

Evaluation of the microbiological efficacy of bioremediation of the Morskie Oko reservoir in Wrocław

Ocena skuteczności mikrobiologicznej bioremediacji zbiornika Morskie Oko we Wrocławiu



DOI: 10.15199/62.2025.11.12

Dokonano oceny skuteczności mikrobiologicznej bioremediacji zbiornika Morskie Oko we Wrocławiu, miejskiego kąpieliska silnie obciążonego rekreacją i pływaniem wodnym. Wstępne badania przeprowadzono w maju 2024 r., po czym zastosowano 5 m³ biopreparatów ACS Aqua Culture i uruchomiono mikroaerację. W maju 2025 r. ponownie oceniono takie parametry fizykochemiczne i biologiczne wód oraz osadów, jak: fosfor i azot ogólny, chlorofil a, rozpuszczony tlen (warstwa powierzchniowa i przydenna), pH, przejrzystość wody i grubość osadów organicznych, ze szczególnym uwzględnieniem eutrofizacji i struktury osadów dennych. Wyniki wykazały poprawę jakości wód: spadek zawartości biogenów i chlorofilu a, wzrost stężenia tlenu przy dnie, większą przejrzystość i zmniejszenie osadów organicznych. Połączenie mikroaeracji z bioremediacją mikrobiologiczną okazało się skuteczne we wspomaganiu samooczyszczania przy presji biologicznej i antropogenicznej.

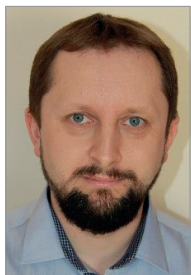
Słowa kluczowe: bioremediacja, zbiornik wodny, mikroaeracja, kąpielisko, eutrofizacja

Microbiol. effectiveness of bioremediation of the Morskie Oko reservoir in Wrocław, Poland, was assessed. The bioremediation included the application of 5 m³ of ACS Aqua Culture microbial preparations and the implementation of microaeration starting in May 2024. In May 2025, phys.-chem. and biol. parameters of water and sediments were reassessed, including total P and N, chlorophyll a, dissolved O (surface and bottom layers), pH, water transparency, and thickness of org. sediments, focusing on eutrophication and sediment structure. The results showed an improved water quality: reduced nutrients and chlorophyll a, increased bottom-layer O, higher transparency, and decreased org. sediments. Combining microaeration with microbial bioremediation proved to be effective in supporting self-purification under biol. and anthropogenic pressure.

Keywords: bioremediation, water body, microaeration, bathing resort, eutrophication

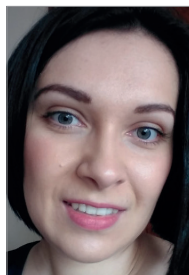
Zbiornik wodny Morskie Oko, zlokalizowany na obszarze „Wielkiej Wyspy” we Wrocławiu, jest sztucznym akwenem o powierzchni 4,3–4,8 ha, powstałym w dawnym wyrobisku piasku i żwiru w obrębie starorzecza Odry (tabela). Jego hydrologia jest w dużej mierze determinowana przez wody podziemne, co sprawia, że funkcjonowanie akwenu jest stosunkowo niezależne od dopływu wód powierzchniowych z otaczającej zurbanizowanej zlewni. Morfologia zbiornika, charakteryzująca się wydłużonym kształtem oraz zróżnic-

The Morskie Oko water reservoir, located on a big island Wielka Wyspa in Wrocław, is an artificial water body with the area of 4.3–4.8 ha, created due to sand and gravel excavation within an old Odra River oxbow (Table). Its hydrology is largely determined by groundwater, which allows the reservoir to function relatively independently of the inflow of surface waters from the surrounding urbanized catchment. The reservoir's morphology, characterized by an elongated shape, and its varied bathymetry are



Dr. Robert MAZUR (ORCID: 0000-0001-7869-1823) is an assistant professor at the Faculty of Geo-Data Science, Geodesy and Environmental Engineering at AGH University of Krakow. His research interests include transformations of organic pollutants in aquatic environments, including municipal and industrial wastewater.

Dr Robert MAZUR (ORCID: 0000-0001-7869-1823) jest adiunktem na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Jego zainteresowania badawcze obejmują przemiany zanieczyszczeń organicznych w środowiskach wodnych oraz w ściekach komunalnych i przemysłowych.



Dr. Agata MAZUR, Eng. completed her doctoral studies at AGH University of Krakow, Faculty of Geo-Data Science, Geodesy, and Environmental Engineering, Department of Environmental Management and Protection. Her research interests include transformations of organic pollutants in aquatic environments, including municipal and industrial wastewater.

Dr inż. Agata MAZUR ukończyła studia doktoranckie w Katedrze Zarządzania i Ochrony Środowiska na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Jej zainteresowania badawcze obejmują przemiany zanieczyszczeń organicznych w środowiskach wodnych, w tym w ściekach komunalnych i przemysłowych.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mazur@agh.edu.pl

Table. Morphometric and hydrological parameters of the Morskie Oko reservoir in Wrocław
Tabela. Parametry morfometryczne i hydrologiczne zbiornika Morskie Oko we Wrocławiu

Parameter/ Parametr	Value/Characteristic/ Wartość/Charakterystyka
Area/Powierzchnia	4.3–5 ha
Water volume/Objętość wody	75,000–100,000 m ³
Average depth/Średnia głębokość	1.5–2 m
Maximum depth/Głębokość maksymalna	2.5 m
Maximum length/Długość maksymalna	370 m
Shoreline length/Długość linii brzegowej	900 m
Shape/Kształt	elongated/wydłużony
Water sources/Źródła zasilania	groundwater + precipitation/wody podziemne + wody opadowe
Hydraulic retention time/Czas retencji hydraulicznej (HRT)	45–180 days/dni
Catchment/Zlewnia	local, urban/lokalna, miejska
Water quality/Jakość wody	usually suitable for bathing/zazwyczaj przydatna do kąpieli
Environmental problems/Problemy środowiskowe	eutrophication, bacteriological pollution, micropollution/eutrofizacja, zanieczyszczenia bakteriologiczne i mikrozanieczyszczenia
Management measures/Działania zarządcze	aeration, bioremediation, beach cleaning/napowietrzanie, bioremediacja, sprzątanie plaży

wana batymetria, są typowe dla starorzeczy. Kluczowym parametrem hydrologicznym Morskiego Oka jest długi czas retencji hydraulicznej (HRT), szacowany na ok. 45–180 dni. Taki stagnujący charakter wody sprzyja akumulacji biogenów i zanieczyszczeń, zwiększając ryzyko eutrofizacji oraz ogranicza naturalne procesy samooczyszczania się akwenu¹⁾. Zbiornik pełni funkcję kąpieliska od 1910 r. Od tego czasu poddawany był modernizacji. Najistotniejsze inwestycje miały miejsce w latach 1928 oraz 1970. Mimo regularnego monitoringu jakości wody prowadzonego przez Główny Inspektorat Sanitarny, zbiornik jest narażony na szereg problemów środowiskowych, w tym zanieczyszczenia bakteriologiczne (*Escherichia coli*, *Enterococcus*), ryzyko eutrofizacji i potencjalne mikrozanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego. Intensywne użytkowanie rekreacyjne zwiększa presję na ekosystem zbiornika, co wymaga wdrożenia działań zarządczych, takich jak bioremediacja i aeracja²⁾. Wskazuje to na konieczność systematycznej rekultywacji i poprawy natlenienia akwenu. Napowietrzanie wody odgrywa kluczową rolę w przeciwdziałaniu eutrofizacji, poprawie warunków siedliskowych oraz ograniczeniu rozwoju szkodliwych mikroorganizmów. Rekultywacja, obejmująca zarówno aspekty hydrologiczne, jak i morfologiczne, stanowi fundament dla utrzymania

typical of oxbow lakes. The key hydrological parameter of the Morskie Oko reservoir is its long hydraulic retention time (HRT), estimated at approximately 45–180 days. This stagnant nature of the water promotes the accumulation of nutrients and pollutants, increasing the risk of eutrophication and limiting the reservoir's natural self-purification processes¹⁾. The reservoir has been functioning as a bathing resort since 1910. Since then, it has undergone modernization. The most important measures took place in 1928 and 1970. Despite regular water quality monitoring conducted by the National Sanitary Inspectorate, the reservoir is exposed to a range of environmental problems, including bacteriological contamination (*Escherichia coli*, *Enterococcus*), the risk of eutrophication, and potential anthropogenic micropollutants. Intensive recreational use increases the pressure on the reservoir's ecosystem, necessitating the implementation of repair measures such as bioremediation and aeration²⁾. This highlights the need for systematic reclamation and improved oxygenation of the reservoir. Water aeration plays a crucial role in counteracting eutrophication, improving habitat conditions, and limiting the development of harmful microorganisms. Reclamation, encompassing both hydrological and morphological aspects, forms the foundation for maintaining



Dr. Aleksandra WAGNER (ORCID: 0000-0001-8196-6170) is an assistant professor at the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering, AGH University of Science and Technology in Krakow. Her research interests include recreational activities and the development of urban water bodies, as well as environmental research in water reservoir areas.
Dr Aleksandra WAGNER (ORCID: 0000-0001-8196-6170) jest adiunktem na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Jej zainteresowania naukowe obejmują formy rekreacji oraz zagospodarowania miejskich zbiorników wodnych, jak również badania środowiskowe w obszarach zbiorników wodnych.



Dr. Piotr LEWICKI, Eng. (ORCID: 0000-0002-7187-275X) is an assistant professor at the Faculty of Tourism and Recreation, University School of Physical Education in Krakow. His research interests include recreational activities and the inventory of water reservoir infrastructure designated for these purposes.
Dr inż. Piotr LEWICKI (ORCID: 0000-0002-7187-275X) jest adiunktem na Wydziale Turystyki i Rekreacji Akademii Kultury Fizycznej w Krakowie. Jego zainteresowania naukowe obejmują formy rekreacji wodnej oraz inwentaryzacja infrastruktury zbiorników wodnych przeznaczonych na te cele.

trwałej jakości ekologicznej akwenu oraz bezpieczeństwa jego użytkowników. Analiza tych problemów w kontekście rekultywacji i aeracji pozwala na wypracowanie efektywnych strategii zarządzania miejskimi zbiornikami wodnymi w podobnych warunkach hydrologicznych i antropogenicznych.

W celu poprawy jakości wód wybrano metodę bioremediacji mikrobiologicznej, wykorzystującą konsorcja mikroorganizmów allochtonicznych do stymulacji procesów samooczyszczania. Metoda ta dodatkowo ogranicza eutrofizację, a jednocześnie minimalizuje negatywny wpływ na florę i faunę wodną, co czyni ją efektywnym i ekologicznym rozwiązaniem w rekultywacji zbiorników o charakterze miejskim i stagnującej wodzie³⁾.

Procesy bioremediacji były wspomagane przez system wysokosprawnej mikroaeracji (2 ruszty napowietrzające), który pozwalał na szybkie i efektywne natlenianie akwenu⁴⁾. W celu oceny efektywności prowadzonego procesu rekultywacji biotechnologicznej, przeprowadzono monitoring jakościowy zbiornika. Wyniki badań opisano w dyskusji i poddano krytycznej analizie naukowej.

Część doświadczalna

Aparatura

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano specjalistyczne urządzenia laboratoryjne. Chemiczne i biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT oraz BZT₅) określano metodą spektrofotometrii UV-Vis, stosując system Sensomat firmy Lovibond. Analizę stężeń biogenów wykonano, stosując spektrofotometrię UV-Vis zgodnie z obowiązującymi procedurami. Przejrzystość wody oceniano przy użyciu krążka Secchiego. Grubość osadów dennych mierzono poprzez połączenie obserwacji kamerą podwodną z pomiarami tyczką geodezyjną. Podstawowe parametry fizykochemiczne, takie jak pH, temperatura czy zawartość tlenu rozpuszczonego (DO), rejestrowano za pomocą multimetru Hach Lange HQ 2100 wyposażonego w specjalistyczne sondy pomiarowe.

Metodyka badań

Proces mikrobiologicznej remediacji zbiornika Morskie Oko rozpoczęto monitoringiem kontrolnym wód przed rekultywacją w wybranych punktach pomiarowych. Dnia 23 maja 2024 r. przeprowadzono badania terenowe obejmujące pomiary grubości osadów dennych, przejrzystości wody oraz stężenia tlenu rozpuszczonego zarówno w warstwach powierzchniowych, jak i przy dnie. Równocześnie pobrano próbki wody i osadów, które poddano szczegółowej analizie laboratoryjnej w celu oceny stanu i jakości zbiorników.

Stężenia fosforu całkowitego (P_{og}) i azotu całkowitego (N_{og}) oraz chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT, w zakresie 4,0–40,0 mg/L) oznaczano przy użyciu spektrofotometru Spectroquant® NOVA z dedykowanymi odczynnikami firmy Merck Millipore, dostosowanymi do odp-

the long-term ecological quality of the reservoir and the safety for its users. Analysing these problems in the context of reclamation and aeration facilitates the development of effective management strategies for urban water reservoirs under similar hydrological and anthropogenic conditions.

To improve water quality, a method of microbial bioremediation was chosen, using consortia of allochthonous microorganisms to stimulate self-purification processes. This method additionally limits eutrophication and simultaneously minimizes the negative impact on aquatic flora and fauna, making it an effective and ecological solution for the reclamation of urban reservoirs with stagnant water³⁾.

The bioremediation processes were supported by a high-efficiency micro-aeration system (2 aeration grids), which allowed rapid and effective oxygenation of the reservoir⁴⁾. To assess the effectiveness of the ongoing biotechnological reclamation process, a qualitative monitoring of the reservoir was conducted. The research results are described in the discussion and subjected to critical scientific analysis.

Experimental

Apparatus

Specialized laboratory equipment was used to perform the measurements. Chemical and biochemical oxygen demand (COD and BOD₅) were determined using the UV-Vis spectrophotometry method with a Lovibond Sensomat system. The analysis of nutrient concentrations was performed using UV-Vis spectrophotometers according to standard procedures. Water transparency was assessed using a Secchi disk. The thickness of bottom sediments was measured by combining observations with an underwater camera with measurements using a levelling rod. Basic physicochemical parameters, such as pH, temperature, and dissolved oxygen (DO) content, were recorded using a Hach Lange HQ 2100 multimeter equipped with specialized measuring probes.

Methods

The process of microbiological remediation of the Morskie Oko reservoir began with the control monitoring of the waters prior to restoration at selected measurement points. On May 2024, field studies were carried out, including measurements of bottom sediment thickness, water transparency, and dissolved oxygen concentration both in surface layers and near the bottom. At the same time, water and sediment samples were collected for detailed laboratory analyses to assess the condition and quality of the reservoir.

The concentrations of total phosphorus (P_{tot}) and total nitrogen (N_{tot}), as well as COD (Chemical Oxygen Demand – in the range of 4.0–40.0 mg/L), were determined using a Spectroquant® NOVA spectrophotometer with Merck

wiednich zakresów stężeń, a oznaczanie biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BZT₅) wykonano metodą OxiTop.

Ogólną liczbę mikroorganizmów wyznaczono wg procedury podanej w normie⁵⁾, inkubując próbki w temp. $36 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 44 ± 4 h oraz w temp. $22 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 68 ± 4 h.

Pomiary w terenie realizowano z wykorzystaniem multimetru Hach Lange HQ 2100, wyposażonego w sondy przeznaczone do badań wód powierzchniowych. Przed każdą serią odczytów wykonywano kalibrację urządzenia. Zawartość tlenu rozpuszczonego określano zarówno w strefie powierzchniowej, jak i w warstwie przydennej. Grubość miękkich osadów organicznych SOF (*soft organic fractions*), traktowanych jako wskaźnik ilości materii organicznej, mierzono w celu oceny przebiegu procesów biogeochemicznych oraz warunków tlenowych w zbiornikach. Pomiary wykonano w 10 starannie wybranych lokalizacjach. Dane uzyskane podczas badań poddano analizie statystycznej przy użyciu środowiska programu R oraz Microsoft Excel.

Inwentaryzacja przyrodnicza przeprowadzona została 30 lipca 2025 r. Objęła obszar przyległy do zbiornika, w którym przeprowadzono obserwacje i odnotowano gatunki awifauny oraz opisano siedliska makrofity wodnych w strefie wypłyć brzegowych zbiornika oraz jego otoczeniu.

Dyskusja wyników

Analiza danych monitoringowych, pozyskanych ze zbiornika Morskie Oko w okresie przed i po rocznym cyklu zabiegów bioremediacji mikrobiologicznej, wykazała istotną poprawę kluczowych wskaźników fizykochemicznych i bakteriologicznych jakości wody. Zaobserwowane pozytywne zmiany są szczególnie istotne w kontekście hydromorfologicznej specyfiki zbiornika, charakteryzującej się wydłużonym czasem retencji hydraulicznej (HRT, szacowanym na 45–180 dni). Stagnacyjny charakter wody stanowi wyzwanie dla procesów naturalnego samooczyszczania, jednocześnie zwiększając podatność ekosystemu na eutrofizację oraz akumulację substancji zanieczyszczających.

Najbardziej znaczącą poprawę zaobserwowano w przypadku parametrów bezpośrednio związanych z procesem eutrofizacji. Średnie stężenie azotu ogólnego (N_{og}) spadło z 1,49 mg/L do 1,03 mg/L (spadek o ok. 31%), a fosforu ogólnego (P_{og}) z 2,01 mg/L do 1,03 mg/L (spadek o ok. 49%), pomiędzy dwoma sezonami wegetacyjnymi. Tak znacząca redukcja biogenów w środowisku wodnym, będących głównym czynnikiem limitującym produkcję pierwotną w zbiornikach wodnych, jest kluczowym wskaźnikiem skuteczności zastosowanej metody. Konsorcja mikroorganizmów allochtonicznych, wprowadzone w procesie bioremediacji, prawdopodobnie stymulowały procesy denitryfikacji (redukcja azotanów do gazowego azotu) oraz immobilizacji fosforu w biomasę mikrobiologiczną, skutecznie wyłączając je z obiegu troficznego^{6, 7)}. Jest to szczególnie istotne

Millipore reagents, adjusted to the relevant concentration ranges. Biochemical Oxygen Demand (BOD₅) was determined using the OxiTop method.

The total number of microorganisms was determined according to the PN-EN ISO 6222:2005 standard procedure⁴⁾, by incubating samples at $36 \pm 2^\circ\text{C}$ for 44 ± 4 h and at $22 \pm 2^\circ\text{C}$ for 68 ± 4 h.

Field measurements were performed using a Hach Lange HQ 2100 multimeter equipped with probes designed for surface water studies. Before each measurement series, the device was calibrated. Dissolved oxygen content was determined both in the surface zone and near the bottom layer. The thickness of soft organic sediments (SOF), treated as an indicator of the amount of organic matter, was measured to assess the course of biogeochemical processes and oxygen conditions in the reservoir. Measurements were taken at ten carefully selected locations. Data obtained during the research were subjected to statistical analysis using R software and Microsoft Excel.

The natural inventory was carried out on July 30, 2025, and covered the area adjacent to the reservoir. Bird species were recorded, along with descriptions of aquatic macrophyte habitats in the shallow littoral zone of the reservoir and the surroundings of the reservoir.

Discussion of results

The analysis of monitoring data collected from the Morskie Oko reservoir before and after a one-year cycle of microbiological bioremediation treatments showed a significant improvement in key physicochemical and bacteriological water quality indicators. The observed positive changes are particularly important in the context of the hydromorphological characteristics of the reservoir, defined by its prolonged hydraulic retention time (HRT, estimated at 45–180 days). The stagnant nature of the water poses a challenge for natural self-purification processes, while simultaneously increasing the ecosystem's susceptibility to eutrophication and pollutant accumulation.

The most significant improvement was observed in parameters directly associated with eutrophication processes. The average concentration of total nitrogen (N_{tot}) decreased from 1.49 mg/L to 1.03 mg/L (~31% reduction), and total phosphorus (P_{tot}) from 2.01 mg/L to 1.03 mg/L (~49% reduction) between the two vegetative seasons. Such a marked reduction of nutrients in the aquatic environment – being the main limiting factors of primary production in water bodies – serves as a key indicator of the applied method's effectiveness. The introduced consortia of allochthonous microorganisms most likely stimulated denitrification (reduction of nitrates to gaseous nitrogen) and immobilization of phosphorus into microbial biomass, effectively removing them from the trophic cycle^{6, 7)}. This is particularly relevant in a stagnant reservoir where natural nutrient removal processes are limited.

w zbiorniku o stagnującym charakterze, gdzie naturalne procesy usuwania biogenów są ograniczone.

Zabiegi mikroaeracji bezpośrednio przełożyły się na znaczącą poprawę warunków tlenowych przy dnie. Średnie stężenie tlenu rozpuszczonego (DO) w hypolimnionie wzrosło z zaledwie 3,09 mg/L do 5,02 mg/L (wzrost o ok. 62%). Są to zmiany o kluczowym znaczeniu dla ekosystemu środowiska wodnego. Procesy mikroaeracji wpływają pozytywnie na wzrost stężenia O_2 w warstwie przydennej, hamując procesy anaerobowe, w tym redukcyjne uwalnianie fosforu z osadów dennych (z tzw. dennego zasilania biogenami), które jest jednym z głównych mechanizmów podtrzymujących eutrofizację nawet po ograniczeniu zewnętrznych dopływów zanieczyszczeń^{8, 9}. Wzrost stężenia tlenu rozpuszczonego sprzyja także rozwojowi aerobowych mikroorganizmów uczestniczących w rozkładzie materii organicznej oraz tworzy dogodniejsze warunki dla bentosu.

Jednym z najbardziej widocznych wyników przeprowadzonej rekultywacji jest duże zmniejszenie wskaźnika substancji organicznych w osadach dennych SOF. Wartość tego parametru spadła ze średnio 51,6 cm do zaledwie 36,1 cm, co oznacza spadek o ok. 30%. Ponieważ są to badania na początku pierwszego sezonu po rekultywacji z 2024 r., można się spodziewać dalszej znaczącej poprawy tego wskaźnika^{2, 10}.

Wskaźnik SOF jest tutaj miarą grubości warstwy osadów dennych bogatych w materię organiczną, która powstaje w wyniku sedymentacji obumarłego fitoplanktonu, szczątków organicznych z zewnątrz oraz fekaliiów. Duża wartość SOF, obserwowana przed rekultywacją, była bezpośrednią konsekwencją długiego czasu retencji i procesów eutroficznych, prowadzących do nadmiernej akumulacji osadów. Warstwa ta stanowiła olbrzymie wewnętrzne źródło biogenów, którym w warunkach beztlenowych przeciwdziałała aeracja. Zachodziło uwalnianie fosforanów z osadów do toni wodnej, podtrzymując eutrofizację. Rozkład materii organicznej przez bakterie heterotroficzne powodował wysokie deficyty tlenowe, zwłaszcza przy dnie, pogłębiając stres tlenowy ekosystemu. Osady denne są siedliskiem patogenów i rezerwuarem dla bakterii fekalnych, które mogą być uwalniane powrotnie do wody przy wzburzeniu dna^{2, 11}.

Redukcja SOF o 30% w tak krótkim czasie dowodzi skuteczności połączonego działania aeracji i bioremediacji nie tylko w toni wodnej, ale również w interstycjalnych warstwach osadów. Mikroaeracja dostarczyła tlen niezbędny do aerobowego rozkładu zgromadzonej materii organicznej przez mikroorganizmy, zapobiegając procesom gnilnym (które generują szereg toksycznych związków zatrujących środowisko wodne). Jednocześnie, allochtoniczne konsorcja bakteryjne wprowadzone w procesie bioremediacji prawdopodobnie wykazały wysoką aktywność enzymatyczną ukierunkowaną na degradację trudno rozkładalnych związków organicznych w osadach¹¹. Redukcja warstwy osadów organicznych jest kluczowa dla trwałego poprawienia stanu ekosystemu, gdyż ogranicza wewnętrzne ładunki

Microaeration treatments directly contributed to a considerable improvement of bottom oxygen conditions. The average dissolved oxygen (DO) concentration in the hypolimnion increased from only 3.09 mg/L to 5.02 mg/L (~62% increase). These changes are of crucial importance for the aquatic ecosystem. Microaeration enhances O_2 concentrations in the bottom layer, suppressing anaerobic processes, including reductive phosphorus release from bottom sediments (so-called internal loading), which is one of the primary mechanisms sustaining eutrophication even after the reduction of external pollution inputs^{8, 9}. Improved dissolved oxygen concentration also favours the development of aerobic microorganisms involved in organic matter decomposition and creates more suitable conditions for benthic organisms.

One of the most visible outcomes of the restoration was the pronounced reduction in the index of organic matter in bottom sediments SOF (soft organic fractions). The value of this parameter dropped from an average of 51.6 cm to only 36.1 cm (~30% reduction). It should be emphasized that these results were obtained at the beginning of the first post-restoration season in 2024, suggesting that further substantial reductions of sediment layers can be expected^{2, 10}.

The SOF index represents the thickness of sediment layers rich in organic matter, which accumulates through the sedimentation of dead phytoplankton, external organic debris, and faecal material. High SOF values observed before restoration were a direct consequence of long retention time and eutrophic processes, leading to excessive sediment accumulation. This layer constituted a massive internal source of pollution (nutrients) counteracted by aeration under anoxic conditions. Phosphates were released from sediments into the water column, sustaining eutrophication. Decomposition of organic matter by heterotrophic bacteria resulted in significant oxygen deficits, particularly at the bottom, exacerbating ecosystem oxygen stress. Bottom sediments serve as pathogen habitat and reservoirs for faecal bacteria, which may be resuspended into the water column during sediment disturbance^{2, 11}.

The ~30% reduction in SOF within such a short period demonstrates the effectiveness of the combined action of aeration and bioremediation, not only in the water column but also in interstitial sediment layers. Microaeration supplied oxygen essential for aerobic decomposition of accumulated organic matter by microorganisms, preventing putrefaction processes (which generate a variety of toxic compounds harmful to the aquatic environment). At the same time, the allochthonous bacterial consortia introduced during bioremediation probably exhibited high enzymatic activity directed toward the degradation of refractory organic compounds in sediments¹¹. The reduction of organic sediment layers is crucial for the long-term improvement of the ecosystem's condition, as it limits internal pollutant loads for years following external interventions.

zbiornika zanieczyszczeniami na lata po zewnętrznych zabiegach.

Wskaźniki zanieczyszczenia organicznego ChZT i BZT₅ wykazały wyraźny trend spadkowy. Średnia wartość ChZT zmniejszyła się z 8,78 mg/L do 5,36 mg/L (spadek o ok. 39%), a BZT₅ obniżyło się z 4,08 mg/L do 2,66 mg/L (spadek o ok. 35%). Zmniejszenie wartości BZT₅, będącego bezpośrednim wskaźnikiem zawartości łatwo biodegradowalnej materii organicznej, wskazuje na intensyfikację procesów samooczyszczania, wspomaganych przez wprowadzone mikroorganizmy oraz stałe dostarczanie tlenu. Potwierdza to hipotezę, że połączenie bioremediacji i aeracji stanowi skuteczną metodę ograniczania ładunku organicznego w zbiornikach miejskich⁴⁾.

Przejrzystość wody (rysunek) wykazała nieznaczny spadek: ze średnio 77,6 cm do 72,1 cm. Choć teoretycznie mniejsza przejrzystość mogłaby sugerować wzrost zawartości zawiesiny organicznej lub nieorganicznej¹²⁾, to w tym samym okresie średnie stężenie zawiesiny ogólnej (TSS) zmniejszyło się z 28,9 mg/L do 20,0 mg/L (spadek o ok. 31%). Oznacza to, że pogorszenie przejrzystości nie było związane bezpośrednio z pogorszeniem jakości wody, lecz mogło wynikać z czynników zewnętrznych, takich jak zwiększona dynamika opadów, dopływ materiału allochtonicznego czy krótkotrwałe wahania warunków meteorologicznych (np. silny wiatr powodujący resuspensję osadów dennych). Tym samym nieznaczne obniżenie przejrzystości należy traktować jako efekt uboczny naturalnych fluktuacji środowiskowych, a nie przejaw spadku skuteczności procesów samooczyszczania. Wskazuje to na potrzebę prowadzenia długoterminowego monitoringu, aby lepiej uchwycić wpływ warunków pogodowych na dynamikę parametrów jakości wody.

Bardzo istotnym zagadnieniem w kontekście rekreacyjnego wykorzystania zbiornika wodnego jest obserwowana redukcja wskaźników sanitarnych, które stanowią podstawę oceny jakości wód powierzchniowych pod kątem bezpieczeństwa zdrowotnego¹³⁾. Średnie stężenia bakterii z grupy coli (coliforms) uległy obniżeniu z 442,2 CFU/100 mL do 139,9 CFU/100 mL, co odpowiada zmniejszeniu o ok. 68%. W przypadku *Escherichia coli* spadek wyniósł z 69,1 CFU/100 mL do 61,5 CFU/100 mL (ok. 11%), a liczebność enterokoków jelitowych (*Enterococcus*) zmniejszyła się z 7,8 CFU/100 mL do 6,4 CFU/100 mL (ok. 18%).

Zaobserwowane zmiany można wiązać m.in. z poprawą warunków tlenowych w zbiorniku. Wzrost stężenia rozpuszczonego tlenu ogranicza przeżywalność wielu mikroorganizmów patogennych, preferujących środowisko beztlenowe lub związanych z osadami denno-glebowymi. Dodatkowo, wprowadzone do ekosystemu allochtoniczne konsorcja mikroorganizmów mogły wykazywać zdolność do konkurencji z drobnoustrojami chorobotwórczymi o dostępne substraty węglowe i mineralne, a także zajmować wolne nisze ekologiczne. Istotnym mechanizmem ograniczającym rozwój patogenów mogła być również

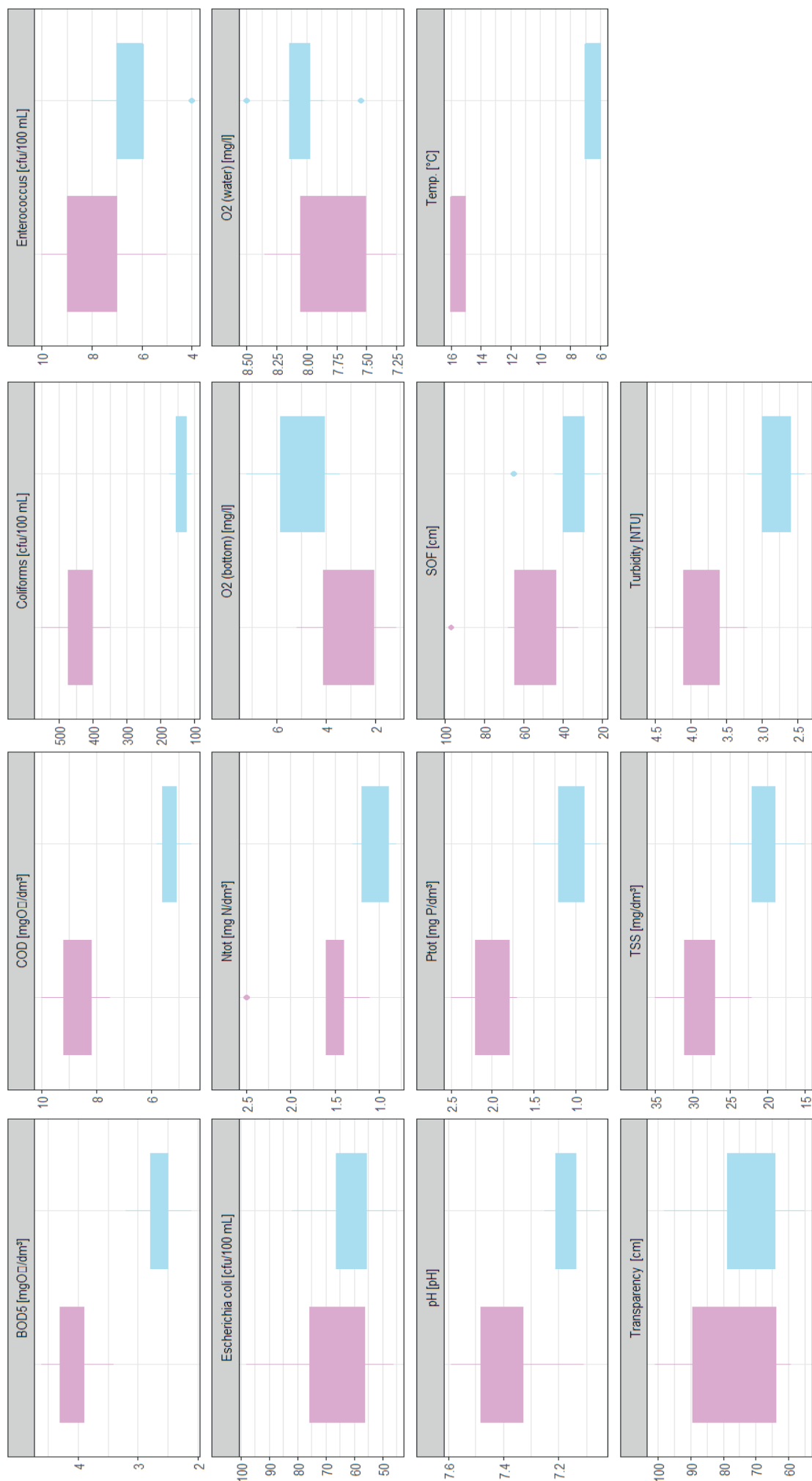
Indicators of organic pollution COD and BOD₅ showed a clear decreasing trend. The average COD value decreased from 8.78 mg O₂/L to 5.36 mg O₂/L (a decrease of approx. 39%), while BOD₅ decreased from 4.08 mg O₂/L to 2.66 mg O₂/L (a decrease of approx. 35%). The reduction in BOD₅, which is a direct indicator of the content of readily biodegradable organic matter, indicates an intensification of self-purification processes, supported by the introduced microorganisms and the constant supply of oxygen. This confirms the hypothesis that the combination of bioremediation and aeration is an effective method for reducing the organic load in urban reservoirs⁴⁾.

Water transparency (Figure) showed a slight decrease from the average of 77.6 cm to 72.1 cm. Although, theoretically, lower transparency could suggest an increase in organic or inorganic suspended matter¹²⁾, it should be noted that during the same period, the average concentration of total suspended solids (TSS) decreased from 28.9 mg/L to 20.0 mg/L (a decrease of approx. 31%). This means that the deterioration in transparency was not directly related to the deterioration in water quality but could have resulted from external factors such as increased rainfall dynamics, the inflow of allochthonous material, or short-term fluctuations in meteorological conditions (e.g., strong wind causing resuspension of bottom sediments).

Therefore, the slight decrease in transparency should be treated as a side effect of natural environmental fluctuations rather than an indication of a decline in the effectiveness of the self-purification processes. This highlights the need for long-term monitoring to better capture the impact of weather conditions on the dynamics of water quality parameters.

*A very important issue in the context of the recreational use of the water reservoir is the observed reduction in sanitary indicators, which form the basis for assessing the quality of surface waters in terms of health safety¹³⁾. The average concentrations of the coliform bacteria were reduced from 442.2 CFU/100 mL to 139.9 CFU/100 mL, corresponding to the reduction of approximately 68%. For *Escherichia coli*, the decrease was from 69.1 CFU/100 mL to 61.5 CFU/100 mL (~11%), while the abundance of intestinal enterococci (*Enterococcus*) decreased from 7.8 CFU/100 mL to 6.4 CFU/100 mL (~18%).*

The observed changes can be linked, among other factors, to the improved oxygen conditions in the reservoir. The increase in dissolved oxygen concentration limits the survivability of many pathogenic microorganisms, which prefer anaerobic environments or are associated with bottom sediments. Additionally, the allochthonous consortia of microorganisms introduced into the ecosystem may have exhibited the ability to compete with pathogenic microbes for available carbon and mineral substrates, as well as to occupy free ecological niches. An important mechanism limiting the development of pathogens could also have



5.2025 - Before reclamation
5.2025 - 1 season after

Figure. Comparison of qualitative parameters of surface water and bottom sediments in the studied reservoir Morskie Oko in Wrocław
Rysunek. Porównanie parametrów jakościowych wody powierzchniowej i osadów dennych w badanym zbiorniku Morskie Oko we Wrocławiu

produkcja metabolitów wtórnych o charakterze antagonicznym, prowadzących do zjawiska antybiozy^{13, 14}).

Zmniejszenie wskaźników mikrobiologicznych ma bezpośrednie przełożenie na wzrost bezpieczeństwa sanitarnego użytkowników rekreacyjnych zbiornika, w tym osób korzystających z kąpielisk. Wskazuje to na poprawę jakości środowiska wodnego i zwiększenie jego przydatności do celów rekreacyjnych w świetle obowiązujących norm higieniczno-sanitarnych¹⁴).

Wyniki inwentaryzacji z lipca 2025 r. wskazują na stabilną formację roślinną w strefie szuwarowej zbiornika (w obszarze poza kąpieliskiem). Brzegi zbiornika są porośnięte przez szuwar trzcinowy (*Phragmitetum australis*), który pełni kluczową funkcję ekosystemową: stabilizuje linię brzegową, stanowi habitat dla ptaków i bezkręgowców oraz działa jako naturalna strefa buforowa, filtrując spływy powierzchniowe. Obecność wierzby (*Salix* sp.) i wierzbownicy kosmatej (*Epilobium hirsutum*) w dalszej strefie od zbiornika wskazuje na wilgotne, ale ustabilizowane warunki glebowe. Towarzyszące im pospolite rośliny synantropijne: nawłóć późna (*Solidago gigantea*), krwawnik (*Achilea millefolium*), bylica (*Artemisia vulgaris*) są typowe dla terenów zurbanizowanych i nie stanowią zagrożenia dla funkcjonowania ekosystemu, świadcząc jedynie o antropopresji w bezpośrednim sąsiedztwie akwenu.

Obserwacje ptaków dostarczają wymownych dowodów na utrzymanie dobrego stanu ekologicznego. Obecność łyski (*Fulica atra*), a zwłaszcza pary łabędzi niemych (*Cygnus olor*) z licznym, 6-osobowym potomstwem ma istotne znaczenie. Sukces lęgowy tych ptaków, które są gatunkami terytorialnymi i wymagającymi czystszych wód o bogatej bazie pokarmowej (roślinność wodna, bezkręgowce), jest jednoznacznym bioindykatorem poprawy jakości środowiska. Obecność kaczek krzyżówek (*Anas platyrhynchos*) oraz wrony siwej (*Corvus cornix*) świadczy o różnorodności dostępnych nisz troficznych.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają wysoką skuteczność połączonych zabiegów bioremediacji i mikroaeracji jako metody rekultywacji miejskich zbiorników wodnych o stagnującym charakterze. Poprawa została udokumentowana na wszystkich poziomach: fizykochemicznym (obniżka zawartości biogenów, materii organicznej, poprawa warunków tlenowych), sanitarnym (redukcja wskaźników fekalnych) oraz – co niezwykle istotne – biologicznym (sukces lęgowy ptaków, stabilna roślinność). Szczególnie istotna jest głęboka redukcja warstwy osadów dennych (SOF), która stanowi o trwałości uzyskanych efektów.

Obecność awifauny, w tym osobników młodych, oraz stabilna szata roślinna potwierdzają, że wdrożone zabiegi bioremediacji i aeracji nie zakłóciły równowagi ekologicznej, a wręcz przyczyniły się do odtworzenia funkcji

been the production of antagonistic secondary metabolites, leading to the phenomenon of antibiosis^{13, 14}).

The reduction in microbiological indicators directly translates to increased sanitary safety for the recreational users of the reservoir, including those using the bathing areas. This indicates an improvement in the quality of the aquatic environment and enhances its suitability for recreational purposes considering current hygienic-sanitary standards¹⁴).

The results of the July 2025 inventory indicate a stable plant formation in the reservoir's reed zone (outside the bathing area). The reservoir's banks are overgrown with common reed (*Phragmitetum australis*), which plays a key ecosystem role: it stabilizes the shoreline, provides a habitat for birds and invertebrates, and acts as a natural buffer zone, filtering surface runoffs. The presence of willows (*Salix* sp.) and the great hairy willow herb (*Epilobium hirsutum*) further from the reservoir indicates moist but stabilized soil conditions. Accompanying common synanthropic plants: the goldenrod (*Solidago gigantea*), yarrow (*Achilea millefolium*) and mugwort (*Artemisia vulgaris*) are typical for urbanized areas and do not pose a threat to the ecosystem's functioning; they merely prove the existence of anthropopressure in the immediate vicinity of the water body.

Bird observations provide compelling evidence for the maintenance of a good ecological state. The presence of the Eurasian coot (*Fulica atra*), and especially a pair of mute swans (*Cygnus olor*) with numerous offspring (6 juveniles), is highly significant. The breeding success of these birds, which are territorial species requiring cleaner waters with a rich food base (aquatic vegetation, invertebrates), is a clear bioindicator of improved environmental quality. The presence of mallards (*Anas platyrhynchos*) and the hooded crow (*Corvus cornix*) demonstrates the diversity of available trophic niches.

Conclusions

The obtained results clearly indicate high efficiency of the combined measures of bioremediation and microaeration as the methods of the reclamation of urban stagnant water bodies. The improvement was documented at all the levels: physicochemical (reduction of biogens, organic matter, improvement of oxygen conditions), sanitary (reduction of faecal indicators) and – the most important – biological (breeding success of birds, stable vegetation). Intensive reduction of the layer of bottom sediments (SOF), is particularly significant, proving the durability of the obtained results.

The presence of avifauna, including breeding species and stable vegetation cover confirm that the implemented measures of bioremediation and aeration did not disturb environmental balance, and even contributed to the restoration of biological function of the water body, making attractive habitat for wetland species.

biologicznych zbiornika, tworząc atrakcyjne siedlisko dla gatunków wodno-błotnych.

Dalszy monitoring, uwzględniający wyniki z kolejnych sezonów, będzie kluczowy dla oceny trwałości uzyskanych efektów. Prezentowane podejście zarządcze, ukierunkowane na likwidację zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych źródeł zanieczyszczeń, może stanowić wzorcowe rozwiązanie dla podobnych akwenów w miastach.

Further monitoring, regarding the results from the subsequent seasons, will be crucial for the assessment of the durability of the obtained results. The presented approach to the liquidation of both external and internal sources of pollution can make a model solution for similar water bodies in urban areas.

Received/Otrzymano:

29-09-2025

Accepted/Zaaceptowano:

21-10-2025

Reviewed/Zrecenzowano:

29-09-2025

Published/Opublikowano:

18-11-2025

REFERENCES/LITERATURA

- [1] A. Piasecki, R. Skowron, *Limnol. Rev.* 2015, **15**, No. 4, 171.
- [2] J. Mazurkiewicz, A. Mazur, R. Mazur, K. Chmielowski, W. Czekąta, D. Janczak, *Water* 2020, **11**, No. 12, 3002.
- [3] R. Mazur, A. Mazur, Z. Kowalewski, P. Karwowski, *Przem. Chem.* 2024, **103**, No. 9, 1018.
- [4] A. Mazur, K. Chmielowski, *Acta Sci. Pol. Form. Circumiectionis* 2020, **19**, 15.
- [5] PN-EN ISO 6222:200, *Jakość wody. Oznaczanie ilościowe mikroorganizmów zdolnych do wzrostu. Określanie ogólnej liczby kolonii metodą posiewu na agarze odżywczym*.
- [6] L. Wang, Y. Yang, J. Li, Proc. 21st International Conference on Geoinformatics, Kaifeng, China, 20–22 June 2013, IEEE, p. 1.
- [7] L. Wang, J. Li, W.L. Kang, *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.* 2007, **78**, No. 6, 527.
- [8] H. Li, H.P. Zhao, H.L. Hao, J. Liang, F.L. Zhao, L.C. Xiang, P.J. Stoffella, *Environ. Eng. Sci.* 2011, **28**, No. 8, 543.
- [9] K. Pettersson, *Hydrobiologia* 1998, **373.0**, 21.
- [10] R. Mazur, Z. Kowalewski, A. Wagner, A. Włodyka-Bergier, *Przem. Chem.* 2022, **101**, No. 9, 684.
- [11] R. Mazur, A. Mazur, Z. Kowalewski, *Przem. Chem.* 2024, **103**, No. 9, 1011.
- [12] V. Çako, E. Zhuri, F. Babani, T. Karaja, *IOSR J. Eng.* 2014, **4**, 15.
- [13] M.N.I. Abou-Seada, S. Al-Assal, S.M. Abdalla, *African J. Microbiol. Res.* 2011, **5**, No. 18, 2600.
- [14] D. Garrido-Sanz, P. Sansegundo-Lobato, M. Martin, M. Redondo-Nieto, R. Rivilla, [in:] *Good Microbes in Medicine, Food Production, Biotechnology, Bioremediation, and Agriculture*, Wiley, 2022, 372.

Od 75 lat
poszerzamy
Twoje
horyzonty



WYDAWNICTWO
SIGMA-NOT 