

Warunki hydrogeologiczne ujęcia infiltracyjnego i ich wpływ na efekty usuwania związków organicznych w procesie infiltracji

Hydrogeological conditions of the infiltration intake and their impact on the effects of removing organic compounds in the infiltration process

Fasilate Uwimpaye, Aleksandra Makąła, Natalia Kolwicz, Zbysław Dymaczewski, Joanna Jeż-Walkowiak*

Słowa kluczowe: Ujęcie infiltracyjne, parametry hydrogeologiczne, związki organiczne

Streszczenie

W pracy przedstawiono dwie metody wyznaczania parametrów hydrogeologicznych, dotyczących procesu infiltracji na ujęciu wód powierzchniowych: prędkości infiltrującej wody i czasu retencji wody w gruncie. Pierwsza metoda jest oparta o interpretację wyników pomiarów terenowych, druga bazuje na wzorach teoretycznych. Terenowa instalacja badawcza składała się z trzech piezometrów, znajdujących się na drodze infiltracji między brzegiem stawu a studnią, należącą do ciągu zbiorczych studni lewarowych. Oceniono wpływ parametrów hydrogeologicznych na efekty usuwania związków organicznych z infiltrującą wodą. Do oceny zmienności jakości ujmowanej wody powierzchniowej oraz efektów procesu infiltracji, w odniesieniu do zanieczyszczeń organicznych, posłużył ogólny węgiel organiczny. Na podstawie przyjętych kryteriów określono intensywność i charakter procesów dominujących w usuwaniu związków organicznych, z ujmowanej wody powierzchniowej.

Keywords: Infiltration intake, hydrogeological parameters, organic matter

Abstract

The paper presents two methods for determining the hydrogeological parameters referred to the infiltration process at the surface water intake: the velocity of infiltrating water and the retention time of water in the ground. The first method is based on the interpretation of the results of field measurements, the second on formulas and models. The field research installation consisted of three piezometers located on the infiltration path between the pond and a well belonging to a lever siphon wells. The influence of hydrogeological parameters on the effects of removing organic compounds from infiltrating water was assessed. Total organic carbon was used to assess the variability of the quality of abstracted surface water and the effects of the infiltration process in relation to organic pollutants. Based on the adopted criteria, the intensity and nature of the dominant processes in the removal of organic compounds from surface water were determined.

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem cywilizacji obserwuje się systematyczne zwiększanie niedoborów wody oraz wzrost stężenia zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych. Jest to sytuacja ujemnie wpływająca na bezpieczeństwo zaopatrzenia ludzi w wodę do spożycia i na cele gospodarcze. Aby zapewnić bezpieczeństwo wodne liczne duże i nowoczesne stacje uzdatniania wody pracują w oparciu o systemy wielostopniowych barier. Systemy te zapewniają niezawodną efektywność usuwania zanieczyszczeń z wody, zarówno podczas normalnych warunków pracy, jak i w sytuacjach awaryjnych m.in. nagłego i znacznego pogorszenia się jakości wody ujmowanej [1, 3, 8].

Efektywnie działający proces infiltracji, realizowany na wielu dużych ujęciach wód powierzchniowych w Polsce i na świecie, powinien być traktowany jako pierwsza bariera technologiczna usuwająca domieszki biologiczne i chemiczne, w tym mikrozanieczyszczenia [1, 4, 12, 13, 15].

Stosowany od dziesięcioleci proces sztucznej infiltracji polega na zasilaniu warstwy wodonośnej w wody powierzchniowe za pośrednictwem sztucznych zbiorników – stawów infiltracyjnych. Po procesie infiltracji, podczas wymuszonego przepływu wody przez grunt, następuje zmiana charakteru jakości wody z powierzchniowej na podziemną [9, 10]. Infiltracja wykorzystuje naturalne procesy zachodzące w stawach infiltracyjnych, warstwach przydennych oraz w gruncie, w strefie aeracji i saturacji. Do procesów tych należy sedimentacja, biodegradacja,

filtracja, adsorpcja oraz wymiana jonowa [2, 6]. Polepszenie jakości ujmowanej wody w procesie infiltracji pozwala na znaczące uproszczenie systemu technologicznego jej uzdatniania, w stosunku do systemów ujmujących wodę wprost ze źródła wody powierzchniowej.

Na jakość wód infiltracyjnych wpływa bilans wód gruntowych i wód powierzchniowych zasilających ujęcie. Bilans zależy od lokalizacji ujęcia i warstwy wodonośnej. Wpływ na lokalizację ujęcia infiltracyjnego mają kryteria morfologiczne, geochemiczne, hydrogeologiczne oraz ekonomicznotechniczne. Na efekty podczyszczania ujmowanej wody wpływa również czas retencji wody w gruncie, budowa geologiczna, uziarnienie, miąższość gruntu oraz warunki hydrodynamiczne [11].

Aby zdefiniować i matematycznie opisać rzeczywiste środowisko hydrogeologiczne, konieczne jest ustalenie wartości parametrów hydrogeologicznych. Zgodnie z definicją [11], parametry te definiują ilościowo zachowanie się systemów hydrogeologicznych, w aspekcie ich zdolności do magazynowania, przewodzenia, transportu w wodach masy i energii, oddziaływania między wodą a skałą oraz przenoszenia naprężeń pochodzących od otoczenia.

W hydrogeologii metody bezpośredniego, eksploatacyjnego wyznaczania parametrów uznaje się jako bardziej wartościowe od metod pośrednich, czyli opartych na wzorach – modelach matematycznych. Oznacza to, że bardziej miarodajne wyniki uzyskamy z badań przeprowadzonych w terenie (np. próbnym pompowaniem) niż z obliczeń matematycznych, bazujących m.in. na danych granulometrycznych. Wynika to

* F. Uwimpaye (fasilate.uwimpaye@doctorate.put.poznan.pl), A. Makąła (aleksandra.makala1@gmail.com), N. Kolwicz (kolwicznatalia@gmail.com), Z. Dymaczewski (zbyslaw.dymaczewski@put.poznan.pl), J. Jeż-Walkowiak (joanna.jez-walkowiak@put.poznan.pl) – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych

z konieczności wprowadzania uproszczeń i uśrednień w tych metodach i skutkuje często nie tylko rozbieżnościami między wartością obliczoną a zmierzoną w terenie, ale także wyraźnymi różnicami wartości parametrów obliczonych wg. poszczególnych wzorów. Osiągnięcie miarodajnych wyników obliczeń jest uwarunkowane dokładnym rozpoznaniem warunków hydrogeologicznych oraz układów eksploatacyjnych na badanym obszarze, w celu dokonania wyboru odpowiedniej metody obliczeniowej lub weryfikacji metody empirycznej.

Metodyka badań

Cel i zakres badań

Celem przedstawionych wyników badań jest wyznaczenie parametrów hydrogeologicznych ujęcia infiltracyjnego, w tym czasu retencji infiltrującej wody w gruncie. Posłużono się dwoma metodami: obliczeniową oraz pomiarową (bazującą na analizie zmian temperatury infiltrującej wody w gruncie). Dokonano również oceny wpływu parametrów hydrogeologicznych ujęcia infiltracyjnego na efektywność usuwania związków organicznych z wody oraz wskazano procesy dominujące podczas podczyszczania ujmowanej wody.

Do wyznaczenia parametrów hydrogeologicznych posłużyły :

- wyniki pomiarów wysokości zwierciadeł w punktach pomiarowych terenowej instalacji badawczej,
- wyniki pomiarów temperatury wody na drodze przepływu infiltrującej wody,
- badania granulometryczne próbek z głębokości gruntu uzyskanych podczas odwiertów piezometrów,
- wzory teoretyczne.

Ujęcie infiltracyjne, będące przedmiotem badań, jest zasilane głównie wodami powierzchniowymi z rzeki Warty, infiltrującymi w grunt za pośrednictwem systemu stawów i studni lewarowych. Wydajność nominalna ujęcia wynosi $Q = 75\,000 - 80\,000\text{ m}^3/\text{d}$ z czego:

- ok. 65 – 75 % stanowi woda pochodząca ze sztucznej infiltracji poprzez stawy rozsączające,
- ok. 16 – 27% stanowi infiltracja brzegowa bezpośrednio z rzeki Warty,
- ok. 8 – 12% stanowią dopływy gruntowe.

Woda z rzeki jest pompowana za pomocą pomp i systemu rurociągów tłocznych na stawy rozsączające. Na ujęciu znajduje się 317 studni wierconych, które umieszczone są wzdłuż trzech ciągów lewarowych, rozmieszczonych od 60 do 80 m od brzegu stawów i rzeki.

Terenowa instalacja badawcza

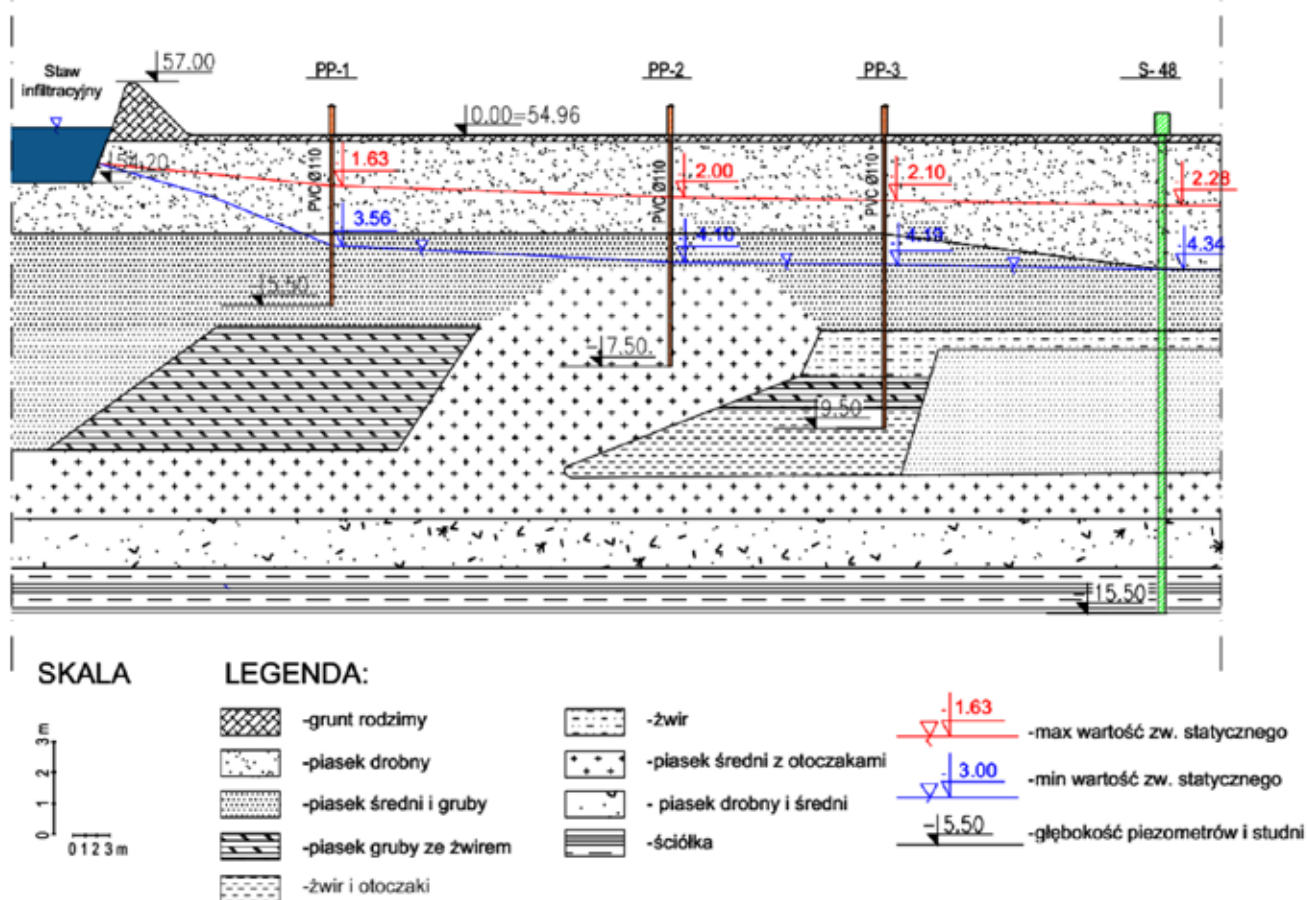
Terenowa instalacja badawcza składa się z trzech piezometrów — oznaczonych jako PP-1, PP-2 i PP-3 — które znajdują się na drodze między brzegiem stawu (jeden z 27 eksploatowanych stawów), a studnią S-48 należącą do ciągu studni lewarowych (rys. 1).

Lewar II odbiera wodę z 92 studni o średniej wydajności $1200\text{ m}^3/\text{h}$. Staw infiltracyjny zasilający instalację badawczą ma długość 750 m i szerokość dna ok. 20 m , głębokość jest równa ok. $1,80\text{ m}$. Głębokości piezometrów wynoszą odpowiednio $5,5$, $7,5$ i $9,5\text{ m}$. Kolumny filtrowe zbudowane są z rur PVC-U o średnicy zewnętrznej $\phi 110\text{ mm}$. Każdy otwór obserwacyjny (piezometr) zabezpieczony jest zamknięciem w postaci rury osłonowej GRP $\phi 168\text{ mm}$ z zamknięciem na śruby dociskowe, posadowiony w fundamencie betonowym na głębokości $2,0\text{ m}$ p.p.t. Odległości między punktami pomiarowymi zostały przedstawiona w tab. 1.

Tabela 1. Odległości między punktami pomiarowymi terenowej instalacji badawczej

Table 1. Distances between measurement points of the field research installation

Odcinek	Odległość, [m]
Staw-PP-1	18,00
PP1-PP-2	27,50
PP2-PP-3	17,40
PP3-S-48	23,00



Rys. 1. Przekrój podłużny instalacji terenowej na ujęciu infiltracyjnym

Fig.1. Cross-section of the field installation at the infiltration intake

Pomiar poziomu zwierciadeł i temperatury

W punktach pomiarowych co 1-2 tygodnie mierzono poziom zwierciadeł za pomocą świstawki oraz temperaturę (około 2 m pod poziomem zwierciadła).

Parametry granulometryczne gruntu

Parametry granulometryczne ustalono na podstawie analizy sitowej próbek gruntu pobranych z głębokości podczas wiercenia piezometrów.

Empiryczna metoda wyznaczania czasu retencji wody w gruncie

Empiryczne wyznaczenie czasu retencji wody w gruncie, podczas przepływu pomiędzy punktami pomiarowymi, polegało na analizie zmian temperatury wody w gruncie na trasie jej przepływu. W tym celu na odcinku, od stawu infiltracyjnego 9/10 do studni S-48, wyznaczono wielomianowe linie trendu zmian temperatury wody dla poszczególnych punktów. Następnie wskazano czas, w którym temperatura wody osiągała ekstrema w punktach pomiarowych. Na podstawie minimalnych i maksymalnych temperatur wody infiltracyjnej obliczono czas przetrzymywania wody w gruncie, jako odcinki czasu pomiędzy ekstremami w kolejnych punktach pomiarowych na drodze przepływu wody.

Obliczenia czasu retencji w gruncie

Do obliczenia teoretycznego czasu retencji t w gruncie zastosowano wzór:

$$t = L / v, [d] \quad (1)$$

w którym:

L – odległość między punktami pomiarowymi instalacji terenowej, w których dokonujemy pomiaru zwierciadła wody [m] (tab.1.),
 v – prędkość filtracji [m/d] obliczona na podstawie wzoru opisującego prawo Darcy (2):

$$v = k \cdot I = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

w którym:

I – spadek hydrauliczny wyznaczony na podstawie pomiarów zwierciadeł w punktach pomiarowych,
 k – współczynnik filtracji, m/s, Δh – strata ciśnienia podczas przepływu wody na odcinku pomiarowym o długości L .

Do obliczenia współczynnika filtracji – k zastosowano:

1. Wzór Hazena (3) – stosowany do obliczania współczynnika filtracji (k) dla gruntów niespoistych (sypkich) o średnicy miarodajnej $0,1 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 3,0 \text{ mm}$ i o wskaźniku równouziarnienia $U = d_{60}/d_{10} < 5$

$$K = C \cdot (d_{10})^2 [m/d] \quad (3)$$

w którym:

d_{10} – średnica miarodajna, wyznaczona na podstawie analizy sitowej,
 C – współczynnik empiryczny zależny od porowatości, określane za pomocą wzoru (4):

$$C = 400 + 40(n-26) \quad (4)$$

w którym n to porowatość [%] obliczona na podstawie gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (ρ_d) wyznaczonej w badaniu laboratoryjnym.

2. Uproszczony wzór Hazena (5)

$$K = 0,0116 (d_{10})^2 [m/d] \quad (5)$$

3. Wzór Seelheima (6)

$$K = 0,357 (d_{50})^2 [m/d] \quad (6)$$

d_{50} – średnica miarodajna, poniżej której zawartość ziaren wynosi 50% masy gruntu.

Powyższe wzory zakładają temperaturę wody równą 10°C . W obliczeniach uwzględniono wpływ temperatury stosując następujący wzór (7):

$$k_t = k(0,7 + 0,03 \cdot t) \quad (7)$$

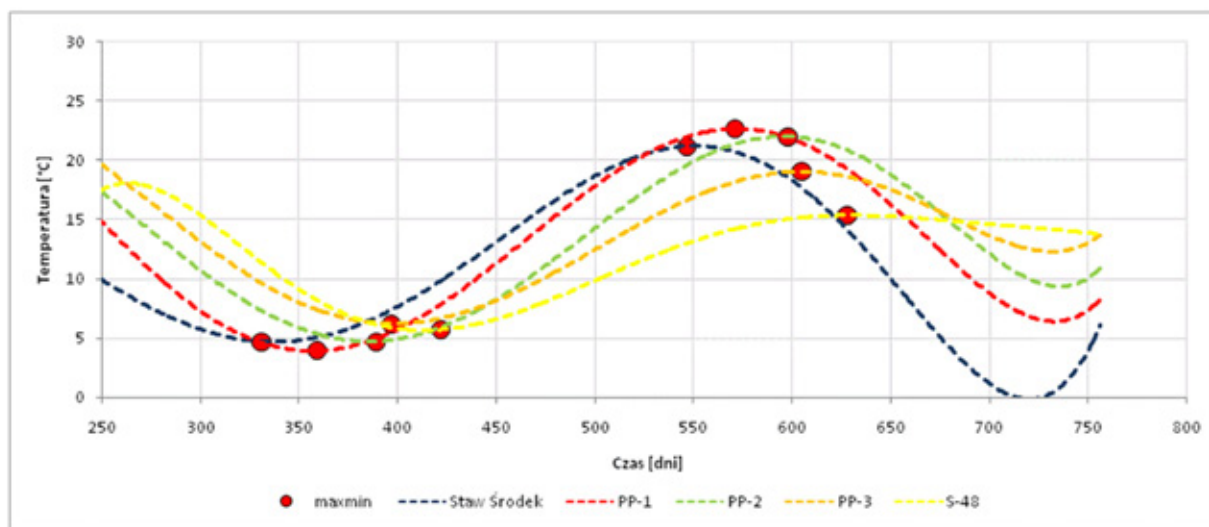
w którym:

k_t – skorygowana wartość współczynnika filtracji, t – temperatura wody, k – współczynnik filtracji obliczony ze wzoru podstawowego.

Wyniki badań i interpretacja

Empiryczna metoda wyznaczania czasu retencji wody w gruncie

Temperaturę wody infiltrującej mierzono w punktach pomiarowych co 1-2 tygodnie przez 2 lata. Wykres przedstawiający zmiany temperatury przedstawiono na rys. 2. Wykresy zmian temperatury w każdym punkcie pomiarowym mają charakter sinusoidalny. Odległości



Rys. 2. Zmiana temperatury infiltrującej wody w punktach pomiarowych instalacji badawczej w okresie od lutego 2018 do marca 2020 r.

Fig.2. Change in the temperature of infiltrating water at the measurement points of the research installation in the period from February 2018 to March 2020.

Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych czasów retencji wody w gruncie dla okresu zimowego i letniego

Table 2. List of designated water retention times in the ground for the winter and summer periods

Odcinek	Okres zimowy - minimalna temperatura				Okres letni - maksymalna temperatura			
	Data	Doba	Temperatura wody	Czas retencji	Data	Doba	Temperatura wody	Czas retencji
	[-]	[d]	[°C]	[d]	[-]	[d]	[°C]	[d]
Staw Środek	4.01.	331	4,6	28	8.08.	547	21,1	24
PP - 1	1.02.	359	3,9		1.09.	571	22,6	
PP - 1	1.02.	359	3,9	30	1.09.	571	22,6	27
PP - 2	3.03.	389	4,6		28.09.	598	21,9	
PP - 2	3.03.	389	4,6	8	28.09.	598	21,9	7
PP - 3		397	6,1		5.10.	605	19,0	
PP - 3		397	6,1	25	5.10.	605	19,0	23
Studnia S-48	5.04.	422	5,7		28.10.	628	15,3	

między maksimami krzywych (temperatury latem), oraz minimami (temperatura zimą) odpowiadają czasom przemieszczania się fali temperatury i tym samym czasom przepływu wody pomiędzy punktami pomiarowymi.

Na podstawie wyznaczonych maksymalnych i minimalnych temperatur infiltrującej wody, obliczono czas przetrzymania wody w gruncie na odcinkach drogi infiltracji terenowej instalacji badawczej. Wyniki przedstawiono w tab. 2 i 3. Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, iż czas retencji wody na każdym odcinku pomiarowym jest krótszy dla okresu letniego, co wynika z większego zapotrzebowania na wodę w okresie letnim. Średni czas przetrzymywania wody w gruncie na odcinku od stawu infiltracyjnego 9/10 do Studni S-48 dla okresu zimowego wynosi 91 dni, natomiast dla okresu letniego 81 dni. W tab. 3 przedstawiono średni odcinkowy czas retencji wody w gruncie, wyznaczony dla pomiarów temperatury wody na terenowej instalacji w całym okresie badawczym. Pomiary temperatury okresu zimowego i letniego wypadły w drugim okresie cyklu pracy stawu infiltracyjnego, czyli w okresie ustabilizowanej prędkości filtracji.

Tabela 3. Zestawienie wyznaczonych wartości średniego czasu retencji wody na poszczególnych odcinkach pomiarowych oraz odległości pomiędzy punktami pomiarowymi
Table 3. A summary of the determined values of the average water retention time on individual measurement sections and the distances between measurement points

Odcinek	Średni czas retencji	Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi
	[d]	[m]
Staw Środek – P-1	26	18,00
PP-1 – PP-2	28,5	27,50
PP-2 – PP-3	7,5	17,40
PP-3 – Studnia S-48	24	23,00
Suma	86	85,90

Przedstawione na rys. 2 zmiany temperatur wskazują, że woda infiltracyjna posiada znacznie mniejszą amplitudę zmian temperatur od wody warciańskiej.

Na rys. 3. przedstawiono porównanie zmienności temperatury wody zasilającej ujęcie, ze zmiennością temperatury wody po procesie infiltracji. Wyniki pomiarów temperatury wody pochodzą z lat 2013 – 2020. W zależności od pory roku temperatura w wodzie powierzchniowej wahała się od 1,5 – 26°C, natomiast w wodzie po procesie infiltracji wnosila 8 – 16,5°C.

Na rys. 3 można zauważyć, że maksima i minima temperatur w obu wodach (z rzeki i ze studni zbiorczej) są względem siebie przesunięte. Przesunięcie to wskazuje na średnią dla całego ujęcia wartość czasu przetrzymania wody w gruncie podczas infiltracji (w czasie określonym prowadzeniem pomiarów). Z otrzymanych wyników można wnioskować, iż czas retencji wyznaczony dla całego ujęcia oscyluje w przedziale od 34 do 77 dni (5 – 11 tygodni). Średni czas retencji wody w gruncie wynosi 53 dni, czyli 7,6 tygodnia.

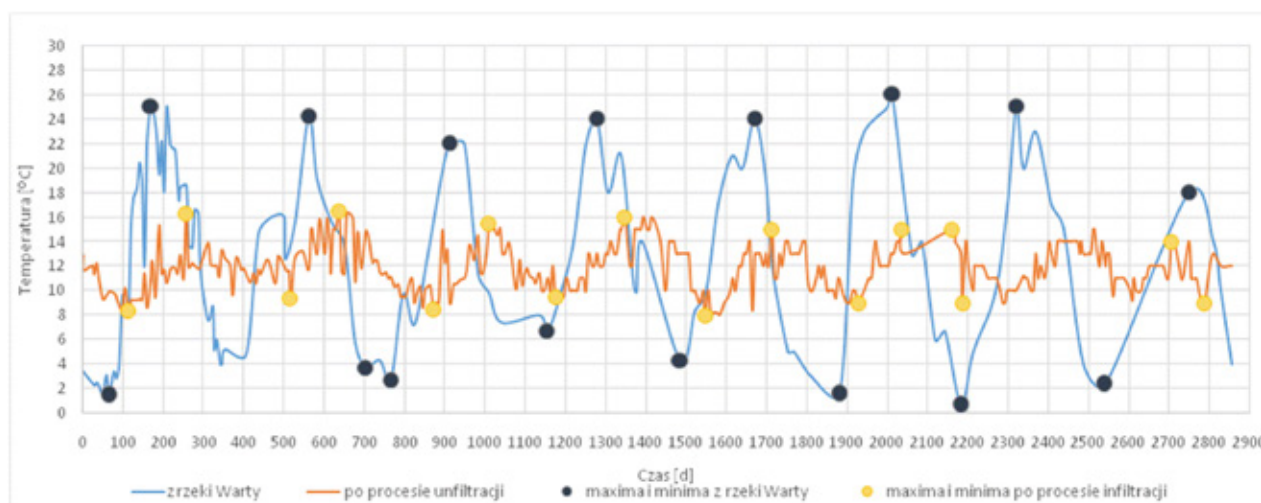
Metoda obliczeniowa wyznaczania czasu retencji wody w gruncie

- Współczynnik filtracji

W tab. 4 zamieszczono wartości parametrów granulometrycznych, wyznaczonych podczas analizy sitowej gruntów, w miejscu odwiertów piezometrów na głębokości warstwy wodonośnej.

Tabela 4. Parametry granulometryczne gruntów warstwy wodonośnej
Table 4. Granulometric parameters of soil in the aquifer

Piezometr	d ₁₀ , mm	d ₅₀ , mm	d ₆₀ , mm	d ₉₀ , mm	WR=d ₆₀ /d ₁₀
PP1	1,80	2,50	2,75	3,00	1,5
PP2	2,50	2,60	2,80	3,00	1,1
PP3	1,70	2,00	2,25	3,00	1,3



Rys. 3. Zmiany temperatury wody zasilającej ujęcie i wody po infiltracji w latach 2013-2020

Fig. 3. Changes in the temperature of water supplying the intake and water after infiltration in 2013-2020

Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych czasów retencji wody w gruncie dla okresu zimowego i letniego

Table 2. List of designated water retention times in the ground for the winter and summer periods

Odcinek	Okres zimowy - minimalna temperatura				Okres letni - maksymalna temperatura			
	Data	Doba	Temperatura wody	Czas retencji	Data	Doba	Temperatura wody	Czas retencji
	[]	[d]	[°C]	[d]	[]	[d]	[°C]	[d]
Staw Środek	4.01.	331	4,6	28	8.08.	547	21,1	24
PP – 1	1.02.	359	3,9		1.09.	571	22,6	
PP – 1	1.02.	359	3,9	30	1.09.	571	22,6	27
PP – 2	3.03.	389	4,6		28.09.	598	21,9	
PP – 2	3.03.	389	4,6	8	28.09.	598	21,9	7
PP – 3		397	6,1		5.10.	605	19,0	
PP – 3		397	6,1	25	5.10.	605	19,0	23
Studnia S-48	5.04.	422	5,7		28.10.	628	15,3	

między maksimami krzywych (temperatury latem), oraz minimami (temperatura zimą) odpowiadają czasom przemieszczania się fali temperatury i tym samym czasom przepływu wody pomiędzy punktami pomiarowymi.

Na podstawie wyznaczonych maksymalnych i minimalnych temperatur infiltrującej wody, obliczono czas przetrzymania wody w gruncie na odcinkach drogi infiltracji terenowej instalacji badawczej. Wyniki przedstawiono w tab. 2 i 3. Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, iż czas retencji wody na każdym odcinku pomiarowym jest krótszy dla okresu letniego, co wynika z większego zapotrzebowania na wodę w okresie letnim. Średni czas przetrzymywania wody w gruncie na odcinku od stawu infiltracyjnego 9/10 do Studni S-48 dla okresu zimowego wynosi 91 dni, natomiast dla okresu letniego 81 dni. W tab. 3 przedstawiono średni odcinkowy czas retencji wody w gruncie, wyznaczony dla pomiarów temperatury wody na terenowej instalacji w całym okresie badawczym. Pomiary temperatury okresu zimowego i letniego wypadły w drugim okresie cyklu pracy stawu infiltracyjnego, czyli w okresie ustabilizowanej prędkości filtracji.

Tabela 3. Zestawienie wyznaczonych wartości średniego czasu retencji wody na poszczególnych odcinkach pomiarowych oraz odległości pomiędzy punktami pomiarowymi
Table 3. A summary of the determined values of the average water retention time on individual measurement sections and the distances between measurement points

Odcinek	Średni czas retencji	Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi
	[d]	[m]
Staw Środek – P-1	26	18,00
PP-1 – PP-2	28,5	27,50
PP-2 – PP-3	7,5	17,40
PP-3 – Studnia S-48	24	23,00
Suma	86	85,90

Przedstawione na rys. 2 zmiany temperatury wskazują, że woda infiltracyjna posiada znacznie mniejszą amplitudę zmian temperatur od wody warciańskiej.

Na rys. 3. przedstawiono porównanie zmienności temperatury wody zasilającej ujęcie, ze zmiennością temperatury wody po procesie infiltracji. Wyniki pomiarów temperatury wody pochodzą z lat 2013 – 2020. W zależności od pory roku temperatura w wodzie powierzchniowej wahała się od 1,5 – 26°C, natomiast w wodzie po procesie infiltracji wnosila 8 – 16,5°C.

Na rys. 3 można zauważyć, że maksima i minima temperatur w obu wodach (z rzeki i ze studni zbiorczej) są względem siebie przesunięte. Przesunięcie to wskazuje na średnią dla całego ujęcia wartość czasu przetrzymania wody w gruncie podczas infiltracji (w czasie określonym prowadzeniem pomiarów). Z otrzymanych wyników można wnioskować, iż czas retencji wyznaczony dla całego ujęcia oscyluje w przedziale od 34 do 77 dni (5 – 11 tygodni). Średni czas retencji wody w gruncie wynosi 53 dni, czyli 7,6 tygodnia.

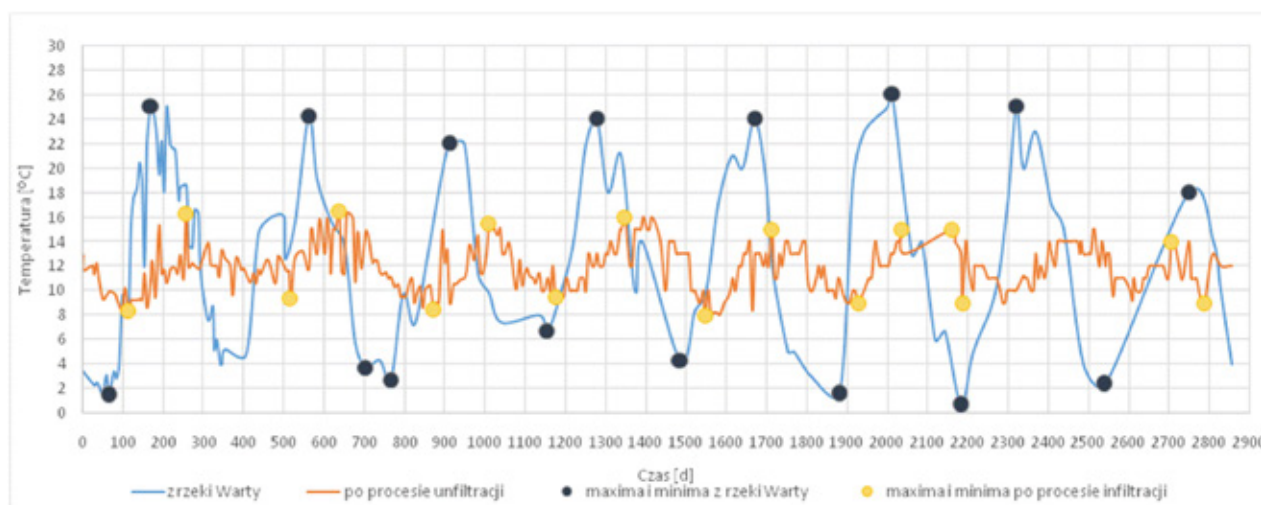
Metoda obliczeniowa wyznaczania czasu retencji wody w gruncie

- Współczynnik filtracji

W tab. 4 zamieszczono wartości parametrów granulometrycznych, wyznaczonych podczas analizy sitowej gruntów, w miejscu odwiertów piezometrów na głębokości warstwy wodonośnej.

Tabela 4. Parametry granulometryczne gruntów warstwy wodonośnej
Table 4. Granulometric parameters of soil in the aquifer

Piezometr	d ₁₀ , mm	d ₅₀ , mm	d ₆₀ , mm	d ₉₀ , mm	WR=d ₆₀ /d ₁₀
PP1	1,80	2,50	2,75	3,00	1,5
PP2	2,50	2,60	2,80	3,00	1,1
PP3	1,70	2,00	2,25	3,00	1,3



Rys. 3. Zmiany temperatury wody zasilającej ujęcie i wody po infiltracji w latach 2013-2020

Fig. 3. Changes in the temperature of water supplying the intake and water after infiltration in 2013-2020

W tab. 5 zamieszczono wartości obliczonych współczynników filtracji wg wzorów podanych w metodyce badań.

Tabela 5. Wartości obliczonych współczynników filtracji dla poszczególnych odcinków infiltracji

Table 5. Values of calculated filtration coefficients for individual infiltration sections

	Wzór Hazena (3)	Uproszczony wzór Hazena (5)	Wzór Seelheima (6)
	[m/s]	[m/s]	[m/s]
S-PP1	0,00048	0,00046	0,00026
PP1-PP2	0,00072	0,00070	0,00026
PP2-PP3	0,00043	0,00042	0,00026
PP3-S48	0,00081	0,00078	0,00028
Średnia k	0,00061	0,00059	0,00027

Wartości współczynników filtracji dla poszczególnych odcinków instalacji badawczej różnią się znacząco, ze względu na odmienną charakterystykę granulometryczną gruntów odwierconych piezometrów. Należy przyjąć, że powstałe na tym etapie nieścisłości, wynikające z przyjętych założeń, mają wpływ na dokładność obliczeń kolejnych parametrów hydrogeologicznych.

• Prędkość filtracji

W tab. 6 zamieszczono obliczone średnie wartości spadków hydraulicznych oraz prędkości filtracji na poszczególnych odcinkach instalacji badawczej, obliczone wg trzech stosowanych wzorów.

Tabela 6. Wartości spadków hydraulicznych oraz prędkości filtracji na poszczególnych odcinkach instalacji badawczej w okresie badań

Table 6. Values of head loss and filtration rates on individual sections of the research installation during the research period

	Spadek hydrauliczny $I = \frac{\Delta h}{L}$ [m/m]	Prędkość filtracji, v [m/d] z k wg Hazena (3)	Prędkość filtracji, v [m/d] z k wg upr. Hazena (5)	Prędkość filtracji, v [m/d] z k wg. Seelheima (6)
	S-PP1	0,82	3,42	3,31
PP1-PP2	0,015	0,91	0,88	0,33
PP2-PP3	0,0096	0,36	0,35	0,22
PP3-S48	0,015	1,04	1,01	0,36

• Obliczeniowy czas retencji na podstawie prędkości filtracji

W tab. 7 przedstawiono obliczone wartości czasów retencji na poszczególnych odcinkach instalacji badawczej, uwzględniając średnie prędkości przepływu wody przez grunt dla okresu badawczego, uwzględniając wartości współczynnika filtracji obliczone wg stosowanych trzech wzorów.

Tabela 7. Zestawienie obliczonych czasów retencji na poszczególnych odcinkach instalacji badawczej

Table 7. Summary of calculated retention times on individual sections of the research installation

Odcinek drogi infiltracji	Obliczony czas retencji, [d]		
	Dla k obliczonego wg wzoru Hazena (3)	Dla k obliczonego wg wzoru uproszczonego Hazena (5)	Dla k obliczonego wg wzoru Seelheima (6)
Staw – PP1	5,27	5,45	9,70
PP1-PP2	30,34	31,38	83,97
PP2-PP3	48,17	49,71	80,00
PP3-S48	22,08	22,84	63,89
Suma: staw – S-48	105,85	109,39	237,56

Ocena metod wyznaczania czasu retencji infiltrującej wody w gruncie

Czas retencji wody w gruncie jest podstawowym parametrem hydrogeologicznym, wpływającym na efekty podczyszczania ujmo-

wanej wody, w zakresie usuwania makro i mikro domieszek. Wiadomo, że efekty uzdatniania w procesie infiltracji są wprost proporcjonalne do czasu przepływu infiltrującej wody przez grunt.

W tab. 2 i 7 przedstawiono wartości czasu retencji w gruncie wyznaczone dwoma metodami, metodą pomiaru zmian temperatury wody na drodze infiltracji i metodą obliczeń na podstawie wzorów uwzględniających granulometrię gruntu. Obie metody dały rozbieżne wyniki wartości średnich czasów retencji wody w gruncie. Wyznaczony na podstawie pomiarów temperatury czas retencji przyjmuje mniejsze wartości na każdym odcinku instalacji badawczej, w porównaniu do czasu obliczonego na podstawie granulometrii gruntu. Znaczne różnice uzyskanych wyników średniego czasu retencji występują dla pierwszego odcinka infiltracji, od stawu do pierwszego piezometru PP1. Różnica wynika z przyjętego założenia jednorodności gruntu warstwy wodonośnej w obliczeniach dotyczący odcinków pomiarowych. Takie założenie nie uwzględnia oporów przepływu, jaki stawia drobnodispersyjna warstwa osadów sedymentujących i kolmatujących dno stawu infiltracyjnego. Pomińnięcie wpływu warstwy osadów dennych powoduje, że w wyniku obliczeń otrzymano znacznie niższe wartości czasu retencji wody na pierwszym odcinku drogi infiltracji (tab. 7).

Porównywalne wartości czasu przetrzymania w gruncie otrzymano, stosując oba wzory Hazena do obliczania współczynnika filtracji i metody pomiaru temperatury dla odcinków PP1-PP2 oraz dla ostatniego odcinka PP3-Studnia S-48. Można wnioskować, że na tych odcinkach warstwę gruntu kontaktującą się z wodą infiltracyjną można uznać za jednorodną. Odcinek PP2-PP3 wykazuje duże rozbieżności wyników czasu retencji, wyznaczonego obiema metodami. Można przypuszczać, że na drodze przepływu pomiędzy drugim i trzecim piezometrem zachodzą zjawiska, wpływające na rzeczywisty przepływ wody, który empirycznie wykazuje niższą wartość. Przyczyną może być przewarstwienie gruntu warstwą grubego piasku o niższym oporze hydraulicznym.

Analizując wyniki zmian temperatury wody z rzeki i ze studni zbiorczej (rys. 3) wykazano rozbieżność pomiędzy średnim czasem retencji całego ujęcia i czasem retencji wyznaczonym na przekroju gruntu instalacji badawczej. Średni czas retencji wyznaczony dla ujęcia jest wypadkową rzeczywistych czasów retencji w gruncie, występujących w różnych obszarach ujęcia infiltracyjnego, na który to czas wpływa różnorodność gruntów i co za tym idzie parametrów hydrogeologicznych rozległego terenu ujęcia. Pełny obraz istniejących warunków hydrogeologicznych na rozległym ujęciu infiltracji sztucznej wymaga opracowania planu monitoringu. Monitoring powinien uwzględniać opomiarowanie dróg przepływu wody infiltrującej, za pomocą odpowiedniej ilości piezometrów, celem wyznaczenia czasów retencji w różnych obszarach ujęcia na wzór opisanej instalacji badawczej. Monitoring warunków przepływu powinien być uzupełniony monitoringiem jakości wody w studniach lewarowych, co umożliwiłoby wskazanie obszarów o mniej korzystnych warunkach hydrogeologicznych i gorszych efektach podczyszczania wody w gruncie.

Wykorzystanie parametrów hydrogeologicznych do oceny efektów oczyszczania wody w procesie infiltracji

W przypadku projektowania i eksploatacji ujęć infiltracyjnych ważne jest prawidłowe rozpoznanie parametrów hydrogeologicznych, wpływających na poprawę jakości ujmowanych wód powierzchniowych. Podczas interpretacji badań do oceny zmienności jakości ujmowanej wody powierzchniowej oraz efektów procesu infiltracji, w odniesieniu do zanieczyszczeń organicznych, wybrano parametr ogólny węgiel organiczny (OWO).

Dane analizowano z podziałem na okres letni i zimowy. Podział ten został dokonany w oparciu o temperaturę wody w stawie infiltracyjnym. Wartości temperatur w porze letniej i zimowej w badanych latach przedstawiono w tab. 8.

Zmienność wartości OWO w wodzie ze stawu infiltracyjnego i na trasie infiltracji analizowano w okresie letnim i zimowym. Wykresy

na rys. 4 przedstawiają średnie wartości OWO w wodzie pobranej z pięciu punktów badawczych na przestrzeni lat 2018-2022.

Tabela 8. Temperatury wody powierzchniowej w stawie infiltracyjnym
Table 8. Surface water temperatures in the infiltration pond

	Temperatura, °C		
	średnia	minimum	maksimum
Pora letnia	19,1	12,3	26,2
Pora zimowa	6,8	1,1	11,4

Największe wahania wartości OWO występowały w wodzie w stawie infiltracyjnym. Na drodze infiltracji dochodzi do stopniowej stabilizacji zawartości związków organicznych w wodzie.

Największe efekty usuwania OWO następowały na pierwszym odcinku infiltracji od stawu do piezometru PP1. Dla wszystkich odcinków infiltracji obliczono wartość średniej efektywności usuwania OWO – Eo.

Efektywność obliczono według następującego wzoru (8):

$$E_o = \frac{c_d - c_o}{c_d} \cdot 100\% \quad (8)$$

w którym:

c_d – średnie stężenie OWO w wodzie dopływającej do danego odcinka drogi infiltracji,

c_o – średnie stężenie OWO w wodzie odpływającej z danego odcinka drogi infiltracji.

Wartości obliczonych efektywności usuwania OWO na poszczególnych odcinkach infiltracji terenowej instalacji badawczej w porze letniej i zimowej zamieszczono w tab. 9.

Tabela 9. Efektywności usuwania OWO z wody w okresie badań na poszczególnych odcinkach drogi infiltracji terenowej instalacji badawczej
Table 9. Efficiency of TOC removal from water during the research period on individual sections of the infiltration route of the field research installation

	Staw-PP1	PP1-PP2	PP2-PP3	PP3-studnia
Pora letnia	46%	22%	0,82%	15%
Pora zimowa	46%	10%	0,59%	1,4%

Wartości podane w tab. 9 wskazują, że najwyższa efektywność usuwania związków organicznych jest osiągana na pierwszym odcinku od stawu do pierwszego piezometru. Do oceny intensywności procesu infiltracji w usuwaniu OWO, zaproponowano wskaźnik WE-OWO, wyznaczony jako iloraz efektywność Eo i czasu przetrzymania wody w gruncie. W tab. 10 przedstawiono wartości wskaźnika WE-OWO, obliczone dla kolejnych odcinków drogi infiltracji. Wg zaproponowanej klasyfikacji, największa intensywność usuwania OWO występuje na pierwszym odcinku infiltracji, zarówno w porze letniej jak i zimowej. Intensywność usuwania związków organicznych jest wyższa w porze letniej.

Tabela 10. Wskaźnik efektywności WE-OWO usuwania OWO na poszczególnych odcinkach drogi infiltracji

Table 10. WE-OWO efficiency index for TOC removal on individual sections of the infiltration route

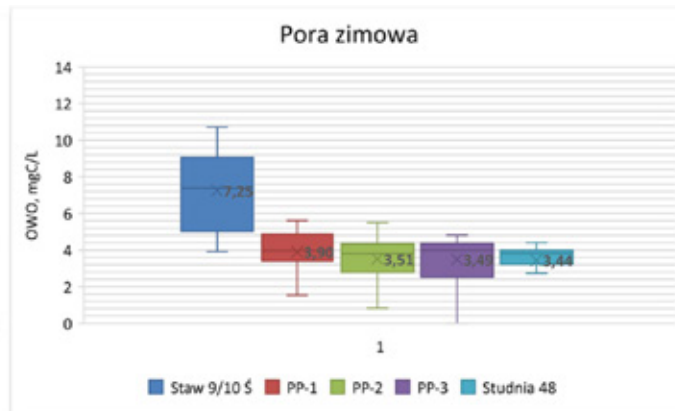
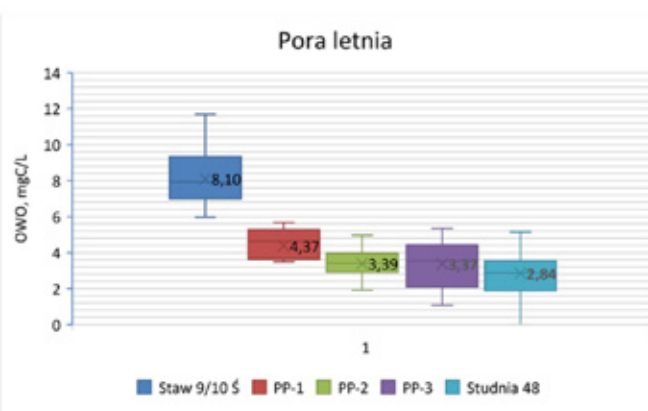
	Staw-PP1	PP1-PP2	PP2-PP3	PP3-studnia
	WE-OWO, [%/d]			
Pora letnia	1,92	0,83	0,12	0,39
Pora zimowa	1,65	0,34	0,07	0,05

Pierwsza faza oczyszczania wody, w procesie sztucznej infiltracji, zachodzi podczas przepływu wody przez warstwę osadów, utworzoną na dnie stawów infiltracyjnych. Warstwa ta powstaje na skutek postępowania procesów kolmatacyjnych, w początkowym okresie pracy stawu po czyszczeniu i ma zazwyczaj grubość kilku centymetrów. Osad jest naturalną błoną mineralno-biologiczną, na której zachodzą procesy filtracji, wymiany jonowej, adsorpcji i biodegradacji, w wyniku których następuje separacja wielu zanieczyszczeń, przede wszystkim organicznych [8, 9]. Wartości obliczonych efektywności potwierdzają, że na pierwszym odcinku infiltracji dochodzi do największego spadku zawartości związków organicznych. Po przejściu infiltrującej wody przez warstwę osadu dennego, woda przechodzi przez strefy napowietrzenia i saturacji, gdzie następuje dalsza biodegradacja i adsorpcja. Środowisko tlenowe sprzyja dalszej biodegradacji materii organicznej. Domieszką są również adsorbowane w glebie. Trasę infiltracji można uznać za rodzaj reaktora biologiczno-chemicznego. W przypadku opisywanej instalacji terenowej, reaktor ten można podzielić na sekcje odpowiadające drodze przepływu wody do kolejnych punktów pomiarowych. Aby określić, czy w danym reaktorze przeważają procesy sorpcji, czy biodegradacji, wykorzystano test EMS (Eberhardt, Madsen, Sontheimer). W badaniu tym oblicza się współczynnik S, będący ilorzem spadku wartości chemicznego zapotrzebowania tlenu wyznaczanego metodą z nadmanganianem potasu w wodzie infiltrującej w danym reaktorze $\Delta\text{COD-KMnO}_4$ i spadku stężenia tlenu rozpuszczonego – ΔO_2 na tym samym odcinku infiltracji. Wartość współczynnika S wskazuje na przewagę jednego z procesów: adsorpcji lub biodegradacji, co przedstawiono w tab. 11 [14].

Tabela 11. Klasyfikacja procesów według testu EMS

Table 11. Classification of processes according to the EMS test

S=1	adsorpcja i biodegradacja zachodzą z identyczną intensywnością
S<1	dominacja biodegradacji
S>1	dominacja adsorpcji
S=0, $\Delta\text{COD-KMnO}_4=0, \Delta\text{O}_2 > 0$	zatrzymanie adsorpcji i biodegradacji
S nieokreślone, $\Delta\text{COD-KMnO}_4 > 0, \Delta\text{O}_2 = 0$	zachodzi adsorpcja, brak biodegradacji
$\Delta\text{COD-KMnO}_4 = 0, \Delta\text{O}_2 = 0$	brak adsorpcji i biodegradacji



Rys.4. Średnie wartości OWO w 5 punktach pomiarowych w porach letnich i zimowych okresu badawczego

Fig.4. Average TOC values at 5 measurement points in the summer and winter seasons of the research period

Klasyfikację procesów na poszczególnych odcinkach infiltracji według testu EMS przedstawiono w tab. 12. Przedstawione w tabeli wartości współczynnika S, $\Delta\text{COD-KMnO}_4$ i ΔO_2 wskazują, że w pierwszym odcinku infiltracji od stawu do PP1 dominuje proces biodegradacji nad adsorpcją. Sprzyja temu natlenienie wody. W warunkach beztlenowych procesy biodegradacji przebiegają wolniej.

Biorąc pod uwagę wartości wskaźnika WE-OWO i wyniki testu EMS można stwierdzić, że wysoka efektywność i intensywność usuwania OWO na pierwszym odcinku drogi infiltracji jest wynikiem tlenowej biodegradacji. Kolejne odcinki infiltracji charakteryzuje znacznie mniejsza efektywność usuwania OWO. Wg testu EMS, na kolejnych odcinkach infiltracji biodegradacja nie zachodzi, rośnie wpływ adsorpcji w usuwaniu OWO z wody infiltrującej.

Tabela 12. Klasyfikacja procesów na poszczególnych odcinkach infiltracji według testu EMS

Table. 12. Classification of processes in individual infiltration sections according to the EMS test

Odcinek infiltracji	$\Delta\text{COD-KMnO}_4$	ΔO_2	S	Ocena
Pond-PP1	6,7	3,5	0,52	Dominacja biodegradacji
PP1-PP2	0	0,2	0	Zatrzymanie biodegradacji i sorpcji
PP2-PP3	0,7	0	nieokreślone	Zachodzi sorpcja, brak biodegradacji
PP3-Studnia	0,3	0	nieokreślone	Zachodzi sorpcja, brak biodegradacji

Wyższe wartości wskaźnika WE-OWO oraz efektywności usuwania OWO wskazują, że na ostatnim odcinku infiltracji od PP3 do studni w porze letniej zachodzi efektywna sorpcja związków organicznych. Na efekty sorpcji ma wpływ rodzaj adsorbentu i parametrów, takich jak temperatura, pH i czas kontaktu [7]. Na odcinku PP3-studnia woda infiltruje przez grunt otaczający studnię, do której dopływają wody podziemne, zawierające żelazo i mangan. Domieszki te w czasie infiltracji są zatrzymywane na ziarnach piasku otaczających studnię. Wytrącone tlenki żelaza i manganu na ziarnach gruntu tworzą materiał mezoporowaty, o dobrych właściwościach adsorpcyjnych [5]. Latem ujęcie pracuje z wyższą wydajnością, dopływ wód podziemnych jest wówczas większy i sprzyja to adsorpcji na świeżych wytrąconych tlenkach Fe i Mn.

Wnioski

Z przedstawionego porównania metod wyznaczania wartości czasu retencji wody infiltrującej w gruncie wynika, że lepszym sposobem są dobrze zaplanowane, ciągle i prowadzone z wymaganą częstotliwością pomiary zmienności temperatury infiltrującej wody. Warunkiem niezbędnym jest posiadanie na ujęciu systemu opomiarowania w postaci działających otworów piezometrycznych, umożliwiających śledzenie zmian temperatury w kilku miejscach na drodze przepływu wody od stawu (rzeki) do studni zbiorczych. Systemy monitoringu powinny być rozmieszczone w wielu obszarach ujęcia, o charakterystycznych, często odmiennych warunkach hydrogeologicznych. Zaplanowany w ten sposób monitoring, połączony z pomiarami efektów uzdatniania, pozwala wskazać obszary ujęcia o pogarszającej się hydraulicznej i efektywności podczyszczania oraz podjęcie działań eksploatacyjnych, prowadzących do intensyfikacji procesów infiltracji w zakresie usuwania makrozanieczyszczeń i mikrozanieczyszczeń z ujmowanej wody. Efektem monitoringu może być interpretacja zebranych danych, przy pomocy specjalistycznych programów komputerowych i określenie rzeczywistych charak-

terystryk przepływów wody w gruncie (z określeniem wektorów przepływów i stopnia odzysku wód wprowadzanych do gruntu) i weryfikowanie wyników pomiarów terenowych.

Wyznaczone na podstawie doświadczeń czasy przetrzymania wody w gruncie oraz efektywność obniżania OWO w procesie infiltracji, posłużyły do zaproponowania współczynnika intensywności procesu infiltracji, wyznaczonego jako iloraz tych dwóch parametrów. Porównanie obliczonych wartości współczynnika WE-OWO, z wyznaczonymi na podstawie testu EMS wartościami współczynnika S, wskazuje na wysoką intensywność procesu tlenowej biodegradacji na pierwszym odcinku infiltracji. Zastosowanie obu kryteriów posłużyć może do klasyfikacji procesów zachodzących podczas infiltracji oraz ich intensywności, dając możliwość oceny efektów infiltracji pod kątem ich stałości i niezawodności oraz możliwości optymalizacji eksploatacji ujęcia pod kątem efektywności procesów podczyszczania.

Praca została sfinansowana ze środków Politechniki Poznańskiej w ramach projektu 0713/SBAD/0991

LITERATURA:

- [1] Dash R.R., Mehrotra J., Kumar P., Grischek T. 2008. „Lake bank filtration at Nainital, India”. *Hydrogeol. J.* 16(6): 1089-1099.
- [2] Dash R.R., Prakash E.B., Kumar P., Mehrotra I., Sandhu C., Grischek T. 2010. „River bank filtration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bacteria”. *Hydrogeol. J.* 18: 973-983.
- [3] Dillon P.J., Miller M., Fallowfield H., Hutson J. 2002. „The potential of riverbank filtration for drinking water supplies in relation to microcystin removal in brackish aquifers”. *J. Hydrol.* 266(3-4): 209-221.
- [4] Dragon K., Górski J., Kruć R., Drożdżyński D., Grischek T. 2018. „Removal of natural organic matter and organic micropollutants during riverbank filtration in Krajkowo, Poland”. *Water.* 10(10) 1457.
- [5] Dymaczewski Z., Falkowska J., Frąckowiak A., Jeż-Walkowiak J., Nawrot J., Dudek L., Topór T. 2020. „The impact of filtration materials microstructure on its autoactivation for manganese removal from groundwater”. *Minerals.* 10(6): 502.
- [6] Ghodeif K., Grischek T., Bartak R., Wahaab R., Herlitzius J. 2016. „Potential of riverbank filtration (RBF) in Egypt”. *Environ. Earth Sci.*, 75: 1-13.
- [7] Grassi M., Kaykioglu G., Belgiorno V., Lofrano G. 2012. „Removal of Emerging Contaminants from water and wastewater by adsorption proces”. Published in: Emerging compounds removal from wastewater, Chapter 2, Netherlands, Springer. 15-37.
- [8] Grünheid S., Amy G., Jekel M. 2005. „Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge”. *Water Res.* 39(14): 3219-3228.
- [9] Hoffmann A., Gunkel G. 2011. „Bank filtration in the sandy littoral zone of Lake Tegiel (Berlin): Structure and dynamics of the biological active filter zone and clogging processes”. *Limnologica.* 41(1): 10-19.
- [10] Jeż – Walkowiak J., Makala A., Mądrecka-Witkowska B., Michałkiewicz M., Kolwicz N. 2021. „Effect of initial treatment of surface water at an artificial infiltration intake”. *Desal. Water Treat.* 226: 62-76.
- [11] Macioszczyk T. 1992. „Parametry hydrogeologiczne. W służbie Polskiej Geologii”. Wyd AGH, Kraków.
- [12] Makala A., Dymaczewski Z., Jeż – Walkowiak J., Strykowska A., Zembruska J. 2021. „Impact of artificial infiltration on the removal of nonsteroidal anti – inflammatory drugs during treatment of surface water”. *Energies.* 14(24): 8406.
- [13] Makala A., Uwimpaye F., Dymaczewski Z., Jeż-Walkowiak J., Strykowska A., Cierniak D., Machnicka V., Wyrwas B. 2023. „Influence of artificial infiltration on the removal of surfactants from treated surface waters”. *Desal. Water Treat.* 315: 190-204.
- [14] Papciak D., Kaleta J., Puszkiewicz A., Tchórzewska-Cieślak B. 2016. „The use of biofiltration process to remove organic matter from groundwater”. *J. Ecol. Eng.* 17: 119-124.
- [15] Weiss W.J., Bouwer E.J., Aboytes R., LeChevallier M.W., O’melia Ch.R., Le B.T., Schwab K.J. 2005. „Riverbank filtration for control of microorganisms: Results from field monitoring”. *Water Res.* 39 (10): 1990-2001.