

Bioremediation of Zamkowe Lake at Gostynin. Analysis of process effectiveness and reduction of eutrophication phenomena

Bioremediacja Jeziora Zamkowego w Gostyninie. Analiza efektywności procesu i ograniczenia zjawisk eutrofizacji



DOI: 10.15199/62.2025.11.XX

Analiza dwuletniej bioremediacji mikrobiologicznej Jeziora Zamkowego w Gostyninie (lipiec 2023–lipiec 2025) wykazała jej dużą skuteczność. Przed interwencją jezioro borykało się z zakwitami glonów, dużą miąższością osadów dennych i gnilnym odorem. Badanie miało ocenić wpływ zastosowanych preparatów biologicznych na parametry wody i osady dennie. Wyniki pokazały znaczącą poprawę stanu ekologicznego. Grubość osadów dennych zmniejszyła się średnio o 60,33% (cel wynosił 30%). Przejrzystość wody wzrosła o 82,7%. Stężenie tlenu w strefie przydennej wzrosło o 3918%, a w powierzchniowej o 17,80%. Gnilne odory i zakwity glonów praktycznie zanikły. Proces bioremediacji przywrócił równowagę ekosystemową, co potwierdza efektywność mikrobiologicznych metod rekultywacji zdegradowanych zbiorników.

Słowa kluczowe: bioremediacja, eutrofizacja, Jezioro Zamkowe w Gostyninie

A two-year analysis of the microbiological bioremediation of Lake Zamkowe in Gostynin (07.2023–07.2025) confirmed its high effectiveness. Before the intervention, the lake suffered from algal blooms and putrid odors. The study aimed to assess the impact of biological preparations on water parameters and bottom sediments. The results showed a significant improvement in the ecological state. The thickness of bottom sediments decreased by an average of 60.33% (the goal was 30%). Water clarity increased by 82.7%. The oxygen concentration in the bottom layer rose by 3918%, and in the surface layer by 17.80%. Putrid odors and algal blooms virtually disappeared. The bioremediation process restored the ecosystem's balance, confirming the effectiveness of microbiological methods for reclaiming degraded water bodies.

Keywords: bioremediation, eutrophication, Lake Zamkowe in Gostynin

Stawy i jeziora zlokalizowane w miastach, ze względu na dużą presję ze strony ich zlewni, są szczególnie podatne na proces eutrofizacji. Jezioro Zamkowe w Gostyninie stanowi doskonały przykład takiego ekosystemu, będąc jednocześnie ważnym elementem dziedzictwa kulturowego i środowiskowym wyzwaniem. Zbiornik retencyjny, który powstał w XIV w. jako część systemu obronnego książąt mazowieckich, jest obecnie centralnym punktem Gostynińsko-Gąbińskiego Parku Krajobrazowego. Mimo swojej historycznej wartości i funkcji rekreacyjnej, jezioro

Ponds and lakes located within urban areas, due to the strong pressure exerted by their catchments, are particularly susceptible to the process of eutrophication. Castle Lake in Gostynin provides an excellent example of such an ecosystem, representing both an important element of cultural heritage and an environmental challenge. This retention reservoir, created in the 14th century as part of the defensive system of the Mazovian dukes, now constitutes the central feature of the Gostynin-Gąbin Landscape Park. Despite its historical value and recreational function, the



Dr. Klaudiusz GRÜBEL^{*}, DSc, Eng., is a professor at the Faculty of Materials, Civil and Environmental Engineering, University of Bielsko-Biala. His research interests include wastewater treatment methods, intensified sewage sludge fermentation, and environmental bioremediation.

Dr hab. inż. Klaudiusz GRÜBEL^{*} (ORCID: 0000-0002-0787-9324) jest profesorem na Wydziale Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Jego zainteresowania naukowe obejmują sposoby oczyszczania ścieków, intensyfikacji fermentacji osadów ściekowych oraz bioremediacji środowiska.



Dr. Robert MAZUR (ORCID: 0000-0001-7869-1823) is an assistant professor at the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering at AGH University of Science and Technology in 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.

*** Address for correspondence/ Adres do korespondencji:**

Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska, Uniwersytet Bielsko-Bialski, ul. Willowa 2, bud. C, 43-309 Bielsko-Biała, tel.: (33) 82979-425; e-mail: wimbis@ubb.edu.pl

cierpi na zaawansowaną eutrofizację, co skłania do poszukiwania innowacyjnych i zrównoważonych metod rekultywacji, takich jak bioremediacja mikrobiologiczna. Jezioro Zamkowe to również płytki, polimiktyczny, przepływowy zbiornik, zasilany przez rzekę Skrwę Lewą. Kluczowe parametry morfometryczne i hydrologiczne, które są istotne dla zrozumienia funkcjonowania ekosystemu i planowania działań rekultywacyjnych, przedstawiono w tabeli.

Status środowiskowy jeziora był bezpośrednią konsekwencją jego położenia w mieście i polimiktycznego charakteru. Głównym wyzwaniem środowiskowym było łagodzenie zaawansowanej eutrofizacji zbiornika. Jezioro jest narażone na znaczne dopływy azotu i fosforu ze zlewni miejskiej (spływy powierzchniowe z ulic, nawozy z terenów zielonych). Przez lata prowadziło to do intensywnych zakwitów sinic i glonów, znacznych deficytów tlenu w warstwie przydennej oraz bardzo niskiej przezroczystości wody. Kolejnym problemem była szybko postępująca sukcesja ekologiczna. Ten proces, typowy dla płytkich i żyznych zbiorników, objawiał się przyspieszoną sedymentacją, gromadzeniem się bogatych w materię organiczną osadów dennych oraz ekspansją szuwarów, co stopniowo prowadziło do transformacji w ekosystem bagienny. Dodatkowo, na Jezioro Zamkowe oddziaływała presja hydromorfologiczna, która negatywnie wpływała na jakość wód rzeki Skrwy Lewej w jej dalszym biegu¹⁾.

Mimo przeprowadzonych prac rewitalizacyjnych, które obejmowały pogłębienie i odtworzenie linii brzegowej, problem przeciążenia biogenami i wewnętrznego obiegu składników pokarmowych z osadów dennych w dużej mierze pozostał nierozwiązany. Zrównoważone zarządzanie powinno zatem koncentrować się na metodach oddziałujących zarówno na zewnętrzne, jak i wewnętrzne źródła zanieczyszczeń. Jako główną metodę rekultywacji Jeziora Zamkowego w Gostyninie zaplanowano metodę opartą na bioremediacji mikrobiologicznej z zastosowaniem wyspecjalizowanych biopreparatów alochtonicznych. Decyzja ta podyktowana była koniecznością wdrożenia rozwiązania efektywnego w zwalczaniu uciążliwych zakwitów sinicowych, a jednocześnie bezpiecznego dla ekosystemu i dostosowanego do specyficznych warunków morfometrycznych zbiornika. Wybrana metoda znajdowała silne uzasadnienie w charakterystyce akwenu – jego płytkowodności i polimiktyczności, które sprzyjają efektywnemu wymieszaniu i dystrybucji preparatów oraz bezpośredniemu oddziały-

lake suffers from advanced eutrophication, which calls for the exploration of innovative and sustainable restoration methods, such as microbial bioremediation. Castle Lake is also a shallow, polymictic, through-flow reservoir, fed by the Skrwá Lewá River. Key morphometric and hydrological parameters relevant to understanding the functioning of the ecosystem and to planning restoration measures are presented in Table.

The environmental status of the lake was a direct consequence of its urban location and polymictic character. The primary environmental challenge was the mitigation of advanced eutrophication. The lake is exposed to substantial nitrogen and phosphorus inputs from the urban catchment (surface runoff from streets, fertilizers from green areas). Over the years, this has resulted in intensive cyanobacterial and algal blooms, significant oxygen deficits in the bottom layer, and very low water transparency. Another issue was the rapidly progressing ecological succession. This process, typical of shallow and nutrient-rich reservoirs, manifested itself through accelerated sedimentation, accumulation of organic-rich bottom deposits, and the expansion of emergent vegetation, gradually transforming the system into a wetland ecosystem. In addition, Castle Lake was subject to hydromorphological pressures, which negatively affected the water quality of the Skrwá Lewá River downstream¹⁾.

Despite the revitalization efforts, which included dredging and shoreline reconstruction, the problem of nutrient overload and internal nutrient cycling from bottom sediments largely remained unresolved. Sustainable management should therefore focus on methods targeting both external and internal sources of pollution. As the main restoration approach for Castle Lake in Gostynin, microbial bioremediation with the application of specialized allochthonous biopreparations was selected. This decision was driven by the necessity to implement a solution effective in controlling nuisance cyanobacterial blooms, while at the same time safe for the ecosystem and suited to the specific morphometric conditions of the reservoir. The chosen method was strongly justified by the characteristics of the water body – its shallowness and polymictic nature, which favor efficient mixing and distribution of the preparations as well as direct action of the introduced microorganisms in the sediment zone, the primary source of internal nutrient load²⁾. The bacterial strains introduced were selected for



Dr. Ewa GŁOWIENKA, DSc, Eng. (ORCID: 0000-0001-7326-1592) is an assistant professor at the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering, AGH University of Science and Technology, Krakow. Her research interests include telemetric qualitative analyses of watershed areas and data analysis. Dr inż. Ewa GŁOWIENKA (ORCID: 0000-0001-7326-1592) jest adiunktem na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Jej zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z procesem telemetrycznych analiz jakościowych obszaru zlewniowych i analizą danych.



Przemysław KARWOWSKI, M.Sc., is the President of the Management Board of ACS Poland Holding Sp. z o.o. His interests include biological methods in the reclamation of water bodies, and the restoration and management of degraded water bodies. Mgr Przemysław KARWOWSKI jest prezesem Zarządu ACS Poland Holding sp. z o.o. Jego zainteresowania obejmują biologiczne metody w rekultywacji zbiorników wodnych, odnowa i zarządzanie zdegradowanymi akwenami.

waniu introdukowanych mikroorganizmów na strefę osadów dennych, stanowiących główne źródło wewnętrznego ładunku biogenów²⁾. Wprowadzane szczepy bakteryjne, dobrane pod kątem zdolności do konkurencji troficznej z fitoplanktonem oraz intensywnej degradacji związków organicznych i sorpcji fosforu, pozwalają oddziaływać bezpośrednio na przyczyny eutrofizacji, a nie jedynie na jej objawy. Wszystkie zastosowane w procesie bioremediacji preparaty zostały przebadane naukowo w zakresie bezpieczeństwa dla ichtiofauny. Dodatkowo preparaty miały wykonane badania na bezpieczeństwo dla ikry i wylęgu, posiadają również badania dermatologiczne.

Główne zalety przyjętej strategii to jej wysoka efektywność w redukcji wewnętrznego ładunku substancji biogennych, selektywność oraz minimalna inwazyjność w stosunku do pozostałych elementów struktury troficznej jeziora, a także brak negatywnych skutków ubocznych dla organizmów hydrobiontów i zdrowia publicznego. W artykule opisano wyniki efektywności zastosowanej metody w rekultywowanym Jeziorze Zamkowym w Gostyninie, w okresie do 2 lat po procesie bioremediacji mikrobiologicznej.

Część doświadczalna

Materiały

Do analizy jakościowej wykorzystano próbki wody i miękkiej frakcji organicznej osadów dennych (SOF), które zostały pobrane ze zbiorników w trakcie dwóch odrębnych kampanii badawczych. Badania laboratoryjne próbek przeprowadzono w celu oceny ich jakości.

Aparatura

Do pomiarów użyto specjalistycznej aparatury. Wskaźniki chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT) oraz biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BZT₅) oznaczano za pomocą spektrofotometrii UV-Vis i przy użyciu systemu Sensomat firmy Lovibond. Analiza stężenia biogenów została przeprowadzona przy użyciu spektrofotometrów UV-Vis, zgodnie z odpowiednimi, przyjętymi metodami. Przejrzystość wody określono, używając krążka Secchiego. Grubość warstwy osadów dennych mierzono, łącząc użycie kamery podwodnej z geodezyjną łatą pomiarową. Kluczowe parametry fizykochemiczne, takie jak pH, temperatura, stężenie tlenu rozpuszczonego (DO), rejestrowano za pomocą multimetru Hach Lange HQ 2100 wyposażonego w odpowiednie sondy.

Metodyka badań

Proces mikrobiologicznej remediacji Jeziora Zamkowego rozpoczęto od przeprowadzenia wstępnego, jakościowego monitoringu wody we wszystkich zbiornikach. W maju 2023 r. odbyły się badania terenowe, podczas których zmierzono grubość osadów dennych, przejrzystość wody oraz stężenie tlenu rozpuszczonego, zarówno w war-

their ability to compete trophically with phytoplankton, intensively degrade organic matter, and adsorb phosphorus, thus targeting the root causes of eutrophication rather than merely its symptoms. All preparations used in the bioremediation process have been scientifically tested for safety for ichthyofauna. Additionally, the preparations have undergone safety tests for fish eggs and fry and also have dermatological tests.

The main advantages of the adopted strategy include its high effectiveness in reducing the internal load of biogenic substances, selectivity, and minimal invasiveness with respect to other components of the lake's trophic structure, as well as the absence of adverse side effects for aquatic organisms and public health. This article presents the results of the effectiveness of the applied method in the restored Castle Lake in Gostynin, assessed within two years following the microbial bioremediation process.

Experimental

Materials

For qualitative analysis, water samples and the soft organic fraction of bottom sediments (SOF) were collected from the reservoirs during two separate research campaigns. Laboratory analyses of the samples were performed to assess their quality.

Apparatus

Specialized analytical equipment was used for the measurements. Chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD₅) were determined using UV-Vis spectrophotometry and the Sensomat system (Lovibond). The concentrations of nutrients were analyzed with UV-Vis spectrophotometers according to relevant standardized methods. Water transparency was measured using a Secchi disk. The thickness of the sediment layer was determined by combining an underwater camera with a geodetic measuring rod. Key physicochemical parameters such as pH, temperature, and dissolved oxygen (DO) concentration were measured with a Hach Lange HQ 2100 multimeter equipped with appropriate probes.

Methods

The process of microbial remediation of Castle Lake began with a preliminary qualitative monitoring of water in all reservoirs. Field studies were carried out in May 2023, during which the thickness of bottom sediments, water transparency, and dissolved oxygen concentrations were measured both in the surface and near-bottom layers. In addition, to further evaluate the condition and quality of the reservoirs, laboratory analyses of collected water and sediment samples were performed.

The concentrations of total phosphorus ($P_{tot.}$) and total nitrogen ($N_{tot.}$) were determined using a Spectroquant® NOVA spectrophotometer with Merck Millipore reagents,

stwach powierzchniowych, jak i w dolnych partiach wody. Dodatkowo, w celu dalszej oceny stanu i jakości zbiorników, przeprowadzono analizy laboratoryjne pobranych próbek wody i osadów.

Zawartość fosforu całkowitego (P_{og}) oraz azotu całkowitego (N_{og}) oznaczono z wykorzystaniem spektrofotometru Spectroquant® NOVA, stosując odczynniki firmy Merck Millipore, w odpowiednich zakresach stężeń. Chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) analizowano również za pomocą spektrofotometru Spectroquant NOVA 60 A, zgodnie z wewnętrzną metodą analityczną producenta dla odczynników Merck Millipore, w zakresie 4,0–40,0 mg/L. Z kolei biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT_5) oznaczono metodą OxiTop.

Ogólną liczbę mikroorganizmów wyznaczono zgodnie z normą³⁾, 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 terenowe przeprowadzono za pomocą multimetru Hach Lange HQ 2100, wyposażonego w sondy do analizy wód powierzchniowych. Przyrząd kalibrowano przed każdą sesją pomiarową. Stężenie tlenu rozpuszczonego oznaczano w warstwach powierzchniowych oraz przydennych wody. Grubość SOF w osadach, stanowiącej wskaźnik ilości materii organicznej, mierzono w celu oceny procesów biogeochemicznych i warunków tlenowych w zbiornikach. Badania terenowe prowadzono w 10 wybranych punktach pomiarowych.

Wyniki badań poddano analizie statystycznej, którą przeprowadzono w środowisku R (R Core Team, 2023) oraz w programie Microsoft Excel.

Dyskusja wyników

Przedstawione wyniki jednoznacznie potwierdzają, że zastosowana metoda mikrobiologicznej bioremediacji wykazała wysoką i szybką skuteczność w rekultywacji silnie zeutrofizowanego, polimiktycznego Jeziora Zamkowego. Zaobserwowane zmiany mają charakter kaskadowy, obejmując wszystkie kluczowe elementy ekosystemu, począwszy od osadów dennych, przez właściwości fizykochemiczne wody, po ogólną poprawę stanu sanitarnego.

Prowadzone działania skutkowały intensywną redukcją wewnętrznego ładunku zanieczyszczeń nagromadzonych w osadach dennych. Zaobserwowano średni spadek grubości SOF o 41% po pierwszym sezonie wegetacyjnym, a następnie o kolejne 34% w drugim. Wyniki te świadczą o bardzo efektywnym rozkładzie zgromadzonej materii organicznej przez mikroorganizmy tlenowe. Proces ten ma kluczowe znaczenie dla trwałej poprawy stanu jeziora, gdyż osady dennie stanowią główne wewnętrzne źródło biogenów, które podtrzymują eutrofię^{4, 5)}. Tak znaczące zmniejszenie miąższości SOF bez konieczności mechanicznego odmulania zbiornika stanowi jeden z głównych sukcesów zastosowanej technologii.

Bezpośrednim skutkiem obniżenia ilości materii organicznej w osadach oraz ograniczenia zakwitów fitoplank-

within the appropriate concentration ranges. Chemical oxygen demand (COD) was also analyzed with a Spectroquant NOVA 60 A spectrophotometer, according to the manufacturer's internal analytical procedure for Merck Millipore reagents, in the range of 4.0–40.0 mg/L. Biochemical oxygen demand (BOD_5) was determined using the OxiTop method.

The total number of microorganisms was determined according to the relevant standard³⁾, by incubating the 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 for surface water analysis. The instrument was calibrated prior to each measurement session. Dissolved oxygen concentration was determined in both surface and near-bottom water layers. The thickness of the soft organic fraction (SOF) in sediments, representing an indicator of organic matter content, was measured to assess biogeochemical processes and oxygen conditions in the reservoirs. Field studies were carried out at 10 selected measurement sites. The research results were subjected to statistical analysis, which was performed using the R environment (R Core Team, 2023) and Microsoft Excel.

Discussion of results

The results clearly confirm that the applied method of microbial bioremediation demonstrated high and rapid effectiveness in the restoration of the strongly eutrophicated, polymictic Castle Lake. The observed changes were of a cascading nature, involving all key components of the ecosystem – from bottom sediments, through the physico-chemical properties of water, to the overall improvement of sanitary conditions.

The undertaken measures resulted in an intensive reduction of the internal pollution load accumulated in bottom sediments. A mean decrease of 41% in the thickness of the soft organic fraction (SOF) of sediments was observed after the first vegetation season, followed by an additional 34% reduction in the second year. These results indicate a very effective degradation of accumulated organic matter by aerobic microorganisms. This process is of key importance for the long-term improvement of the lake, as bottom sediments constitute the main internal source of nutrients sustaining eutrophication^{4, 5)}. Such a significant reduction in SOF thickness without the need for mechanical dredging of the reservoir represents one of the main successes of the applied technology.

A direct consequence of the reduction of organic matter in sediments and the limitation of phytoplankton blooms was a drastic improvement in water transparency, measured with a Secchi disk. The increase in transparency by 138% in the first year and a further 131% in the second represents an exceptional result, indicating a significant improvement in water quality and the disappearance of organic suspensions (i.e., phytoplankton). A similarly

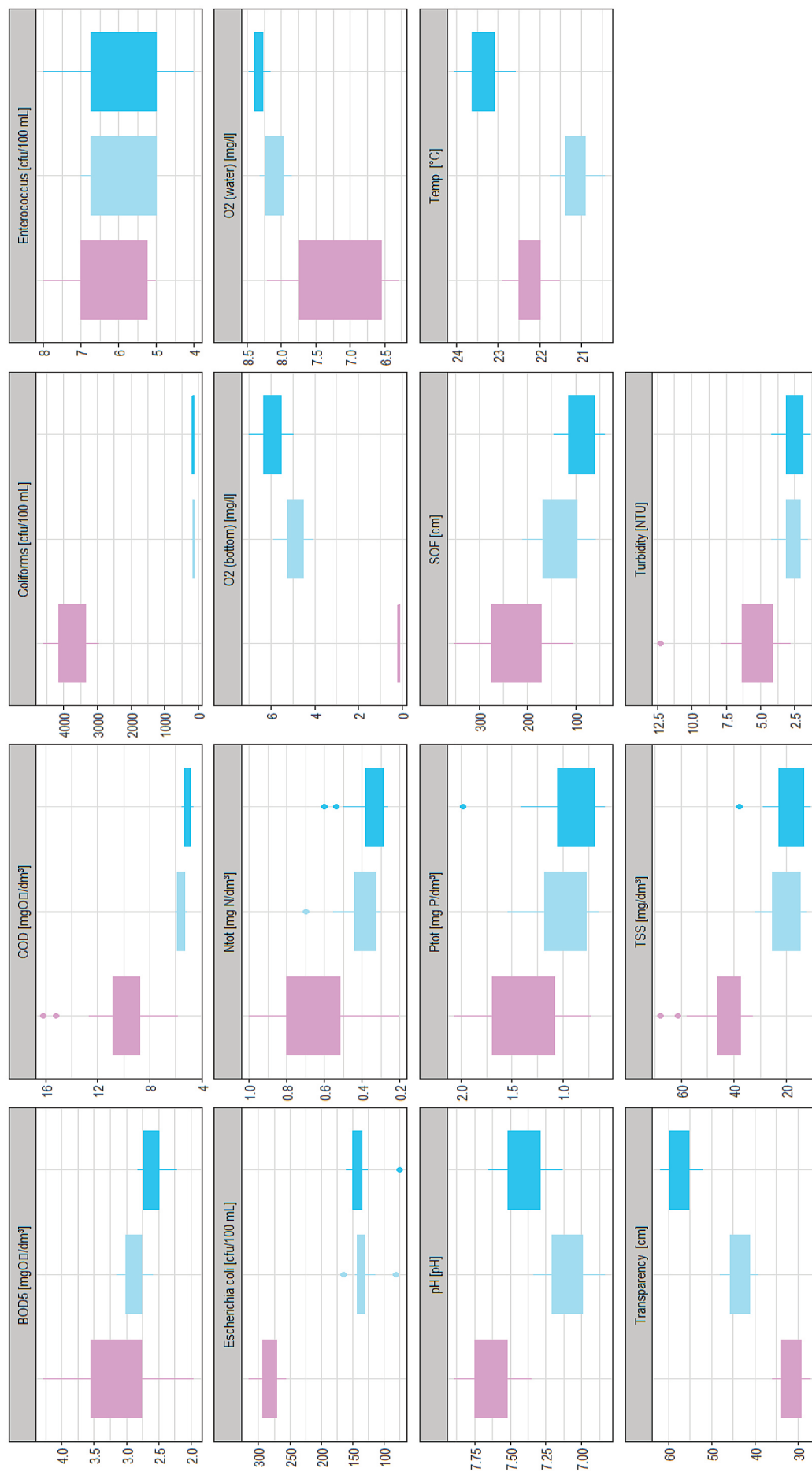


Figure. Changes in selected qualitative parameters of water and bottom sediments in Castle Lake (within two years after the microbial bioremediation process)
 Rysunek. Wykresy zmian badanych parametrów jakościowych wody i osadów dennych w Jeziorze Zamkowym (w 2-letnim okresie po procesie bioremediacji mikrobiologicznej)

tonu była drastyczna poprawa przezroczystości wody, mierzonej krążkiem Secchiego. Wzrost przejrzystości o 138% w pierwszym roku i o dalsze 131% w drugim jest wartością wyjątkową, świadczącą o znaczącej poprawie jakości wody i zaniku zawiesin organicznych (tj. fitoplanktonu). Podobną, silną redukcję odnotowano dla mętności (spadek o 52,7%, a następnie o 4%) oraz stężenia zawiesiny ogólnej TSS (spadek o 54% i o 7%). Tak wyraźna poprawa parametrów optycznych wody jest typową i pożądaną odpowiedzią ekosystemu na skuteczne działania rekultywacyjne, prowadzące do odciążenia zbiornika od nadmiaru substancji organicznych i nieorganicznych⁶⁾. Wzrost przejrzystości wody odpowiada analogicznym redukcjom TSS oraz zawiesin trudno opadalnych (w tym fitoplanktonu).

Przełomowy efekt bioremediacji, polegający na przywróceniu równowagi tlenowej w jeziorze, jest bezpośrednio związany z przerwaniem szkodliwego cyklu eutrofizacji. Zanim jednak rekultywacja przyniosła rezultaty, jezioro znajdowało się w stanie typowym dla zbiorników z silnym obciążeniem biogenami. Kluczowym mechanizmem napędzającym jego degradację była sedymentacja osadów organicznych. W eutroficznym ekosystemie, charakteryzującym się nadmierną produkcją biomasy, ogromne ilości fitoplanktonu i innych szczątków organicznych obumierają i opadają na dno jeziora. Sedymentacja dostarcza węgla organicznego dla mikroorganizmów prowadzących procesy rozkładu biologicznego. W warunkach gdy ilość opadającej materii przekracza możliwości ekosystemu w zakresie jej tlenowego rozkładu, w głębszych warstwach wody, czyli w hypolimnionie, dochodzi do gwałtownego zużycia tlenu. Po przeprowadzeniu procesów bioremediacji mikrobiologicznej w Jeziorze Zamkowym odnotowano spektakularną transformację warunków tlenowych, szczególnie w strefie hypolimnionu. Przed rekultywacją jezioro charakteryzowało się stanem anoksji przydennej, typowym dla zbiorników hipertroficznych⁷⁾. Wzrost stężenia tlenu rozpuszczonego przy dnie o 3384% po pierwszym sezonie i o dalsze 121% po drugim oznacza praktycznie całkowite wyeliminowanie warunków beztlenowych. Jest to efekt bezpośredni redukcji SOF, której rozkład tlenowy zastąpił dominującą wcześniej anaerobiozę. Równoczesny, znaczący wzrost stężenia tlenu w toni wodnej (o 113% i 102%) potwierdza przywrócenie równowagi tlenowej w całym ekosystemie. Przywrócenie tlenowych warunków przy dnie ma kluczowe znaczenie dla immobilizacji fosforu w osadach, co skutkuje ograniczeniem jego wewnętrznego uwalniania i potwierdza zaobserwowane zmniejszenie stężenia fosforu całkowitego ($P_{og.}$)⁸⁾.

W kontekście trofii zbiornika, istotne są średnie spadki stężeń azotu całkowitego ($N_{og.}$) o 38% i 11% oraz fosforu całkowitego ($P_{og.}$) o 28% i 7% w kolejnych sezonach. Obserwowane spadki stężenia są prawdopodobnie wynikiem działania dwóch mechanizmów zachodzących równoległe: ograniczenia wewnętrznego uwalniania biogenów z osadów dennych, wynikającego z utleniającego działania

strong reduction was recorded for turbidity (a decrease of 52.7% followed by 4%) and for total suspended solids (TSS) concentrations (a decrease of 54% and 7%). Such a pronounced improvement in the optical parameters of water is a typical and desirable ecosystem response to effective restoration measures, which reduce the load of excess organic and inorganic substances⁶⁾. The increase in water transparency corresponded with analogous reductions in TSS and slowly-settling suspensions, including phytoplankton.

The breakthrough effect of bioremediation, consisting in the restoration of oxygen balance in the lake, was directly related to the interruption of the harmful eutrophication cycle. Prior to restoration, the lake was in a state typical of water bodies under heavy nutrient load. The key mechanism driving its degradation was the sedimentation of organic matter (SOF). In a eutrophic ecosystem characterized by excessive biomass production, large amounts of phytoplankton and other organic debris die and sink to the lake bottom. Sedimentation provides organic carbon for microorganisms involved in biological decomposition. When the amount of settled matter exceeds the ecosystem's capacity for aerobic decomposition, oxygen is rapidly consumed in the deeper water layers (hypolimnion).

Following the microbial bioremediation process in Castle Lake, a spectacular transformation of oxygen conditions was observed, particularly in the hypolimnion. Before restoration, the lake exhibited bottom anoxia, typical of hypertrophic reservoirs⁷⁾. The increase in dissolved oxygen concentrations near the bottom by 3384% in the first season and an additional 121% in the second indicated the almost complete elimination of anoxic conditions. This was a direct effect of SOF reduction, where aerobic decomposition replaced the previously dominant anaerobic processes. At the same time, a significant increase in dissolved oxygen concentrations in the water column (by 113% and 102%) confirmed the restoration of oxygen balance throughout the ecosystem. The recovery of aerobic conditions near the bottom is of key importance for phosphorus immobilization in sediments, which limits its internal release and explains the observed reduction in total phosphorus ($P_{tot.}$) concentrations⁸⁾.

With regard to the trophic status of the reservoir, mean decreases in total nitrogen ($N_{tot.}$) concentrations of 38% and 11%, and in total phosphorus ($P_{tot.}$) concentrations of 28% and 7%, were recorded in successive seasons. The observed reductions are most likely the result of two parallel mechanisms: the limitation of internal nutrient release from sediments due to the oxidative effect of the biopreparation, and the immobilization of elements in the biomass of the introduced microorganisms, competing with phytoplankton for nutrients⁹⁾. Similarly, the reduction of organic pollution indicators (COD by 44% and 9% and BOD₅ by 7% and 10%) directly confirmed the intensive mineralization and assimilation of dissolved and particulate organic matter by the bacterial consortium¹⁰⁾. The smaller scale of BOD₅

biopreparatu, oraz immobilizacji pierwiastków w biomasie introdukowanych mikroorganizmów, konkurujących o składniki odżywcze z fitoplanktonem⁹⁾. Podobnie, zmniejszenie wartości wskaźników organicznego zanieczyszczenia wody – ChZT o 44% i 9% oraz BZT₅ o 7% i 10% – bezpośrednio dowodzi intensywnej mineralizacji i asymilacji rozpuszczonej i cząsteczkowej materii organicznej przez konsorcjum bakteryjne¹⁰⁾. Mniejsza skala redukcji BZT₅ w porównaniu z ChZT może sugerować, że wprowadzone mikroorganizmy preferencyjnie wykorzystywały bardziej odporne frakcje węgla organicznego.

Poprawa stanu sanitarnego jeziora, potwierdzona spadkiem liczebności bakterii z grupy coli oraz *Escherichia coli*, stanowi istotny, choć często pomijany, aspekt efektywności zastosowanej bioremediacji. Redukcja tych organizmów wskaźnikowych, powszechnie uznawanych za markery zanieczyszczenia fekalnego, nie była wynikiem jedynie zmniejszenia zewnętrznego dopływu zanieczyszczeń, lecz przede wszystkim efektem synergistycznego działania dwóch kluczowych mechanizmów biologicznych i fizykochemicznych, zainicjowanych procesem rekultywacji.

Pierwszym z mechanizmów jest konkurencja o zasoby węgla organicznego. Wprowadzenie do ekosystemu jeziora wyspecjalizowanych szczepów mikroorganizmów, będących kluczowym elementem bioremediacji, doprowadziło do przejścia nisz ekologicznych dotychczas zajmowanych przez rodzime, często patogenne, populacje bakteryjne. Te nowo wprowadzone mikroorganizmy charakteryzowały się wysoką efektywnością metaboliczną w utylizacji substancji organicznych. Ich dynamiczny wzrost i ekspansja doprowadziły do znacznego ograniczenia dostępności składników odżywczych (m.in. węgla, azotu i fosforu), niezbędnych do przeżycia i namnażania się bakterii z grupy coli. Efekt ten, działający na zasadzie wyparcia konkurencyjnego, przyczynił się do spadku ich liczebności.

Drugim, równie istotnym czynnikiem, była transformacja warunków środowiskowych. Przed rekultywacją jezioro, ze względu na intensywną sedymentację materii organicznej, charakteryzowało się warunkami anoksji w strefie przydennej. Takie środowisko beztlenowe jest preferowane przez wiele gatunków bakterii, w tym fakultatywnych beztlenowców jak *Escherichia coli*. Przywrócenie warunków tlenowych w całej toni wodnej oraz w strefie hypolimnionu, co zostało udokumentowane znaczącym wzrostem stężenia tlenu, stworzyło środowisko biotopowe wybitnie niekorzystne dla tych organizmów. Tlenowe środowisko sprzyja rozwojowi bakterii aerobowych, które w sposób ciągły konkurują i wypierają bakterie wskaźnikowe, przyczyniając się do ich szybszej eliminacji z ekosystemu wodnego¹¹⁾.

Odnotowany spadek liczby bakterii z grupy coli i *E. coli* jest silnym dowodem na to, że bioremediacja, poprzez indukowanie biologicznej konkurencji oraz fundamentalną zmianę warunków fizykochemicznych z beztlenowych na tlenowe, nie tylko poprawiła jakość chemiczną wody, ale również znacząco podniosła jej bezpieczeństwo sanitarne. Fakt ten ma kluczowe

reduction compared with COD might suggest that the introduced microorganisms preferentially utilized more refractory fractions of organic carbon.

The improvement in the sanitary status of the lake, confirmed by a reduction in the abundance of coliform bacteria and *Escherichia coli*, represents an important, though often overlooked, aspect of bioremediation effectiveness. The decrease in these indicator organisms, commonly recognized as markers of fecal contamination, was not solely the result of reduced external pollutant inflow but primarily the effect of the synergistic action of two key biological and physicochemical mechanisms initiated by the restoration process.

The first mechanism is competition for organic carbon resources. The introduction of specialized microbial strains, a key element of bioremediation, led to the occupation of ecological niches previously filled by native, often pathogenic, bacterial populations. These newly introduced microorganisms are characterized by high metabolic efficiency in utilizing organic matter. Their dynamic growth and expansion significantly reduced the availability of nutrients (including carbon, nitrogen, and phosphorus) necessary for the survival and proliferation of coliform bacteria. This effect, driven by competitive exclusion, contributed to the reduction in their abundance.

The second, equally important mechanism was the transformation of environmental conditions. Prior to restoration, the lake, due to intensive sedimentation of organic matter, was characterized by anoxic conditions in the bottom zone. Such an anaerobic environment is favorable for many bacterial species, including facultative anaerobes such as *Escherichia coli*. The restoration of aerobic conditions throughout the water column and in the hypolimnion, as documented by the significant increase in oxygen concentrations, created a habitat highly unfavorable for these organisms. An oxygen-rich environment promotes the development of aerobic bacteria, which continuously compete with and displace indicator bacteria, thus accelerating their elimination from the aquatic ecosystem¹¹⁾.

The observed decrease in the abundance of coliforms and *E. coli* provides strong evidence that bioremediation, through the induction of biological competition and the fundamental shift in physicochemical conditions from anaerobic to aerobic, not only improved the chemical quality of water but also significantly enhanced its sanitary safety. This finding is of key importance for assessing the overall success of restoration, extending beyond nutrient and ecological parameters.

Summary

The two-year microbial bioremediation of Castle Lake in Gostynin proved to be an effective and comprehensive method for restoring a strongly eutrophicated ecosystem. The observed cascading pattern of improvement – start-

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Water surface area/Powierzchnia zwierciadła wody (A_0), ha	3.3–3.8
Maximum depth/Głębokość maksymalna ($H_{\max}$), m	3.5
Mean depth/Głębokość średnia (H_{av}), m	1.7–2.0
Volume/Objętość (V), m ³	56 000–76 000
Maximum length/Długość maksymalna, m	400–500
Maximum width/Szerokość maksymalna, m	~200
Shoreline length/Długość linii brzegowej (L), m	1300–1400
Shoreline development index/Wskaźnik rozwinięcia linii brzegowej	1.6–1.8
Genetic type/Typ genetyczny	anthropogenic/ antropogeniczny
Mixing type/Typ mieszania	polymictic/ polimiktyczny
Trophic state/Stan trofii	eutrophic/hypertrophic/ eutroficzny/ hipertroficzny

znaczenie dla oceny pełnego sukcesu rekultywacji, wykraczającego poza parametry biogenne i ekologiczne.

Podsumowanie

Przeprowadzona dwuletnia bioremediacja mikrobiologiczna Jeziora Zamkowego w Gostyninie okazała się skuteczną i kompleksową metodą rekultywacji silnie zeutrofizowanego ekosystemu. Zaobserwowany kaskadowy charakter poprawy – rozpoczynający się od redukcji osadów dennych (SOF), przez przywrócenie równowagi tlenowej, aż po poprawę parametrów jakości wody i stanu sanitarnego – jednoznacznie wskazuje, że zastosowana metoda oddziałuje bezpośrednio na źródła problemu, a nie jedynie na jego objawy.

Zaobserwowano wyraźną poprawę wybranych parametrów jakościowych wody, obejmującą (i) znaczną redukcję wewnętrznego ładunku zanieczyszczeń poprzez intensywny rozkład organicznej materii w osadach dennych, (ii) przywrócenie warunków tlenowych w całym słupie wody, szczególnie w strefie przydennej, co przerwało błędne koło eutrofizacji, (iii) drastyczną poprawę przejrzystości wody i redukcję stężeń biogenów (azotu i fosforu) oraz wskaźników zanieczyszczenia organicznego (ChZT, BZT_s), a także (iv) poprawę stanu sanitarnego poprzez zmniejszenie liczby bakterii wskaźnikowych zanieczyszczenia fekalnego, będącą efektem konkurencji biologicznej i zmiany warunków z beztlenowych na tlenowe.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że bioremediacja z wykorzystaniem wyspecjalizowanych konsorcjów bakteryjnych jest trwałą, ekologicznie bezpieczną i wysoce efektywną strategią rekultywacji płytkich, polimiktycznych zbiorników wodnych dotkniętych zaawansowaną eutrofizacją.

ing from the reduction of bottom sediments (SOF), through the restoration of oxygen balance, to the improvement of water quality parameters and sanitary conditions – clearly indicates that the applied method addresses the root causes of the problem rather than only its symptoms.

A clear improvement in selected water quality parameters was observed: (i) a significant reduction of internal pollution load through the intensive decomposition of organic matter in bottom sediments, (ii) a restoration of aerobic conditions throughout the water column, particularly in the bottom zone, which interrupted the vicious cycle of eutrophication, (iii) a drastic improvement in water transparency and reduction in nutri-

ent concentrations (nitrogen and phosphorus) as well as organic pollution indicators (COD, BOD₅), as well as (iv) an improvement of sanitary conditions through the removal of fecal indicator bacteria, as a result of biological competition and the shift from anaerobic to aerobic conditions.

The results confirm that bioremediation with specialized bacterial consortia is a durable, environmentally safe, and highly effective restoration strategy for shallow, polymictic water bodies affected by advanced eutrophication.

Received/Otrzymano:

25-09-2025

Reviewed/Zrecenzowano:

29-09-2025

Accepted/Zaakceptowano:

07-10-2025

Published/Opublikowano:

18-11-2025

REFERENCES/LITERATURA

- [1] K. Kowalczevska-Madura, J. Rosińska, R. Dondajewska-Pielka, R. Gołdyn, L. Kaczmarek, Water 2020, **12**, No. 5, 1383.
- [2] R. Mazur, M. Jakubiak, L. Santos, Sustainability 2023, **16**, No. 1, 266.
- [3] PN-EN ISO 6222:200, Jakość wody. Oznaczanie ilościowe mikroorganizmów zdolnych do wzrostu. Określanie ogólnej liczby kolonii metodą posiewu na agarze odżywcym.
- [4] A. Krevs, A. Kucinskiene, Microbiology 2012, **81**, No. 4, 477.
- [5] A. Krevs, A. Kucinskiene, Ekologija 2009, **55**, No. 2, 127.
- [6] M.F. Coveney, E.F. Lowe, L.E. Battoe, E.R. Marzolf, R. Conrow, Freshwater Biol. 2005, **50**, No. 10, 1718.
- [7] M. Kostecki, J. Suschka, Arch. Environ. Prot. 2013, **39**, No. 1, 17.
- [8] B.C. Moore, B.K. Cross, M. Beutel, S. Dent, E. Preece M. Swanson, Lake Reservoir Manage. 2012, **28**, No. 4, 311.
- [9] R. Rustadi, J. Manusia dan Lingkungan 2009, **16**, No. 3, 176.
- [10] C.Y. Shou, F.J. Yue, B. Zhou, X. Fu, Z.N. Ma, Y.Q. Gong, S.N. Chen, Sci. Total Environ. 2024, **931**, 172924.
- [11] P.A. Venail, M.J. Vives, PlosOne 2013, **8**, No. 9, e72561.