

---

### 3. Abstract

An analysis of market filtration technologies for popular natural swimming ponds indicates that they are implemented directly from the shallow decorative tank treatment solutions. These solutions are expensive, lack modular construction systems, and lack the ability to selectively control water flow, which would facilitate servicing and maintenance. This identified technological gap requires a dedicated solution in line with the adopted functional assumptions: the use of a highly efficient adsorbent, lightweight and modular chambers capable of systemic multiplication, the ability to selectively filter without shutting down the pond's water circulation system, and ease of installation, service, and maintenance.

The technological solution dedicated to eco-pools involved the implementation of three tasks: a laboratory column experiment to select a highly efficient mineral sorption material with positive verification of the bed filtration processes; a field experiment to determine the effective filtration rate for the treatment system with the selected mineral adsorbent; and a field experiment to analyze the operational efficiency of the prototype water treatment system at the selected filtration rate. Additionally, a lightweight, modular, highly durable filtration chamber with selective valve control was designed and implemented as the basis for a prototype water treatment system for swimming ponds (patent pending).

Filter materials meeting the initial criteria of market availability, relatively low price, and functional potential were selected for further analysis. These included Rockfos® (modified opoka rock), Sulfur E (iron-based material), and limestone grit.

Based on water flow kinetics analyses for selected minerals using calculations of equivalent diameters, porosity, and sphericity of grains, and modeling using the Ergun formula, it was noted that due to the multitude of formulas, there were difficulties in modeling pressure losses relative to filtration velocity. Model results close to the measured results were obtained for volumetric diameters and sphericity calculated from the average spatial dimensions of individual grains. Knowledge of the media specifications known from the product data sheets and calculations related to filtration flow constitute the basic design assumptions for building a median filtration velocity.

In a laboratory column experiment, it was found that the highest and consistent sorption capacity was demonstrated by the filter with Rockfos® material (90-99.7%), sufficient sorption capacity was demonstrated by Sulfur E (20-89%), and the lowest by limestone grit ( $\geq 47.0\%$ ), as evidenced by the calculated sorption efficiency and absorption coefficients of the deposits. The tested minerals released various ions from the deposit to a minimal extent, without

---

exceeding water quality standards for FLL eco-pools. The potential for use in filtration systems of natural swimming ponds was particularly evident with modified rock (Rockfos®). The iron material (Sulfur E) demonstrated only sufficient sorption efficiency, but its high Fe content may regulate the bioavailability of phosphorus. Limestone grit did not meet filtration expectations. To determine the effective filtration rate for three test eco-pools (with circulation rates of 5 m/h, 10 m/h, and 15 m/h), physicochemical parameters of the water were tested before and after filtration. The composition of fecal bacteria, phytoplankton, and zooplankton was also examined.

Analysis of the obtained results, calculations, and statistical tests allowed for the selection of an effective filtration rate of 5 m/h, in accordance with the standards for FLL eco-pools. In the case of testing the functional efficiency of a dedicated filtration system for the Type II test pond, at a filtration rate of 5 m/h, analyses of the same physicochemical parameters demonstrated its high efficiency under bathing conditions. The experiment positively verified the functionality of the designed filtration chamber and the selective, valve-based filter control for servicing and maintenance of the water treatment system. A cost analysis of the proposed filtration system compared to market solutions indicates significant savings ranging from 27% to 82%, depending on the cost element (construction, installation, service, and maintenance).

A basic filtration kit (starter) was proposed for commercialization of the designed solutions. It includes four chambers comprising a modular filtration system with accessories (filter mats, mesh tubes, adsorbent, circulation pump, connections, and valves with selective operation control) at a price of approximately 33 000 PLN.

The culmination of the doctoral project is the implementation of a dedicated, prototype filtration system for a swimming pond being built for a private investor in Radzymin (near Warsaw). Completion of all work is expected in the first half of 2026.

In this way, the scientific and implementation goals, all specific goals were achieved, the research problem was solved and the hypotheses were positively verified.

**Keywords:** adsorption, eco-pool, Rockfos®, Sulfur E, modular filtration system

---

## 2. Streszczenie i słowa kluczowe

Analiza rynkowych technologii filtracji dla popularnych inwestycyjnie naturalnych stawów kąpielowych świadczy o tym, że są one implementowane bezpośrednio z rozwiązań uzdatniania oczek wodnych. Są to rozwiązania drogie, nie mają modułowego systemu budowy i możliwości wybiórczej pracy z regulacją przepływu wody, co ułatwiłoby serwis i pielęgnację. Tak zidentyfikowana luka technologiczna wymaga dedykowanego rozwiązania zgodnie z przyjętymi założeniami funkcjonalnymi: zastosowanie wysoko sprawnego adsorbentu, lekkość i modułowość komór zdolnych do systemowej multiplikacji, możliwość selektywnej filtracji bez wyłączania cyrkulacyjnego obiegu wody w stawie, czy łatwość montażu, serwisu i pielęgnacji.

Dedykowane ekobasenom rozwiązanie technologiczne związane było z realizacją trzech zadań: kolumnowego eksperymentu laboratoryjnego w celu wyboru wysoko sprawnego sorpcyjnie materiału mineralnego przy pozytywnej weryfikacji procesów filtracji na złożu; eksperymentu terenowego w celu określenia efektywnej prędkości filtracji dla systemu uzdatniania z wybranym adsorbentem mineralnym i eksperymentu terenowego w celu analizy sprawności pracy prototypowego systemu uzdatniania wody dla wybranej prędkości filtracji. Dodatkowo opracowano i zrealizowano projekt lekkiej, modułowej komory filtracyjnej o wysokiej trwałości, z selektywną regulacją zaworową jako podstawy budowy prototypowego systemu uzdatniania wody w stawach kąpielowych (wniosek patentowy).

Do dalszych analiz wybrano materiały filtracyjne spełniające wstępne kryteria: dostępność rynkowa, relatywnie niska cena i potencjał funkcjonalny. Były to: Rockfos® (opoka modyfikowana), Sulfur E (materiał żelazowy) i grys wapienny.

W oparciu o analizy kinetyki przepływu wody dla wybranych minerałów z wykorzystaniem obliczeń średnic zastępczych, porowatości i sferyczności ziaren, w odniesieniu do modelowania przez wzór Erguna zanotowano, że ze względu na mnogość wzorów występują problemy w modelowaniu strat ciśnienia w odniesieniu do prędkości filtracji. Wyniki modelu bliskie wynikom pomiaru uzyskano dla średnic objętościowych i sferyczności obliczonej ze średnich wymiarów przestrzennych poszczególnych ziaren. Znajomość specyfikacji złożów znanych z kart produktu oraz przeliczenia związane z przepływem filtracyjnym stanowią podstawowe założenia projektowe dla budowy złoża o właściwej prędkości filtracji.

W przypadku laboratoryjnego eksperymentu kolumnowego stwierdzono, że najwyższą i stałą zdolnością sorpcyjną cechował się filtr z materiałem Rockfos® (90-99,7%), dostateczną - Sulfur E (20-89%), a najniższą – grys wapienny ( $\geq 47,0\%$ ), o czym świadczyły również

---

obliczone wskaźniki sprawności sorpcyjnej i chłonności złóż. Badane minerały w minimalnym stopniu cechowały się uwalnianiem ze złoża różnych jonów bez przekroczenia norm jakości wód dla ekobasenów FLL. Potencjał użytkowy w systemach filtracyjnych naturalnych stawów kąpielowych dotyczył w szczególności opoki modyfikowanej (Rockfos®). Materiał żelazowy (Sulfur E) wykazywał tylko dostateczną efektywność sorpcyjną, ale jego wysoka zawartość Fe może regulować dostępność biologiczną fosforu. Grys wapienny nie spełnił oczekiwań filtracyjnych.

W celu określenia efektywnej prędkości filtracji dla trzech testowych ekobasenów (z prędkością obiegu cyrkulacyjnego - 5m/h, 10m/h i 15m/h) wykonano badania czynników fizyczno-chemicznych wód przed i po filtracji. Dokonano również badań składu bakterii fekalnych oraz fito- i zooplanktonu. Analizy uzyskanych wyników, przeliczenia i testy statystyczne pozwoliły na wybór efektywnej prędkości filtracji rzędu 5 m/h, zgodnie z normami dla ekobasenów FLL.

W przypadku badania sprawności funkcjonalnej dedykowanego systemu filtracji dla stawu testowego typu II, przy prędkości filtracji 5m/h analizy wartości tych samych czynników fizyczno-chemicznych wód pozwoliły na wykazanie jego wysokiej efektywności w warunkach kąpielowego użytkowania. W ramach doświadczenia pozytywnie zweryfikowano funkcjonalność zaprojektowanej komory filtracyjnej i selektywnej, zaworowej regulacji pracy filtra dla serwisu i pielęgnacji systemu uzdatniania wody.

Analiza kosztów proponowanego systemu filtracji w porównaniu z rynkowymi rozwiązaniami wskazuje na znaczne oszczędności sięgające od 27 do 82% w zależności od elementu wyceny (budowa, montaż, serwis i pielęgnacja).

Dla komercjalizacji zaprojektowanych rozwiązań zaproponowano podstawowy zestaw filtracyjny (starter). Zawiera on cztery komory składające się na modułowy system filtracji wraz z osprzętem (maty filtracyjne, rury siatkowe, adsorbent, pompa obiegowa, przyłącza i zawory z selektywną regulacją pracy) w cenie ok. 33 000 zł.

Podsumowaniem realizacji doktoratu jest wdrożenie dedykowanego, prototypowego systemu filtracji dla stawu kąpielowego budowanego dla prywatnego inwestora w Radzyminie (k. Warszawy). Termin zakończenia wszystkich prac przewidywany jest na pierwszą połowę 2026 r.

W ten sposób zrealizowano cel naukowy i wdrożeniowy, wszystkie cele szczegółowe, rozwiązano problem badawczy i pozytywnie zweryfikowano postawione hipotezy.

**Słowa kluczowe:** adsorpcja, ekobasen, Rockfos®, Sulfur E, modułowy system filtracji