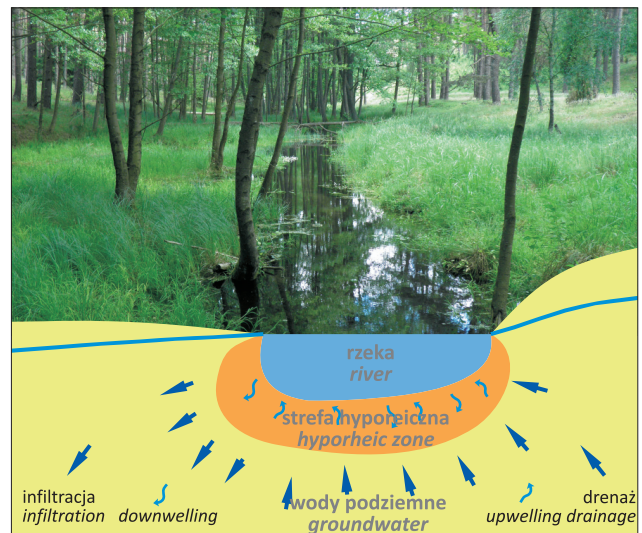
Abstract. The hyporheic zone (HZ) is defined as an active ecotone between the stream of surface water and groundwater. Many hydrological, hydrogeological, hydrobiological and biogeochemical processes occur in this zone. These processes provide a great potential for natural purification of organic compounds, nutrients and pathogens in streams and rivers. The recognition of the hydrodynamics of hyporheic zones is of great economic importance due to the great potential for hyporheic remediation and ecosystem services in surface waters. In this paper, two new measuring devices are presented: a filtrometer and a gradientometr. They enable direct measurement of the filtration flux density and the Vertical Hydraulic Gradient (VHG) in the hyporheic zone. The operating principle and construction of both devices are explained. The results of laboratory tests carried out on a specially designed stand are also discussed. The results of laboratory tests were analyzed by assessing the measurement uncertainties of the filtrometer and gradientometr. The measurement ranges of both devices were determined and the limitations of their applications were discussed. The filtrometer and gradientometr can be useful both in studies of the interaction of surface and groundwater and in studies of hyporheic exchange in bottom sediments.

Keywords: surface water, groundwater, hyporheic exchange, measuring devices.

Strefę hyporeiczną stanowią osady denne koryta rzeczno-ego, w których zachodzi wymiana wód strumienia lub rzeki oraz wód glebowych, wód strefy korzeniowej i wód podziemnych (Bencala, 2000). Współdziałanie wód powierzchniowych i podziemnych odbywa się poprzez drenaż wód podziemnych przez rzekę lub poprzez infiltrację wód rzecznych do warstwy wodonośnej. Natomiast wymiana wody w strefie hyporeicznej określana jest jako upwelling (ruch wody w kierunku rzeki) lub downwelling (ruch wody w kierunku warstwy wodonośnej (ryc. 1).

Wymiana hyporeiczna znajduje odzwierciedlenie w gradientach hydraulicznych, które występują w wielu skalach i zmieniają się w czasie (Boulton i in., 1998). Wiele dyscyplin naukowych prowadzi badania procesów hydrologicznych, hydrogeologicznych, hydrobiologicznych i biogeochemicznych zachodzących w strefach hyporeicznych strumieni i rzek (Lewandowski i in., 2019).

Strefa hyporeiczna charakteryzuje się stromymi gradientami hydraulicznymi, chemicznymi i biologicznymi (Smith, 2005). Adwekcyjny transport nietrwałych cząstek organicznych w korycie strumienia lub rzeki koncentruje aktywność drobnoustrojów w przypowierzchniowych obszarach strefy hyporeicznej. Strome gradienty aktywności biogeochemicznej mogą wyjaśnić, w jaki sposób płytka i ograniczona hydrologicznie strefa hyporeiczna może radykalnie wpłynąć na przetwarzanie materii organicznej w skali ekosystemu (Battin i in., 2003). Procesy biogeochemiczne zachodzące w strefie hyporeicznej stanowią ogromny potencjał dla naturalnego oczyszczania związków organicznych, składników odżywczych i patogenów w strumieniach miejskich, które często mają modyfikowany przepływ i są obciążane zanieczyszczeniami wody (Lawrence i in., 2013). Badania hydrodynamiki stref hyporeicznych mają wielkie znaczenie praktyczne ze względu na duży potencjał rekultywacji hyporeicznej w zakresie



Ryc. 1. Strefa hyporeiczna
Fig. 1. Hyporheic zone

efektywnego zarządzania oraz usług ekosystemowych w strumieniach i rzekach (Lewandowski i in., 2019).

Strefy hyporeiczne są na ogół silnie niejednorodne i trudno dostępne, dlatego ich monitorowanie wymaga trudnych do wykonania badań inwazyjnych dostarczających jedynie danych punktowych (Busato i in., 2019). Rozpoznanie niejednorodności przewodnictwa hydraulicznego i przepływu hyporeicznego ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia przenoszenia zanieczyszczeń oraz procesów hydrologicznych i biogeochemicznych obejmujących koryta strumieni i rzek oraz warstwy wodonośnej (Song i in., 2016).

¹ Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; mmarc@amu.edu.pl; ORCID ID: 0000-0002-5377-5585

Natężenie strumienia filtracji można oszacować metodą pośrednią poprzez pomiar pionowego współczynnika filtracji i pionowego gradientu hydraulicznego (VHG) przy zastosowaniu permeametry *in situ* oraz mikropiezometrów (Song i in., 2016). Wymianę hyporeiczną można także badać pośrednio metodą termiczną, co pozwala na zrozumienie wzorców wymiany wody w strefie hyporeicznej (Zhang i in., 2017).

W tej pracy proponuje się nową metodę bezpośrednio pomiaru gęstości strumienia filtracji za pomocą filtrometru oraz gradientu hydraulicznego przy użyciu gradientometru. Pomimo że oba przyrządy pomiarowe zostały zaprojektowane do badania współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych, to mogą być przydatne także w rozpoznaniu wymiany hyporeicznej.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Henry Darcy (1803–1858) na podstawie badań laboratoryjnych wykazał, że natężenie filtracji Q jest wprost proporcjonalne do przekroju F ośrodka porowatego oraz do różnicy ciśnień Δh wywołującej filtrację, natomiast odwrotnie proporcjonalne do drogi filtracji Δl . Darcy wprowadził współczynnik proporcjonalności k zwany współczynnikiem filtracji, który charakteryzuje zdolność ośrodka porowatego do przewodzenia wody. Prawo Darcy'ego (Darcy, 1856) można zapisać w postaci:

$$Q = kF \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [1]$$

Stosunek natężenia filtracji Q do powierzchni F określa gęstość strumienia filtracji q :

$$q = \frac{Q}{F} \quad [2]$$

Natomiast stosunek różnicy ciśnień Δh do drogi filtracji Δl jest nazywany gradientem hydraulicznym i :

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [3]$$

Uwzględniając w równaniu [1] zależności [2] oraz [3], uzyskuje się:

$$q = ki \quad [4]$$

Gęstość strumienia filtracji q odpowiada prędkości filtracji, zwanej też prędkością Darcy'ego. Po przekształceniu równania [4] można otrzymać wyrażenie pozwalające wyznaczyć wartość współczynnik filtracji k :

$$k = \frac{q}{i} \quad [5]$$

Do badania przepływu wody w strefie hyporeicznej skonstruowano filtrometr, który umożliwia pomiar gęstości strumienia filtracji q , oraz gradientometr, którym można zmierzyć gradient hydrauliczny i (Marciniak, Chudziak, 2015).

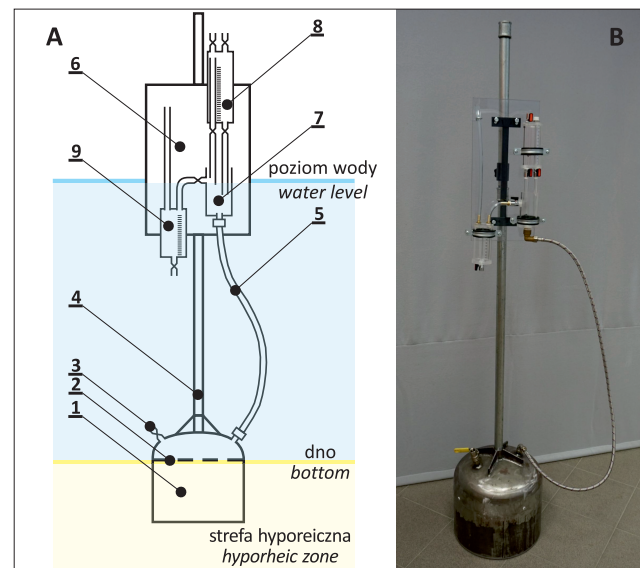
BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA FILTROMETRU

Zasadniczym elementem filtrometru (ryc. 2A, B) jest klosz (1), do którego jest przykręcony wspornik (4). Klosz wbija się na znaną głębokość w dno rzeki lub zbiornika wodnego. Kontrolę głębokości wbicia klosza umożliwia zamontowane w jego wnętrzu, wykonane z perforowanej blachy sito (2), które ogranicza możliwość wbicia klosza na głębokość większą niż pożądana. Sito dodatkowo konsoliduje naruszone podczas wbijania klosza osady denne poprzez ich docisk. W górnej części klosza znajduje się zawór odpowietrzający (3), który w czasie wbijania klosza w dno powinien być otwarty, natomiast w czasie pomiarów musi być zamknięty. Zestaw pomiarowy składa się z ruchomej tablicy (6), na której jest zamontowany zbiornik (7), połączony za pomocą węża (5) z kloszem (1). Na tablicy (6) znajdują się jeszcze zbiornik do pomiaru infiltracji (downwellingu) (8) oraz zbiornik do pomiaru drenażu (upwellingu) (9). Tablica (6) oraz zbiorniki (7), (8) i (9) zostały wykonane z plexi (Marciniak, Chudziak, 2012).

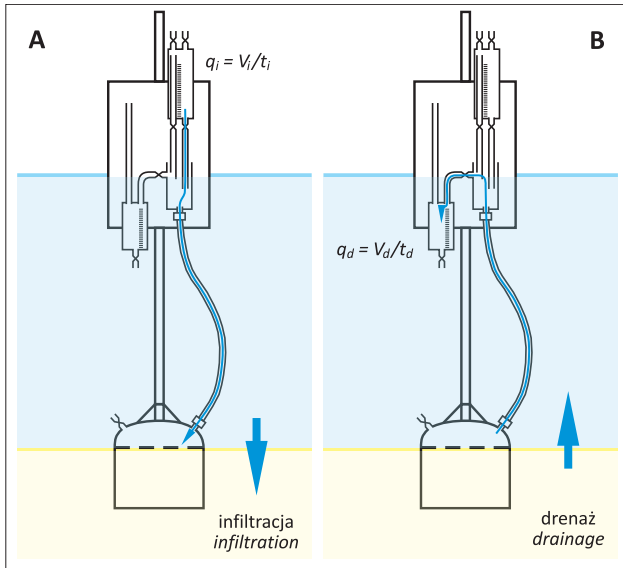
Oznaczenie gęstości strumienia infiltracji q_i wody wykonuje się poprzez pomiar w zbiorniku infiltracji (8) objętości wody V_i przepływającej przez klosz o powierzchni F w czasie t_i (ryc. 3A):

$$q_i = \frac{V_i}{F t_i} \quad [6]$$

Analogicznie oznaczenie gęstości strumienia drenażu q_d wody wykonuje się poprzez pomiar w zbiorniku drenażu (9) objętości wody V_d przepływającej przez klosz o powierzchni F w czasie t_d (ryc. 3B):



Ryc. 2. Filtrometr: **A** – schemat konstrukcyjny, **B** – widok ogólny (fot. M. Marciniak). Objasnienia: 1 – klosz, 2 – sito, 3 – zawór odpowietrzający, 4 – wspornik, 5 – wąż, 6 – tablica, 7 – zbiornik, 8 – zbiornik do pomiaru infiltracji, 9 – zbiornik do pomiaru drenażu
Fig. 2. Filtrometer: **A** – construction outline; **B** – general view (photo by M. Marciniak). Explanations: 1 – steel dome, 2 – sieve, 3 – vent valve, 4 – support, 5 – hose, 6 – console, 7 – container, 8 – infiltration measurement container, 9 – drainage measurement container



Ryc. 3. Działanie filtrometru podczas pomiaru: A – infiltracji, B – drenażu

Fig. 3. Operation of the filtrometer during measurement: A – infiltration, B – drainage

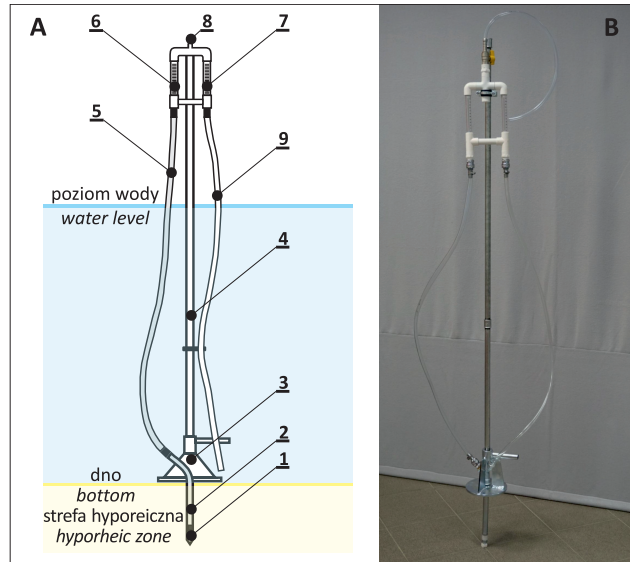
$$q_d = \frac{V_d}{Ft_d} \quad [7]$$

W efekcie pojedynczego pomiaru otrzymuje się punktową gęstość strumienia infiltracji lub drenażu. Aby rozpoznać zmienność przestrzenną procesu infiltracji lub drenażu, czynności pomiarowe należy powtarzać w profilach poprzecznych przez rzekę bądź w punktach pomiarowych zlokalizowanych na dnie zbiornika wodnego, zlokalizowanych względem siebie w odległościach dostosowanych do wymaganej dokładności rozpoznania hydrologicznego.

BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA GRADIENTOMETRU

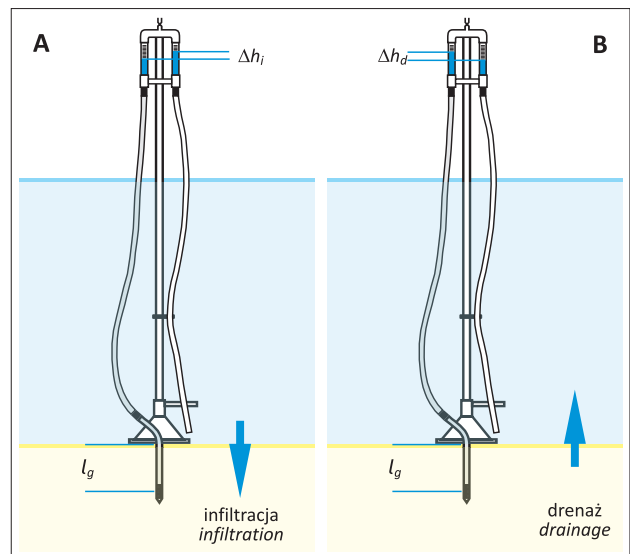
Do dolnej części korpusu (3) gradientometru (ryc. 4A) jest przyspawana rurka (2) zakończona krótkim filtrem (1). Do górnej części korpusu (3) jest przykręcony wspornik (4). Rurka (2) z filtrem (1) jest wciskana w dno rzeki lub zbiornika wodnego na głębokość odpowiadającą głębokości wbicia kłosa filtrometru. Poprzez filtr (1) woda z warstwy wodonośnej swobodnie napływa do wnętrza rurki (2), do której jest podłączony węz z dwoma szybkozłączami (5). Druga końcówka węza (5) jest podłączona do układu pomiarowego w kształcie odwróconej U-rurki. Układ pomiarowy stanowią: rurka do pomiaru poziomu wód podziemnych (6), rurka do pomiaru poziomu wód powierzchniowych (7) oraz zawór (8). Do rurki (7) jest podłączony węz z jednym szybkozłączem (9), którego drugi koniec zostaje umieszczony przy dnie rzeki lub zbiornika wodnego. Widok ogólny gradientometru przedstawiono na rycinie 4B.

Pomiar gradientu hydraulicznego odbywa się poprzez zasysanie wody podziemnej i powierzchniowej do układu pomiarowego. Aby wykonać pomiar należy wywołać podciśnienie, zasysając powietrze przez zawór (8). Spowoduje to podniesienie poziomu wody w obu rurkach pomiarowych (6) oraz (7). Gdy w obu rurkach poziom wody podniesie się do wysokości środka skali zawór (8) należy



Ryc. 4. Gradientometr: A – schemat konstrukcyjny; B – widok ogólny (fot. M. Marciniak). Objasnienia: 1 – filtr, 2 – rurka, 3 – korpus, 4 – wspornik, 5 – węz z dwoma szybkozłączami, 6 – rurka do pomiaru poziomu wód podziemnych, 7 – rurka do pomiaru poziomu wód powierzchniowych, 8 – zawór, 9 – węz z jednym szybkozłączem

Fig. 4. Gradientometer: A – construction outline; B – general view (photo by M. Marciniak). Explanations: 1 – screen, 2 – piezometric tube, 3 – steel corpus, 4 – support, 5 – hose with two quick couplers, 6 – groundwater level measurement tube, 7 – surface water level measurement tube, 8 – valve, 9 – hose with one quick coupler



Ryc. 5. Działanie gradientometru podczas pomiaru: A – infiltracji, B – drenażu

Fig. 5. Operation of the gradientometer during measurement: A – infiltration, B – drainage

zamknąć. Wytworzone w układzie pomiarowym podciśnienie utrzymuje poziom wody podziemnej i powierzchniowej w rurkach pomiarowych (6) oraz (7).

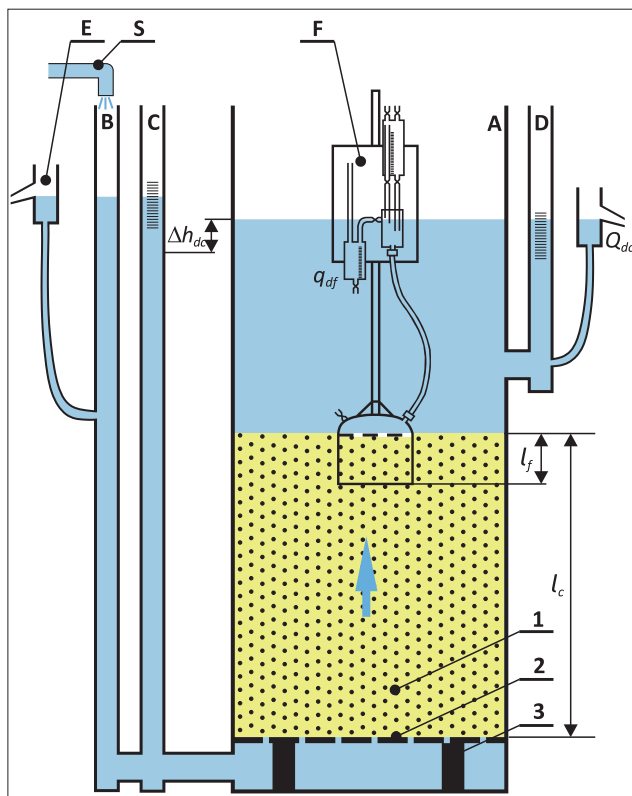
Podczas infiltracji poziom wody w rurce (7) znajduje się wyżej niż w rurce (6). Gradient hydrauliczny i_i oblicza się dzieląc różnicę ciśnień Δh_i przez głębokość l_g wbicia gradientometru w osady denne (ryc. 5A):

$$i_i = \frac{\Delta h_i}{l_g} \quad [8]$$

Natomiast podczas drenażu poziom wody w rurce (7) znajduje się niżej niż w rurce (6). Gradient hydrauliczny i_d oblicza się dzieląc różnicę ciśnień Δh_d przez głębokość l_g wbicia gradientometru w osady denne (ryc. 5B):

$$i_d = \frac{\Delta h_d}{l_g} \quad [9]$$

Znak gradientu hydraulicznego jest umowny. W hydrologii przyjmuje się, że drenaż wód podziemnych zasila wody powierzchniowe i dlatego gradient hydrauliczny ma



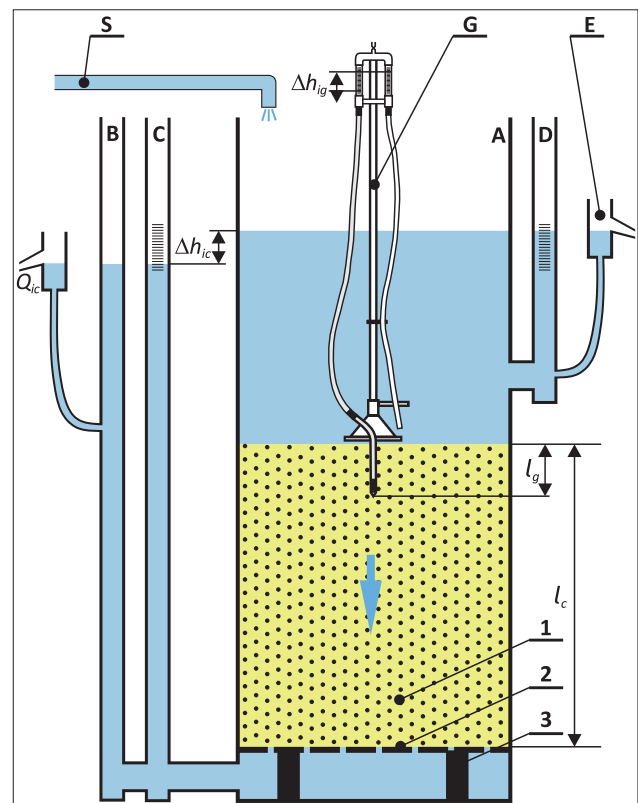
Ryc. 6. Kalibracja filtrometru na stanowisku laboratoryjnym podczas symulacji drenażu. Objasnienia: A – kolumna filtracyjna, B – rura zasilająca, C – rura do pomiaru poziomu wody pod złożem piaszczystym, D – rura do pomiaru poziomu wody nad złożem piaszczystym, E – przelew nadmiarowy, F – filtrometr, S – zasilanie wodą stanowiska laboratoryjnego, 1 – złożo piaszczyste w kolumnie filtracyjnej, 2 – sito z siatką filtracyjną, 3 – podpory sita, Δh_{dc} – różnica poziomu wody wywołująca drenaż wody w kolumnie filtracyjnej, Q_{dc} – natężenie strumienia drenażu w kolumnie filtracyjnej, q_{df} – gęstość strumienia drenażu w filtrometrze, l_c – miąższość złoża w kolumnie filtracyjnej, l_f – głębokość wbicia filtrometru

Fig. 6. Calibration of the filtermeter at the laboratory stand during drainage simulation. Explanations: A – filter column, B – supply pipe, C – pipe for measuring the water level under the sand bed, D – pipe for measuring the water level above the sand bed, E – overflow, F – filtermeter, S – water supply to the laboratory stand, 1 – sand bed in the filter column, 2 – sieve with filter meshwork, 3 – supports of sieve, Δh_{dc} – water level difference causing water drainage in the filter column, Q_{dc} – drainage flow rate in the filter column, q_{df} – drainage flow density in the filtermeter, l_c – bed thickness in the filter column, l_f – filtermeter insertion depth

znak dodatni. W hydrogeologii funkcjonuje konwencja odwrotna. Drenaż wód podziemnych zmniejsza zasoby wód podziemnych i dlatego ma znak ujemny. W tym opracowaniu przyjęto konwencję hydrologiczną.

BADANIA LABORATORYJNE PARAMETRÓW METROLOGICZNYCH FILTROMETRU I GRADIENTOMETRU

Dla rozpoznania parametrów metrologicznych filtrometru i gradientometru zaprojektowano i wykonano specjalne stanowisko laboratoryjne, które umożliwiło symulację infiltracji wody do złoża piaszczystego (ryc. 6) oraz drenaż wód z tego złoża (ryc. 7). Zasadniczym elementem



Ryc. 7. Kalibracja gradientometru na stanowisku laboratoryjnym podczas symulacji infiltracji. Objasnienia: A – kolumna filtracyjna, B – rura do odpływu wody, C – rura do pomiaru poziomu wody pod złożem piaszczystym, D – rura do pomiaru poziomu wody nad złożem piaszczystym, E – przelew nadmiarowy, G – gradientometr, S – zasilanie wodą stanowiska laboratoryjnego, 1 – złożo piaszczyste w kolumnie filtracyjnej, 2 – sito z siatką filtracyjną, 3 – podpory sita, Δh_{ic} – różnica poziomu wody wywołująca infiltrację wody w kolumnie filtracyjnej, Q_{ic} – natężenie strumienia infiltracji w kolumnie filtracyjnej, Δh_{ig} – różnica poziomu wody w gradientometrze, l_c – miąższość złoża w kolumnie filtracyjnej, l_g – głębokość wbicia gradientometru

Fig. 7. Calibration of the gradientometer at the laboratory stand during infiltration simulation. Explanations: A – filter column, B – water drain pipe, C – water level measuring pipe under the sand bed, D – water level measuring pipe above the sand bed, E – overflow, G – gradientometer, S – water supply to the laboratory stand, 1 – sand bed in the filter column, 2 – sieve with filter meshwork, 3 – supports of sieve, Δh_{ic} – water level difference causing water infiltration in the filter column, Q_{ic} – infiltration flow rate in the filter column, Δh_{ig} – water level difference in the gradientometer, l_c – bed thickness in the filter column, l_g – gradientometer insertion depth

stanowiska laboratoryjnego była kolumna filtracyjna (A) o średnicy wewnętrznej 72 cm i wysokości 250 cm.

Złoże piaszczyste (1) o miąższości 89 cm zasypano na siatce filtracyjnej umieszczonej na sicie (2) umocowanym na podporach (3) na dnie kolumny filtracyjnej (A). Poniżej

oraz powyżej złoża piaszczystego zamontowano odpowiedni układ rur, które umożliwiały dwukierunkowe zasilanie kolumny oraz pomiar poziomu wody pod i nad złożem.

Na rycinie 8 zaprezentowano widok stanowiska laboratoryjnego od góry, gdzie z pomostu drewnianego wbijano w złoże piaszczyste filtrometr i gradientometr oraz od dołu, gdzie pokazano układ rur pomiarowych i zasilających stanowisko laboratoryjne (Chudziak, Marciniak, 2012).

Dobór głębokości wbijania gradientometru

W pierwszym etapie badań laboratoryjnych wykonano dwie serie pomiarów, których celem było wyznaczenie optymalnej długości rurki l_g (poz. 2 na ryc. 4) wbijanej w osady denne strefy hyporeicznej. Na kolumnie filtracyjnej gradient zadano poprzez odpowiednie ustawienie przewłków nadmiarowych. Głębokość wbicia gradientometru zmieniano poprzez wymianę rurek (2) o długościach 5, 10, 15, 20 25 oraz 30 cm. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1 oraz przedstawiono na rycinie 9. Procentowe niepewności pomiarowe wyznaczono zgodnie z wzorem:

$$\delta i = 100 \cdot \frac{|i_c - i_g|}{i_c} \quad [10]$$

gdzie:

δi – niepewność procentowa pomiaru gradientu infiltracji lub drenażu,

i_c – gradient infiltracji lub drenażu zmierzony w kolumnie filtracyjnej,

i_g – gradient infiltracji lub drenażu zmierzony gradientometrem.

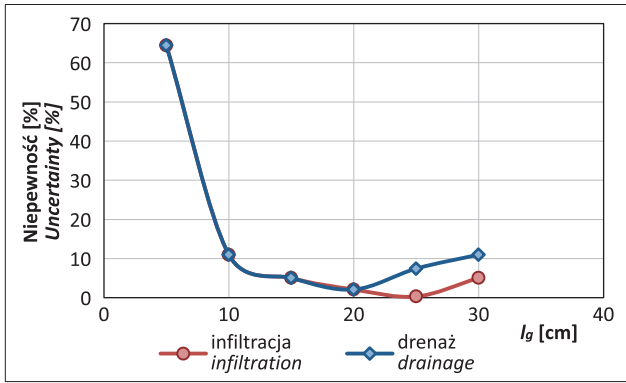
←

Ryc. 8. Widok stanowiska laboratoryjnego od góry i z dołu. Objasnienia: A – kolumna filtracyjna, B – rura odpływu wody (przy infiltracji) lub dopływu wody (przy drenażu), C – rura do pomiaru poziomu wody pod złożem piaszczystym, D – rura do pomiaru poziomu wody nad złożem piaszczystym, E – przelew nadmiarowy, F – filtrometr, G – gradientometr. Fot. Ł. Chudziak

Fig. 8. View of the laboratory stand from the top and bottom. Explanations: A – filter column, B – water outlet pipe (for infiltration) or water inlet pipe (for drainage), C – pipe for measuring the water level under the sand bed, D – pipe for measuring the water level above the sand bed, E – overflow, F – filtermeter, G – gradientometer. Photo by Ł. Chudziak

Tab. 1. Wyniki testów laboratoryjnych gradientometru
Table 1. Results of laboratory tests of the gradientometer

Infiltracja / Infiltration							Drenaż / Drainage						
Kolumna / Column			Gradientometr / Gradientometer				Kolumna / Column			Gradientometr / Gradientometer			
Δh_{ic}	l_c	i_{ic}	l_g	Δh_{ig}	i_{ig}	δi_i	Δh_{dc}	l_c	i_{dc}	l_g	Δh_{dg}	i_{dg}	δi_d
cm	cm	cm/cm	cm	cm	cm/cm	%	cm	cm	cm/cm	cm	cm	cm/cm	%
-5	89	-0,056	5	-0,1	-0,020	64,4	5	89	0,056	5	0,1	0,020	64,4
			10	-0,5	-0,050	11,0				10	0,5	0,050	11,0
			15	-0,8	-0,053	5,1				15	0,8	0,053	5,1
			20	-1,1	-0,055	2,1				20	1,1	0,055	2,1
			25	-1,4	-0,056	0,3				25	1,3	0,052	7,4
			30	-1,6	-0,053	5,1				30	1,5	0,050	11,0



Ryc. 9. Niepewności pomiarowe gradientów hydraulicznych przy różnych głębokościach wbijania gradientometru w osady denne strefy hyporeicznej

Fig. 9. Measurement uncertainties of hydraulic gradients at different depths of the gradientometer penetration into the bottom sediments of the hyporeic zone

Uznano, że optymalną głębokością l_g wbijania gradientometru będzie 20 cm. Przy głębokościach mniejszych występował uprzywilejowany kontakt hydrauliczny wzdłuż rurki (2), a przy głębokościach większych trudno było wcisnąć gradientometr. Przyjęto, że ta sama głębokość wbijania w osady denne będzie optymalna dla filtrometru.

Stale czasowe filtrometru i gradientometru

W drugim etapie badań laboratoryjnych testowano parametry dynamiczne filtrometru i gradientometru zarówno dla warunków infiltracji, jak i drenażu. Najpierw zadano i ustabilizowano przez dwie doby warunki filtracji w kolumnie, następnie wbito filtrometr i gradientometr w złożę piaszczyste i rejestrowano co pół godziny wskazania obu przyrządów. Wyniki obserwacji filtrometrycznych zestawiono w tabelach 2 i 3 oraz przedstawiono na rycinie 10.

Procentowe niepewności pomiarowe wyznaczono zgodnie z wzorem:

$$\delta q = 100 \cdot \frac{|q_c - q_f|}{q_c} \quad [11]$$

gdzie:

δq – niepewność procentowa pomiaru gęstości strumienia infiltracji lub drenażu,

q_c – gęstość strumienia infiltracji lub drenażu zmierzona w kolumnie filtracyjnej,

q_f – gęstość strumienia infiltracji lub drenażu zmierzona filtrometrem.

Uznano, że warunki filtracji wody w układzie złoża piaszczyste–filtrometr stabilizują się po upływie około godziny od momentu wbicia filtrometru w złożę piaszczyste. Po tym czasie niepewności pomiarowe są mniejsze niż 10% (6,5% dla drenażu i 3,5% dla infiltracji).

Wyniki analogicznego testu dla gradientometru przedstawiono w tabeli 4 oraz na rycinie 11.

Gradient hydrauliczny w układzie złoża piaszczyste–filtrometr stabilizował się już po 15 minutach i był stabilny przez cały czas prowadzenia obserwacji. W tym przypadku niepewności pomiarowe nieznacznie przekraczały 2%.

Powtarzalność pomiarów filtrometrycznych i gradientometrycznych

W trzecim etapie badań laboratoryjnych sprawdzano powtarzalność pomiarów filtrometrycznych gradientometrycznych. W tym celu zadano i ustabilizowano przez dwie doby warunki filtracji w kolumnie. Następnie w kolejnych dniach wbijano filtrometr i gradientometr w złożę piaszczyste i rejestrowano wskazania obu przyrządów. Wyniki obserwacji filtrometrycznych zestawiono w tabelach 5 i 6 oraz przedstawiono na rycinie 12. Natomiast wyniki obser-

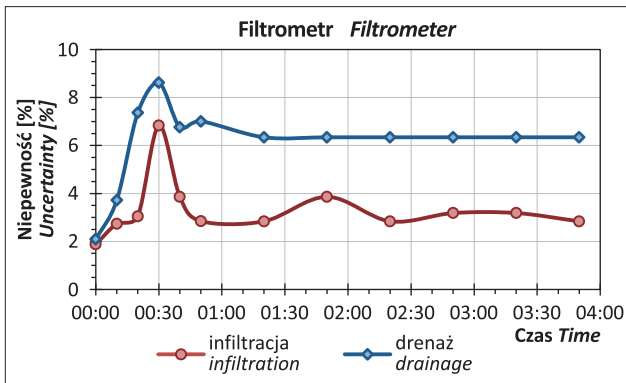
Tab. 2. Wyniki laboratoryjnego testu dynamiki filtrometru dla warunków infiltracji

Table 2. Results of the laboratory test of the filtrometer dynamics for infiltration conditions

Czas Time	Infiltracja / Infiltration										δq_i
	Kolumna / Column					Filtrometr / Filtrometer					
	V_{ic}	t_{ic}	Q_{ic}	F_c	q_{ic}	V_i	t_i	Q_i	F	q_i	
cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	%	
00:00	38	60	0,633	4113,3	1,54E-04	47,6	345	0,138	913,27	1,51E-04	1,88
00:10	37	60	0,617		1,50E-04	42,2	300	0,141		1,54E-04	2,74
00:20	34	60	0,567		1,38E-04	41,1	317	0,130		1,42E-04	3,05
00:30	35	60	0,583		1,42E-04	42,2	305	0,138		1,52E-04	6,83
00:40	36	60	0,600		1,46E-04	42,2	305	0,138		1,52E-04	3,86
00:50	36	60	0,600		1,46E-04	42,2	308	0,137		1,50E-04	2,85
01:20	36	60	0,600		1,46E-04	41,1	300	0,137		1,50E-04	2,84
01:50	36	60	0,600		1,46E-04	42,2	305	0,138		1,52E-04	3,86
02:20	36	60	0,600		1,46E-04	41,1	300	0,137		1,50E-04	2,84
02:50	36	60	0,600		1,46E-04	41,1	299	0,137		1,51E-04	3,18
03:20	36	60	0,600		1,46E-04	42,2	307	0,137		1,51E-04	3,18
03:50	36	60	0,600		1,46E-04	41,1	300	0,137		1,50E-04	2,84

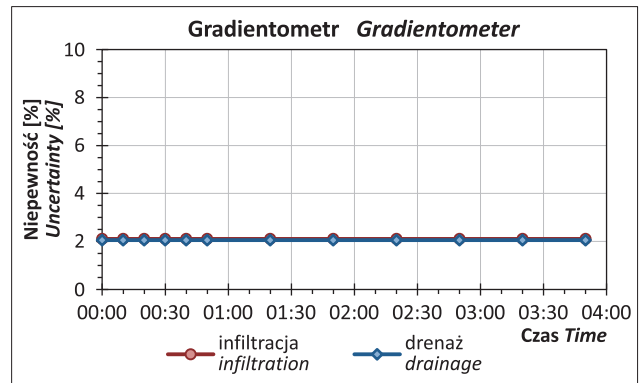
Tab. 3. Wyniki laboratoryjnego testu dynamiki filtrometru dla warunków drenażu
Table 3. Results of the laboratory test of the filtrometer dynamics for drainage conditions

Drenaż / Drainage											
Czas Time	Kolumna / Column					Filtrometr / Filtrometer					δq_d
	V_{dc}	t_{dc}	Q_{dc}	F_c	q_{dc}	V_d	t_d	Q_d	F	q_d	
	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	
00:00	46	60	0,767	4113,3	1,86E-04	60	360	0,167	913,27	1,82E-04	2,09
00:10	46	60	0,767		1,86E-04	59	360	0,164		1,79E-04	3,72
00:20	47	60	0,783		1,90E-04	58	360	0,161		1,76E-04	7,37
00:30	46	60	0,767		1,86E-04	56	360	0,156		1,70E-04	8,62
00:40	45	60	0,750		1,82E-04	64	360	0,178		1,95E-04	6,76
00:50	47	60	0,783		1,90E-04	67	360	0,186		2,04E-04	7,01
01:20	48	60	0,800		1,94E-04	68	360	0,189		2,07E-04	6,34
01:50	48	60	0,800		1,94E-04	68	360	0,189		2,07E-04	6,34
02:20	48	60	0,800		1,94E-04	68	360	0,189		2,07E-04	6,34
02:50	48	60	0,800		1,94E-04	68	360	0,189		2,07E-04	6,34
03:20	48	60	0,800		1,94E-04	68	360	0,189		2,07E-04	6,34
03:50	48	60	0,800		1,94E-04	68	360	0,189		2,07E-04	6,34



Ryc. 10. Zmiany w czasie niepewności pomiarowych gęstości strumienia filtracji

Fig. 10. Changes of the measurement uncertainty of the filtration flux density over time



Ryc. 11. Zmiany w czasie niepewności pomiarowych gradientu hydraulicznego

Fig. 11. Changes in the hydraulic gradient measurement uncertainty over time

Tab. 4. Wyniki laboratoryjnego testu dynamiki gradientometru dla warunków infiltracji i drenażu
Table 4. Results of the laboratory test of the gradientometer dynamics for infiltration and drainage conditions

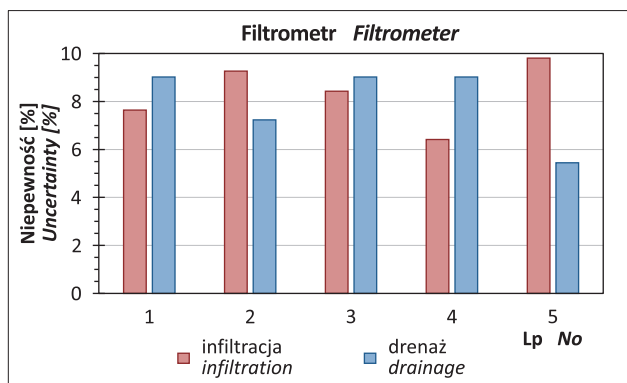
Czas Time	Infiltracja / Infiltration							Drenaż / Drainage						
	Kolumna / Column			Gradientometr / Gradientometer				Kolumna / Column			Gradientometr / Gradientometer			
	Δh_{ic}	l_c	i_{ic}	Δh_{ig}	l_g	i_{ig}	δ_i	Δh_{dc}	l_c	i_{dc}	Δh_{dg}	l_g	i_{dg}	δ_d
	cm	cm	cm/cm	cm	cm	cm/cm	%	cm	cm	cm/cm	cm	cm	cm/cm	%
00:00	-5	89	-0,056	-1,1	20	-0,055	2,1	5	89	0,056	1,1	20	0,055	2,1
00:10				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
00:20				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
00:30				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
00:40				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
00:50				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
01:20				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
01:50				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
02:20				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
02:50				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
03:20				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1
03:50				-1,1		-0,055	2,1				1,1		0,055	2,1

Tab. 5. Wyniki laboratoryjnego testu powtarzalności pomiarów filtrometrem dla warunków infiltracji
Table 5. Results of the laboratory test of the repeatability of filtrometer measurements for infiltration conditions

Infiltracja / Infiltration											
Lp. No.	Kolumna / Column					Filtrometr / Filtrometer					δq_i
	V_{ic}	t_{ic}	Q_{ic}	F_c	q_{ic}	V_i	t_i	Q_i	F	q_i	
	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	
1	35	60	0,583	4113,3	1,42E-04	50	418	0,120	913,27	1,31E-04	7,64
2	35	60	0,583		1,42E-04	51	434	0,118		1,29E-04	9,27
3	35	60	0,583		1,42E-04	51	430	0,119		1,30E-04	8,43
4	35	60	0,583		1,42E-04	52	429	0,121		1,33E-04	6,41
5	35	60	0,583		1,42E-04	50	428	0,117		1,28E-04	9,80
Średnia / Average					1,42E-04					1,30E-04	8,31

Tab. 6. Wyniki laboratoryjnego testu powtarzalności pomiarów filtrometrem dla warunków drenażu
Table 6. Results of the laboratory test of the repeatability of filtrometer measurements for drainage conditions

Drenaż / Drainage											
Lp. No.	Kolumna / Column					Filtrometr / Filtrometer					δq_d
	V_{dc}	t_{dc}	Q_{dc}	F_c	q_{dc}	V_d	t_d	Q_d	F	q_d	
	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	cm ³	s	cm ³ /s	cm ²	cm ³ /s/cm ²	
1	36	60	0,600	4113,3	1,46E-04	61	420	0,145	913,27	1,59E-04	9,02
2	36	60	0,600		1,46E-04	60	420	0,143		1,56E-04	7,24
3	36	60	0,600		1,46E-04	61	430	0,145		1,59E-04	9,02
4	36	60	0,600		1,62E-04	61	420	0,145		1,59E-04	5,45
5	36	60	0,600		1,46E-04	59	420	0,140		1,54E-04	5,45
Średnia / Average					1,46E-04					1,57E-04	7,95



Ryc. 12. Zmienność niepewności pomiarowych podczas powtórzeń pomiarów filtrometrycznych w kolejnych dniach

Fig. 12. Variability of measurement uncertainty during repetitions of filtrometric measurements on subsequent days

wacji gradientometrycznych zestawiono w tabeli 7 i przedstawiono na rycinie 13.

Filtracja wody w kolumnie była stała przez cały czas prowadzenia obserwacji. Natomiast wbijanie i wyciąganie zarówno filtrometru i gradientometru w kolejnych dniach prowadziło do niepewności pomiarowych nie przekraczających 10%, co należy uznać za dobrą powtarzalność obu pomiarów.

Zakresy pomiarowe

Na podstawie wyników testów laboratoryjnych, przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych oraz oceny możliwości pomiaru objętości V , a także czasu t w filtrometrze i różnicy poziomu wody Δh w gradientometrze przejęto następujące zakresy pomiarowe:

- filtrometr: $q \in (5 \cdot 10^{-6}; 2 \cdot 10^{-3}) \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
- gradientometr: $i \in (0,005; 0,500) \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Filtrometr i gradientometr można stosować do badań w utworach piaszczystych o współczynniku filtracji z zakresu: $k \in (1 \cdot 10^{-6}; 5 \cdot 10^{-3}) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Badania laboratoryjne filtrometru i gradientometru przeprowadził Łukasz Chudziak w ramach dysertacji doktorskiej (Chudziak, 2015). Po zakończeniu badań laboratoryjnych i wykonaniu pierwszych testów terenowych przygotowano instrukcję stosowania filtrometru i gradientometru zawierającą szczegółowe zalecenia praktyczne dotyczące metodyki wykonania i interpretacji pomiarów (Marciniak, 2018).

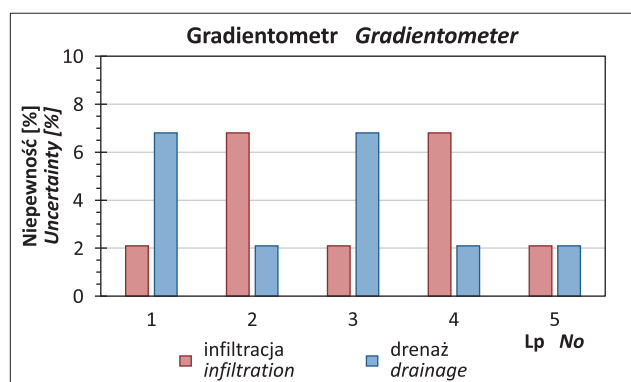
DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono dwa przyrządy pomiarowe. Filtrometr umożliwia pomiar *in situ* gęstości strumienia filtracji w osadach dennych strefy hyporeicznej w warunkach zarówno infiltracji (downwellingu), jak i drenażu (upwellingu). Natomiast gradientometr pozwala rozpoznać *in situ* kierunek filtracji oraz wyznaczyć pionowy gradient hydrauliczny (VHG) w strefie hyporeicznej. Na podstawie testów laboratoryjnych określono optymalne parametry konstrukcyjne oraz rozpoznano charakterystyki metrologiczne obu przyrządów. Zarówno filtrometr, jak i gradientometr zostały kilkakrotnie zastosowane w badaniach hydrologicznych i hydrogeologicznych.

Prototypy filtrometru i gradientometru wykorzystał w swojej dysertacji doktorskiej Ł. Chudziak. Przedmiotem badań było współdziałanie wód powierzchniowych i podziemnych w warunkach drenażu i infiltracji. Drenaż wód podziemnych badano w meandrach rzeki Parsęty w rejonie

Tab. 7. Wyniki laboratoryjnego testu powtarzalności pomiarów gradientometrem dla warunków infiltracji i drenażu
Table 7. Results of the laboratory test of the repeatability of gradientometer measurements for infiltration and drainage conditions

Lp. No.	Infiltracja / Infiltration							Drenaż / Drainage						
	Kolumna / Column			Gradientometr / Gradientometer				Kolumna / Column			Gradientometr / Gradientometer			
	Δh_{ic}	l_c	i_{ic}	Δh_{ig}	l_g	i_{ig}	δi_i	Δh_{dc}	l_c	i_{dc}	Δh_{dg}	l_g	i_{dg}	δi_d
	cm	cm	cm/cm	cm	cm	cm/cm	%	cm	cm	cm/cm	cm	cm	cm/cm	%
1	-5	89	-0,056	-1,1	20	-0,055	2,10	5	89	0,056	1,2	20	0,060	6,80
2				-1,2		-0,060	6,80				1,1		0,055	2,10
3				-1,1		-0,055	2,10				1,2		0,060	6,80
4				-1,2		-0,060	6,80				1,1		0,055	2,10
5				-1,1		-0,055	2,10				1,1		0,055	2,10
Średnia / Average			-0,056			-0,057	3,98			0,056		0,057	3,98	



Ryc. 13. Zmienność niepewności pomiarowych podczas powtórzeń pomiarów gradientometrycznych w kolejnych dniach

Fig. 13. Variability of measurement uncertainty during repetitions of gradientometric measurements on subsequent days

Storkowa w powiecie szczecineckim. Najpierw wykonano pomiary filtrometrem, a następnie potwierdzono wielkość drenażu pomiarami natężenia przepływu wody w rzece na dwóch przekrojach hydrometrycznych. Natomiast infiltrację wód powierzchniowych badano na ujęciu infiltracyjnym Dębina w Poznaniu. Pomiary filtrometryczne i gradientometryczne umożliwiły rozpoznanie tempa i zasięgu kolmatacji dna stawów infiltracyjnych (Chudziak, 2013).

Badania filtrometryczne i gradientometryczne w osadach dennych Zatoki Puckiej wykonał w latach 2015–2017 zespół pod kierunkiem L. Łęczyńskiego. Potwierdzono drenaż wód podziemnych przez zatokę. Stwierdzono istotną korelację pomiędzy temperaturą wód Zatoki Puckiej odczytaną z satelitarnej fotografii termowizyjnej a gęstością strumienia filtracji zmierzoną z pokładu kutra hydrograficznego za pomocą filtrometru. Natomiast pomierzone gradienty potencjału hydraulicznego wskazują na możliwość wymiany hyporeicznej wód morskich i podziemnych, co dodatkowo potwierdziły gradienty hydrochemiczne koncentracji chlorków (Łęczyński i in., 2025).

Funkcjonowanie strefy hyporeicznej rzeki Moszcznicy w rejonie Łodzi badał M. Ziulkiewicz. Na podstawie serii pomiarów gradientometrycznych wykazano, że zmiana stanu wody w rzece związana z nawałnym opadem w istotny sposób wpływa na wymianę hyporeiczną. Znaczna część strefy hyporeicznej z upwellingu przechodzi do downwellingu. Jednakże niektóre podobszary strefy hyporeicznej zachowują upwelling mimo znaczącego wzrostu poziomu wody, co może świadczyć o dopływie w tych podobszarach wód podziemnych z głębszych warstw wodonośnych (Marciniak i in., 2022).

Zespół hydrologów i hydrobiologów pod kierunkiem K. Szoszkiewicza w latach 2017–2019 prowadził badania warunków bytowania włosieniczników (*Ranunculus*) w strefie hyporeicznej. Na podstawie badań gradientometrycznych wykazano, że włosieniczniki preferują strefy upwellingu wód podziemnych do strefy hyporeicznej. Natomiast badania filtrometryczne udokumentowały pięciokrotne zmniejszenie gęstości strumienia upwellingu wód podziemnych w strefach porośniętych włosienicznikami. Odkryto, że czynniki hydrodynamiczne mogą warunkować cykl życiowy włosieniczników (Marciniak i in., 2023).

Pomiary gradientometryczne zastosowano także do rozpoznania warunków współdziałania wód podziemnych z wodami jeziora Płotki w rejonie Piły. Zespół pod kierunkiem K. Dragona wykonał dwie serie pomiarów, które pozwoliły rozpoznać zasięgi stref zasilania jeziora wodami podziemnymi oraz ucieczek wód jeziornych do wód podziemnych. Wykazano, że zasięgi obu stref są zmienne i zależą od relacji pomiędzy stanem wód podziemnych oraz stanem wody w jeziorze (Matusiak i in., 2025). Rozpoznanie warunków współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych metodą gradientometryczną może być szczególnie przydatne w warunkach słabego rozpoznania hydrogeologicznego.

Odpowiedzi na pytanie, czy w strefach źródliskowych może zachodzić wymiana hyporeiczna, poszukiwał zespół pod kierunkiem A. Szczucińskiej. Kilka serii pomiarów gradientometrycznych w źródłiskach Gryżyńskiego Parku Krajobrazowego pozwoliło udokumentować, że także w strefach źródliskowych występuje zwrówno upwelling jak i downwelling (Szczucińska i in., 2025).

Badania gradientometryczne wykorzystał zespół T. Falkowskiego w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego (SGGW) w Warszawie do określenia zasięgu oddziaływania poddennych ujęć infiltracyjnych na Wiśle w Warszawie. Wykonane na obu brzegach rzeki pomiary gradientometryczne pozwoliły na wyznaczenie zasięgu oddziaływania poszczególnych studni zbiorczych z drenami poziomymi (Bartold, 2025).

Powyższe przykłady pokazują szerokie możliwości zastosowań nowych przyrządów pomiarowych w badaniach hydrologicznych i hydrogeologicznych. Trzeba się jednak liczyć z pewnymi ograniczeniami warunkującymi wykorzystanie filtrometru i gradientometru podczas badań terenowych. Oba urządzenia mogą być stosowane w osadach dennych piaszczystych o granulacji od pylistych i drobnoziarnistych do żwirowych. Nie należy wykonywać pomiarów w osadach mulistych. Ważne jest, aby podczas

badań terenowych oba przyrządy pomiarowe były wbijane w osady denne nienaruszone przez obserwatora. Przeszkodą podczas badań filtrometrycznych i gradientometrycznych mogą być korzenie roślin, kamienie, gruz lub inne przedmioty w osadach dennych. Pewnym ograniczeniem mogą być wymagania dotyczące poziomu wody w strumieniu lub rzece. Minimalna głębokość wody podczas badań filtrometrycznych powinna wynosić 30 cm. Ze względu na bezpieczeństwo obserwatora maksymalna głębokość wody podczas badań filtrometrycznych i gradientometrycznych nie powinna przekraczać 150 cm. Przy większych głębokościach pomiary można wykonywać z łodzi. Temperatura wody i osadów dennych powinna być dodatnia, nie można wykonywać pomiarów, gdy lustro wody lub osady denne są zlodzone.

Dotychczas wykonano kilkanaście prototypów obu aparatów, dlatego potrzebne jest doskonalenie konstrukcji z uwzględnieniem wymagań transportowych oraz minimalizowania możliwych pomyłek obserwatorów. W zastosowaniach do badania wymiany hyporeicznej warto rozważyć miniaturyzację obu aparatów.

Bardzo dziękuję Recenzentowi za poświęcony czas, uważne przeanalizowanie mojego artykułu, cenne uwagi i przychylną ocenę.

LITERATURA

- BARTOLD P. 2025 – Morfodynamika koryta Wisły w Warszawie i jej znaczenie dla warunków eksploatacji ujęć poddennych wody. SGGW Warszawa, dysertacja doktorska.
- BATTIN T.J., KAPLAN L.A., NEWBOLD J.D., HENDRICKS S.P. 2003 – A mixing model analysis of stream solute dynamics and the contribution of a hyporheic zone to ecosystem function. *Freshwater Biology*, 48: 995–1014.
- BENCALA K.E. 2000 – Hyporheic zone hydrological processes. *Hydrological Processes*, 14: 2797–2798.
- BOULTON A.J., FINDLAY S., MARMONIER P., STANLEY E.H., VALETT H.M. 1998 – The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 29: 59–81.
- BUSATO L., BOAGA J., PERRI M.T., MAJONE B., BELLIN A., CASSIANI G. 2019 – Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: The Vermigliana Creek case study. *Science of the Total Environment*, 648: 1105–1120.
- CHUDZIAK Ł. 2013 – Identyfikacja parametrów filtracyjnych w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. UAM Poznań, dysertacja doktorska.
- CHUDZIAK Ł. 2015 – Identyfikacja parametrów filtracyjnych w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- CHUDZIAK Ł., MARCINIAK M. 2012 – Badania laboratoryjne drenażu i infiltracji wody przez osady denne na modelu fizycznym. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 451, *Hydrogeologia*, 12: 17–25.
- DARCY H. 1856 – Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Appendix D. Paryż.
- LAWRENCE J.E., SKOLD M.E., HUSSAIN F.A., SILVERMAN D.R., RESCH V.H., SEDLAK D.L., LUTHY R.G., McCRAY J.E. 2013 – Hyporheic Zone in Urban Streams: A Review and Opportunities for Enhancing Water Quality and Improving Aquatic Habitat by Active Management. *Environmental Engineering Science*, 30/8: 480–501; <http://dx.doi.org/10.1089/ees.2012.0235>.
- LEWANDOWSKI J., ARNON S., BANKS E., BATELAAN O., BETTERLE A., BROECKER T., COLL C., DRUMMOND J.D., GARCIA J.G., GALLOWAY J., GOMEZ-VELEZ J., GRABOWSKI R.C., HERZOG S.P., HINKELMANN R., HÖHNE A., HOLLENDER J., HORN M.C., JAEGER A., KRAUSE S., PRATS A.L., MAGLIOZZI C., MEINIKMANN K., MOJARRAD B.B., MUELLER B.M., PERALTA-MARAVIER I., POPP A.L., POSSELT M., PUTSCHEW A., RADKE M., RAZA M., RIML J., ROBERTSON A., RUTERE C., SCHAPER J.L., SCHIRMER M., SCHULZ H., SHANAFIELD M., SINGH T., WARD A.S., WOLKE P., WÖRMAN A., WU L. 2019 – Is the Hyporheic Zone Relevant beyond the Scientific Community? *Water* 11: 2230; <http://dx.doi.org/10.3390/w11112230>.
- ŁĘCZYŃSKI L., BUBLIJEWSKA E., CHUDZIAK Ł., MARCINIAK M. 2025 – Identification of the exchange of sea and groundwater in the Bay of Puck based on satellite photography and measurements of the filtration stream through bottom sediments. *Quaestiones Geographicae* (w druku).
- MATUSIAK M., MARCINIAK M., DRAGON K. OWSIANNY P. 2025 – Investigation of water exchange in the hyporheic zone of groundwater dependant lake (Lake Plotki, Poland). *Quaestiones Geographicae* (w druku).
- MARCINIAK M., CHUDZIAK Ł. 2012 – Infiltrometr dennej. Patent PL 220166 B1.
- MARCINIAK M., CHUDZIAK Ł. 2015 – Nowa metoda pomiaru współczynnika filtracji osadów dennych. *Przegląd Geologiczny*, 63 (10/2): 919–925.
- MARCINIAK M. 2018 – Badanie parametrów hydrogeologicznych strefy hyporeicznej za pomocą filtrometru i gradientometru. *Metodyka wykonania pomiarów oraz instrukcja eksploatacji*. Arch. UAM, Poznań.
- MARCINIAK M., ZIUŁKIEWICZ M., GÓRECKI M. 2022 – Variability of water exchange in the hyporheic zone of a lowland river in Poland based on gradientometric studies. *Quaestiones Geographicae*, 41: 141–156; doi.org/10.2478/quageo-2022-0030
- MARCINIAK M., GEBLER D., GRYGORUK M., ZALEWSKA-GAŁOLSZ J., SOSZKIEWICZ K. 2023 – Hyporheic flow in aquatic Ranunculus habitats in temperate lowland rivers in Central Europe. *Ecological Indicators*, 153; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110422>.
- SMITH J.W.N. 2005 – Groundwater-surface water interactions in the hyporheic zone. *Science Report SC030155/SR1*. Environment Agency, www.environment-agency.gov.uk
- SONG J., JIANG W., XU S., ZHANG G., WANG L., WEN M., ZHANG B., WANG Y., LONG Y. 2016 – Heterogeneity of hydraulic conductivity and Darcian flux in the submerged streambed and adjacent exposed stream bank of the Beiluo River, northwest China. *Hydrogeology Journal*, 24: 2049–2062; <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-016-1449-0>.
- SZCZUCIŃSKA A., WOLNY F., MARCIANIAK M. 2025 – Hyporheic exchange in the source zone based on gradientometric studies. *Quaestiones Geographicae* (w druku).
- ZHANG J., SONG J., LONG Y., ZHANG Y., ZHANG B., WANG Y., WANG Y. 2017 – Quantifying the Spatial Variations of Hyporheic Water Exchange at Catchment Scale Using the Thermal Method: A Case Study in the Weihe River, China. *Advances in Meteorology*, 2017 (3): 1–8; <http://dx.doi.org/10.1155/2017/6159325>.

Praca wpłynęła do redakcji 30.12.2024 r.
Akceptowano do druku 3.03.2025 r.