Łukasz Żoczek https://orcid.org/0009-0005-8104-3524
AQUA S.A.
e-mail: lukasz.zoczek@aqua.com.pl

Arkadiusz Kocot
AQUA S.A.
e-mail: arkadiusz.kocot@aqua.com.pl

Klaudiusz Grübel https://orcid.org/0000-0002-0787-9324
Uniwersytet Bielsko-Bialski
e-mail: kgrubel@ubb.edu.pl

Efektywność ekonomiczna branży wodociągowo-kanalizacyjnej w aspekcie zrównoważonego rozwoju

Economic efficiency of the water supply and sewerage industry in the context of sustainable development

https://doi.org/10.25312/ziwgib.902

Streszczenie

Celem pracy było przedstawienie analizy efektywności ekonomicznej wprowadzenia rozwiązania technologicznego w pełnej skali technicznej, służącego do redukcji metali ciężkich ze ścieków, na przykładzie sektora wodociągowo-kanalizacyjnego w kontekście koncepcji zrównoważonego rozwoju. W artykule przedstawiono specyfikę branży, metody oceny efektywności inwestycji oraz zależności między efektywnością ekonomiczną, społeczną i środowiskową. Wykazano, że współczesne podejście do efektywności ekonomicznej wykracza poza klasyczne wskaźniki finansowe i obejmuje także długookresowe efekty ekologiczne oraz społeczne. Przedstawiona analiza kosztów i korzyści zawiera symulację

kosztochłonności oraz możliwego zwrotu inwestycji dotyczącej redukcji metali ciężkich ze ścieków przemysłowych w funkcjonującej stacji utylizacji emulsji olejowych. Przedstawiona analiza przeprowadzona na podstawie danych technologicznych i ekonomicznych (wycena inwestycji oraz koszt eksploatacji) wskazuje, że projekt ten należy traktować nie tylko jako modernizację technologiczną, lecz jako instrument zarządzania efektywnością ekonomiczną, ryzykiem środowiskowym oraz wartością strategiczną przedsiębiorstwa. Uwzględniając koszt inwestycyjny, analiza wykazała, że zwrot z inwestycji będzie możliwy po okresie pięciu lat.

Słowa kluczowe: efektywność ekonomiczna, gospodarka wodno-kanalizacyjna, zrównoważony rozwój, infrastruktura komunalna, analiza kosztów i korzyści, gospodarka obiegu zamkniętego

Abstract

The aim of this article is to present an analysis of the economic efficiency of introducing a full-scale technological solution for the reduction of heavy metals from wastewater, based on the example of the water supply and sewage sector in the context of the concept of sustainable development. The article outlines the specifics of the industry, the methods used to assess investment effectiveness, and the relationship between economic, social, and environmental efficiency. It demonstrates that the modern approach to economic efficiency extends beyond traditional financial metrics to encompass long-term ecological and social impacts. The cost-benefit analysis presented here includes a simulation of cost intensity and potential return on investment for reducing heavy metals in industrial wastewater at an operating oil emulsion utilisation station. The analysis, which is based on technological and economic data (investment valuation and operating costs), indicates that this project should be considered not only as technological modernisation, but also as a means of managing economic efficiency, environmental risk, and the company's strategic value. Taking the investment cost into account, the analysis showed that a return on investment would be possible after five years.

Keywords: economic efficiency, water and wastewater management, sustainable development, municipal infrastructure, cost-benefit analysis, circular economy

Wstęp

Gospodarka wodociągowo-kanalizacyjna stanowi jeden z kluczowych elementów infrastruktury technicznej państwa. Zapewnienie dostępu do wody pitnej oraz odpowiedniego systemu odprowadzania i oczyszczania ścieków jest warunkiem rozwoju społeczno-gospodarczego oraz ochrony środowiska naturalnego (Pogłódek, 2024).

Przedsiębiorstwa branży wodociągowo-kanalizacyjnej odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu nowoczesnego społeczeństwa, odpowiadając za zaopatrzenie w wodę pitną oraz odbiór i oczyszczanie ścieków. Działalność ta ma fundamentalne znaczenie dla zdrowia publicznego, ochrony środowiska i rozwoju gospodarczego. Współcześnie sektor ten stoi w obliczu bezprecedensowych wyzwań: zmian klimatycznych, takich jak powodzie czy susze, rosnących wymagań prawnych, określonych między innymi przez Ramową Dyrektywę Wodną UE czy Dyrektywę Ściekową, presji na racjonalizację kosztów oraz oczekiwań społecznych dotyczących jakości usług i transparentności działania. Dodatkowo rosnące koszty energii oraz zaostrzające się regulacje środowiskowe powodują konieczność redefinicji pojęcia efektywności ekonomicznej. Obecnie nie ogranicza się ona jedynie do minimalizacji kosztów, lecz obejmuje również długookresowe oddziaływanie na środowisko i społeczeństwo (Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej).

W odpowiedzi na te wyzwania koncepcja zrównoważonego rozwoju staje się koniecznym modelem zarządzania. Dotychczas inwestycje prośrodowiskowe postrzegano wyłącznie jako źródło kosztów obciążających budżet przedsiębiorstwa i prowadzących do wzrostu taryf dla odbiorców. Jednak coraz więcej dowodów i praktyk wskazuje, że strategiczne wdrażanie zasad zrównoważonego rozwoju może generować realne, wymierne korzyści ekonomiczne. Mogą one przejawiać się poprzez obniżenie kosztów operacyjnych, takich jak energia czy straty wody, stworzenie nowych strumieni przychodów – sprzedaż energii, odzysk surowców, ograniczenie ryzyka prawnego i wizerunkowego.

W literaturze zwraca się uwagę na potrzebę traktowania usług wodno-ściekowych jako elementu tak zwanej niebieskiej gospodarki (*blue economy*), w której ocena efektywności obejmuje zarówno produktywność ekonomiczną jednostki wody, jak i poziom presji na zasoby oraz stopień tak zwanego zazielenienia działalności. Proponowane podejścia łączą klasyczne wskaźniki finansowe z miernikami ekologicznej efektywności wykorzystania wody oraz stopnia wdrożenia innowacji środowiskowych (Khumarova, Mahats, Kakabadze, 2025).

Celem pracy jest przedstawienie analizy efektywności ekonomicznej wprowadzenia rozwiązania technologicznego w pełnej skali technicznej, służącego do redukcji metali ciężkich ze ścieków na przykładzie sektora wodociągowo-kanalizacyjnego w kontekście koncepcji zrównoważonego rozwoju. Przedstawiona analiza kosztów i korzyści zawiera symulację kosztochłonności oraz możliwego zwrotu inwestycji dotyczącej redukcji metali ciężkich ze ścieków przemysłowych w funkcjonującej stacji utylizacji emulsji olejowych.

Integracja efektywności ekonomicznej i zrównoważonego rozwoju

Skuteczne oczyszczanie ścieków ogranicza presję na naturalne zasoby wodne, zwiększa dostępność wody o jakości odpowiedniej do ponownego wykorzystania oraz redukuje koszty związane z degradacją środowiska i zdrowia publicznego. Dotychczasowe

doświadczenia pokazują, że nowoczesne systemy oczyszczania i ponownego użycia ścieków wspierają zrównoważone zarządzanie zasobami poprzez poprawę podaży wody, odzysk energii oraz wsparcie produkcji rolnej (Rani i in., 2022; Khumarova, Mahats, Kakabadze, 2025).

Z perspektywy ekonomicznej zanieczyszczenie wód obniża dostępność zasobu, zwiększa koszty uzdatniania wody dla odbiorców komunalnych i przemysłowych oraz podnosi ryzyko zakłóceń w łańcuchach dostaw. Modelowe scenariusze do 2030 roku wskazują, że jedynie połączenie poprawy jakości wody oraz efektywności jej wykorzystania pozwala istotnie (o około 20%) zmniejszyć globalne ryzyko gospodarcze związane z wodą (Rani i in., 2022). Ekonomicznie uzasadnione są więc inwestycje w oczyszczanie i ponowne użycie ścieków, nawet przy istotnych nakładach początkowych, o ile uwzględnia się zewnętrzne korzyści – uniknięcie kosztów zanieczyszczeń, oszczędność energii, nowe strumienie przychodów (Fu i in., 2025; Riediger i in., 2025).

Koncepcja gospodarki obiegu zamkniętego redefiniuje oczyszczalnie ścieków z podmiotów utylizujących odpady w instalacje wytwarzające zasoby: wodę, energię i surowce. Zakłady te mogą produkować wodę do ponownego wykorzystania, biogaz, nawozy oraz inne produkty rynkowe, co poprawia ich wyniki ekonomiczne poprzez nowe przychody i redukcję kosztów zakupu energii i nawozów (Masi, Rizzo, Regelsberger, 2017; Hernández-Chover i in., 2023).

Zaawansowane modele efektywności pokazują, że wiele oczyszczalni usuwa stężenia zanieczyszczeń wyższe niż wymagane przepisami, co generuje dodatkowe zasoby dla społeczeństwa, na przykład większy potencjał odzysku składników biogennych. Jednocześnie rozwój technologii odzysku energii ze ścieków, na przykład fermentacja beztlenowa, procesy pozyskiwania energii, stwarza możliwość przekształcenia sektora wodno-ściekowego z konsumenta energii w nettoproducenta, wspierając cele neutralności klimatycznej i ograniczając koszty operacyjne (Rani i in., 2022).

W przypadku małoskalowych systemów wiejskich, takich jak instalacje typu off-grid lub mikroinstalacje, które pozwalają na niezależność od krajowej sieci elektroenergetycznej, uwzględnienie w analizie kosztów i korzyści (redukcja emisji, wartość ponownego wykorzystania wody, poprawa zdrowia) istotnie poprawia ekonomiczną opłacalność rozwiązań o wyższych nakładach inwestycyjnych, dając dodatnią wartość bieżącą netto nawet przy wysokich stopach dyskontowych. Oznacza to, że pełna, zrównoważona kalkulacja efektywności ekonomicznej powinna włączać zarówno koszty, jak i korzyści środowiskowe oraz społeczne (Fu i in., 2025).

W literaturze podkreśla się rosnącą rolę innowacyjnych technologii oczyszczania ścieków (membrany, zaawansowane procesy utleniania, układy hybrydowe, fotokataliza) oraz rozwiązań zdecentralizowanych jako narzędzi poprawy efektywności środowiskowej przy akceptowalnych kosztach. Przykładowo zastosowanie fotokatalizatorów magnetytowych, analizowane z wykorzystaniem oceny techniczno-ekonomicznej, pozwala powiązać redukcję zanieczyszczeń z celami społecznymi, ekonomicznymi i środowiskowymi oraz ocenić skalowalność i opłacalność takich rozwiązań (Zhang i in., 2022).

Z kolei przeglądy technologii oczyszczania ścieków przemysłowych wskazują, że systemy innowacyjne, takie jak zerowy zrzut cieczy, systemy zintegrowane, mogą

przynosić znaczące oszczędności w zużyciu wody i ograniczeniu ładunku zanieczyszczeń, a jednocześnie wspierać odzysk zasobów oraz tworzenie miejsc pracy. Analizy koncepcji *net-zero-carbon water sector*, która dąży do zrównoważenia emisji gazów cieplarnianych w branży wodnej poprzez drastyczne ich ograniczenie, a nawet wyeliminowanie, przywracając wodę do środowiska o tej samej ilości i jakości, podkreślają cztery kluczowe strategie: poprawę efektywności energetycznej procesów, maksymalizację produkcji i wykorzystania energii odnawialnej oraz biogazu, odzysk energii z oczyszczonych ścieków oraz rozwój zdecentralizowanych jednostek woda–energia. Wszystkie te kierunki modyfikują strukturę kosztów jednostek wodno-ściekowych, przesuwając je w stronę wyższych nakładów inwestycyjnych, ale niższych kosztów operacyjnych i większej odporności na ryzyka regulacyjne i cenowe (Rani i in., 2022).

Wpływ strategii zrównoważonego rozwoju na wybrane aspekty efektywności ekonomicznej

Analizy międzysektorowe wskazują, że przedsiębiorstwa z branży wodociągowo-ściekowej – często naturalne monopole – charakteryzują się znaczącą presją na zasoby wodne przy relatywnie niskiej produktywności ekonomicznej na jednostkę zużytej lub zanieczyszczonej wody. Na przykład w warunkach ukraińskich sektor ten odpowiada za około 72% objętości ścieków zanieczyszczonych i ponad jedną trzecią poboru wody, osiągając najniższe wartości produktywności wody (0,29 USD/m^3) i produktywności ekonomicznej na jednostkę ścieków zanieczyszczonych (1,85 USD/m^3). Jednocześnie przedsiębiorstwa te przeznaczają wysoki udział nakładów środowiskowych (około 60%) na oczyszczanie ścieków, co wskazuje na strategiczne znaczenie inwestycji w modernizację i innowacje dla poprawy efektywności (Khumarova, Mahats, Kakabadze, 2025).

Wdrożenie rozwiązań z zakresu gospodarki o obiegu zamkniętym (odzysk energii, składników odżywczych, wody) prowadzi do przekształcenia struktury kosztów poprzez wzrost nakładów inwestycyjnych i spadek kosztów operacyjnych, zwłaszcza energii (Hernández-Chover i in., 2023). Przykłady modernizacji oczyszczalni w regionach suchych pokazują, że integracja odnawialnych źródeł energii i efektywne wykorzystanie biogazu może zapewnić niemal połowę niezależności energetycznej, znacząco ograniczając ślad węglowy i koszty zakupu energii (Al-Khatib, Al-Hanaktah, 2025). Z ekonomicznego punktu widzenia przekłada się to na większą stabilność finansową w warunkach rosnących cen energii i zaostrzających się regulacji klimatycznych.

Zrównoważone inwestycje w sektor wodno-ściekowy mają potencjał generowania bezpośrednich i pośrednich korzyści gospodarczych. W badaniach modernizacji oczyszczalni ścieków w Jordanii wykazano, że poprawa bezpieczeństwa wodnego i infrastruktury sanitarnej wspiera wzrost zatrudnienia, zwiększa atrakcyjność inwestycyjną regionu oraz przyczynia się do rozwoju zrównoważonej urbanizacji. Zastosowanie wody odzyskanej w rolnictwie i przemyśle podnosi produktywność tych sektorów, a powiązane inwestycje w infrastrukturę i ekosystemy, na przykład sztuczne tereny podmokłe, tereny rekreacyjne, generują dodatkowe strumienie przychodów, między innymi z turystyki (Al-Khatib, AlHanaktah, 2025).

Na poziomie makroekonomicznym poprawa efektywności wykorzystania wody i zmniejszenie ryzyk związanych z niedoborem wody redukują potencjalne straty PKB wynikające z susz, degradacji jakości wód oraz zakłóceń w handlu międzynarodowym. Analizy śladu wodnego i powiązań między sektorami w Chinach pokazują, że zintegrowane zarządzanie wodą w rolnictwie, przemyśle, sektorze ekologicznym oraz handlu jest kluczowe dla łagodzenia konfliktów między rozwojem gospodarczym a ochroną zasobów (Yang i in., 2024).

Zrównoważony rozwój sektora wodno-ściekowego wiąże się również z obniżeniem ryzyka regulacyjnego i finansowego. Rosnące wymagania dotyczące jakości ścieków, efektywności energetycznej i emisyjności sektora będą wymuszały modernizację infrastruktury, której opóźnianie może skutkować koniecznością realizacji kosztownych, szybkich dostosowań w przyszłości. Doświadczenia przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych wskazują, że wdrażanie strategii budżetowania, prognozowania finansowego oraz optymalizacji struktury kosztów w połączeniu z wykorzystaniem zielonych instrumentów finansowych może wzmocnić odporność finansową jednostek i jednocześnie przyspieszyć transformację w kierunku zrównoważonego rozwoju (Rani i in., 2022).

Związek między zrównoważonym rozwojem a efektywnością ekonomiczną w sektorze wodno-ściekowym ma charakter dwukierunkowy i systemowy. Z jednej strony strategie zrównoważonego rozwoju – w tym oczyszczanie i ponowne wykorzystanie ścieków, gospodarka o obiegu zamkniętym, innowacje technologiczne oraz zielone finansowanie – umożliwiają poprawę efektywności zasobowej, redukcję kosztów zewnętrznych, dywersyfikację przychodów i wzmocnienie stabilności finansowej przedsiębiorstw. Z drugiej strony odpowiedni poziom rozwoju gospodarczego i jakości zarządzania finansowego warunkuje zdolność sektora do ponoszenia nakładów inwestycyjnych niezbędnych do realizacji celów zrównoważonego rozwoju (Rani i in., 2022).

W świetle przytoczonych badań kluczowe wydaje się wdrażanie zintegrowanych systemów wskaźników, które łączą tradycyjne mierniki finansowe z indeksami efektywności ekologicznej i innowacyjności, a także pełna internalizacja korzyści i kosztów środowiskowych w analizach ekonomicznych. Tak ujęta efektywność ekonomiczna staje się spójna z paradygmatem zrównoważonego rozwoju, wzmacnia odporność gospodarki wodno-ściekowej na szoki zewnętrzne oraz sprzyja realizacji krajowych i globalnych celów środowiskowych, jak też społecznych.

Powyższe praktyki stanowią użyteczne punkty odniesienia. Pozwalają uzasadnić, że inwestycje proekologiczne mogą być neutralne lub korzystne dla efektywności ekonomicznej, jeśli są analizowane w zamyśle pełnych kosztów cyklu życia, stabilności strumieni przychodów oraz unikniętych kosztów i ryzyk.

Wybrane problemy obecności metali ciężkich w ściekach

Obecność metali ciężkich w ściekach stanowi poważny problem środowiskowy i zdrowotny. Metale ciężkie są trwałe, toksyczne i mogą się kumulować w środowisku oraz organizmach żywych, prowadząc do długotrwałych skutków.

Metale ciężkie to pierwiastki, które charakteryzują się wysoką trwałością w środowisku. Ponadto mają one działanie toksyczne oraz zdolność do bioakumulacji w tkankach żywych organizmów (Qayoom i in., 2022). Niektóre z nich, na przykład kadm, chrom, nikiel czy ołów, wykazują właściwości rakotwórcze (Espinoza-Guillen i in., 2022). Nadmierna akumulacja metali ciężkich w środowisku wiąże się także z możliwością jego wtórnego zanieczyszczenia tymi pierwiastkami. Dotyczy to przede wszystkim środowiska gruntowo-wodnego. W przypadku przeniknięcia do łańcucha pokarmowego pierwiastki te mogą powodować negatywne efekty zdrowotne, takie jak uszkodzenia organów wewnętrznych, układu odpornościowego czy endokrynnego, choroby układy nerwowego, a także nowotwory (Zhang i in., 2020).

Z tych powodów metale ciężkie obecne w ściekach mogą stanowić zagrożenie zarówno w wymiarze ekologicznym, jak i zdrowotnym. Obecność tej grupy substancji zanieczyszczających, obok skażenia mikrobiologicznego, stanowi zatem jedno z podstawowych kryteriów decydujących o możliwości wykorzystania ścieków i osadów ściekowych w rolnictwie przemysłowym lub rekultywacji (You i in., 2021).

Źródła metali ciężkich

Wśród głównych źródeł metali ciężkich w ściekach i osadach ściekowych można wymienić:

1. Ścieki przemysłowe (na przykład hutnicze, garbarskie, lakiernicze) i bytowe (w tym farmaceutyki, środki czyszczące czy kosmetyki), jak również, spływy powierzchniowe oraz korozję przewodów kanalizacyjnych. Wiele branż przemysłowych, takich jak przemysł chemiczny, metalurgiczny czy elektroniczny, generuje odpady zawierające metale ciężkie (na przykład ołów, kadm, rtęć). Warto nadmienić, że w 2023 roku funkcjonowało w Polsce 2040 zakładów przemysłowych generujących ścieki zawierające metale ciężkie, z których 1149 nie posiadało przyzakładowych oczyszczalni ścieków (*Baza Danych Lokalnych (BDL)*, 2023). Oznacza to, że cały strumień wytwarzanych ścieków odprowadzany był bezpośrednio do systemu kanalizacji miejskiej. Niewątpliwie skład tych ścieków wywiera istotny wpływ na zawartość metali ciężkich w powstających osadach ściekowych.
2. Rolnictwo, w którym używane są nawozy i pestycydy, które mogą zawierać metale ciężkie oraz odpady z obiektów hodowlanych. Stosowanie środków ochrony roślin może mieć niekorzystny wpływ na środowisko, jako że mogą one stanowić zagrożenie dla jakości wód gruntowych i powierzchniowych, jakości gleby, różnorodności biologicznej i ekosystemów. Mogą stanowić również zagrożenie dla zdrowia ludzi, między innymi z powodu pozostałości w produktach spożywczych. Pestycydy rozpylane na polach przenikają do gleby i wód w okolicy.
3. Transport, w którym odnotowuje się emisje z pojazdów, a generowane metale ciężkie najczęściej są odprowadzane i kumulowane w ściekach i wodach deszczowych.

4. Domowe źródła, takie jak odpady z gospodarstw domowych, w tym zużyte baterie, farby czy środki czyszczące, mogą również przyczyniać się do zanieczyszczenia.

Zważywszy na fakt, że metale ciężkie różnią się między sobą właściwościami, poziomem toksyczności oraz zakresem stężeń w środowisku, należy mieć na uwadze, że samo odniesienie ich ogólnej zawartości w ściekach i osadach ściekowych do przepisów prawa jest niewystarczające. Wynika to z faktu, że ogólna zawartość metali w ściekach i osadach ściekowych pozwala jedynie na ocenę stopnia ich zanieczyszczenia, natomiast nie jest jednoznaczna z możliwością uwolnienia tych pierwiastków do środowiska czy ich biodostępnością (Gawdzik, 2012). Czynnikiem warunkującym mobilność metali jest ich forma fizyczna lub chemiczna (You i in., 2021). Metale w ściekach i osadach ściekowych występują w różnej postaci (rozpuszczonej, wytrąconej, współstrącania z tlenkami metali, zaadsorbowane bądź zasocjowane na cząstkach resztek biologicznych), co wpływa na zróżnicowanie ich form chemicznych (Gawdzik, 2012).

Zarządzanie i minimalizacja źródeł metali ciężkich w ściekach są kluczowe dla ochrony środowiska i zdrowia publicznego. Dla poprawy jakości wód ważne jest również monitorowanie i stosowanie technologii oczyszczania skutecznie usuwających te zanieczyszczenia.

Metody usuwania metali ciężkich

Procesy stosowane w oczyszczalniach ścieków nie gwarantują całkowitego usuwania metali ciężkich, co stanowi bezpośrednią przyczynę kumulowania się tych zanieczyszczeń w osadach ściekowych. Od 50% do 80% metali ciężkich, które trafiają do oczyszczalni ścieków wraz ze ściekami surowymi, jest kumulowanych w osadach ściekowych. Dzieje się to na drodze fizykochemicznych i biologicznych interakcji. Warto jednak zauważyć, że istnieją metody przeznaczone do usuwania metali ze ścieków i osadów ściekowych – chemiczne, fizyczne oraz biologiczne (Geng i in., 2020). Często stosuje się również kombinacje tych metod. Wybór metody zależy od rodzaju i składu ścieków przemysłowych, formy i stężenia metali ciężkich oraz wymaganego stopnia oczyszczenia (Krishnan i in., 2021). Wśród technologii oczyszczania wyróżnia się adsorpcję, wytrącanie, biosorpcję, odwróconą osmozę, wymianę jonową, elektrodializę, separację membranową wspomaganą wymianą jonową oraz metody elektrochemiczne (Żoczek, Dudziak, 2022).

Jedną z metod chemicznych stosowanych do usuwania metali ciężkich jest również flokulacja, która służy do oddzielania określonych grup substancji od mieszaniny płynnych odpadów przemysłowych. Stanowi ona kolejny etap procesu koagulacji, polegającego na wytrącaniu osadów z zawiesiny. W uproszczeniu we flokulacji dochodzi do łączenia się (agregacji) małych grup cząstek w większe duże zespoły. Proces ten wymaga zastosowania flokulantów – substancji o wysokiej masie cząsteczkowej, rozpuszczalnych w wodzie. Ich działanie polega na adsorpcji na powierzchni cząstek oraz zwiększeniu ich wzajemnego przyciągania do siebie (tak zwane mostkowanie). W efekcie powstają makroagregaty, które są znacznie łatwiejsze do odfiltrowania.

W procesie usuwania metali ciężkich ze ścieków stosowane są flokulanty mineralne (glinokrzemiany), które są reaktywnymi środkami sorpcyjno-flokującymi charakteryzującymi się wysoko rozwiniętą powierzchnią aktywną. Dzięki swoim właściwościom sorpcyjnym oraz specjalnym modyfikacjom i aktywacji znacząco poprawiają proces flokulacji, przyspieszając tworzenie makroagregatów i w rezultacie intensywniejsze i efektywniejsze opadanie osadów. Zastosowanie tych preparatów w dużym stopniu poprawia proces oczyszczania ścieków oraz klarowność wody. Dodatkowo glinokrzemiany wpływają na redukcję wielu kluczowych parametrów oraz uzyskanie lepszej suchej masy osadu, a także korzystnie oddziałują na pracę urządzeń filtracyjnych. Jednym z zastosowań jest też adsorpcja kationów metali ciężkich, takich jak cynk, oraz adsorpcja rtęci, fenolu, niektórych pestycydów, nitroetanu, aniliny i jonów chromu (VI) (Camargo i in., 2016).

Studium przypadku wdrożenia procesu strącania metali ciężkich ze ścieków przemysłowych pochodzących ze stacji utylizacji emulsji olejowych (SUEO) działającej na Oczyszczalni Ścieków (OŚ) AQUA S.A.

Realizacja celów środowiskowych oraz utrzymanie długoterminowej efektywności ekonomicznej przedsiębiorstw z branży wodociągowo-kanalizacyjnej wymagają podejmowania działań wykraczających poza standardowe procesy oczyszczania ścieków. Jednym z takich działań jest wdrożenie instalacji redukującej stężenia metali ciężkich, których nadmierne poziomy w ściekach należą do kluczowych problemów ujętych w Ramowej Dyrektywie Wodnej 2000/60/WE i krajowych programach ochrony wód, między innymi Krajowym Programie Oczyszczania Ścieków Komunalnych.

Poniżej zaprezentowano uproszczoną analizę opłacalności ekonomicznej planowanego na lata 2026–2027 wdrożenia procesu strącania metali ciężkich ze specyficznych ścieków przemysłowych pochodzących ze stacji utylizacji emulsji olejowych (SUEO) działającej na Oczyszczalni Ścieków (OŚ) AQUA S.A. W analizie uwzględniono zarówno wymiar finansowy, jak i ekologiczny oraz regulacyjny. Analiza została oparta na danych operacyjnych przedsiębiorstwa za rok 2024, obejmujących masę przetworzonych odpadów, ilości powstających ścieków, przychody, koszty oraz prognozowane parametry eksploatacyjne instalacji. Dane empiryczne pochodzą z rzeczywistych pomiarów i zestawień uzyskanych z SUEO AQUA S.A. Na ich podstawie zaprezentowano wyniki ilościowe, analizę ekonomiczną oraz implikacje dla praktyki AQUA S.A. jako przedsiębiorstwa funkcjonującego w realiach regulacyjnych UE i Polski.

Dane te stanowią podstawę do oceny potencjalnych korzyści środowiskowych i ekonomicznych wynikających z implementacji technologii usuwania metali ciężkich, przy czym interpretacja i wnioski odnoszone są do realiów funkcjonowania AQUA S.A.

Analiza ekonomiczno-finansowa

Analiza ekonomiczno-finansowa wdrożenia instalacji neutralizacji i strącania metali ciężkich została przeprowadzona w oparciu o dane empiryczne zestawione w tabeli 1, obejmujące rzeczywiste wolumeny odpadów i ilości powstających ścieków.

Uwzględniając dane ekonomiczne, dokonano poniższej analizy, która jest zgodna z rekomendacjami literatury z zakresu ekonomii środowiska i zasobów naturalnych oraz analizy projektów infrastrukturalnych, według których ocena efektywności ekonomicznej powinna bazować na rzeczywistych danych operacyjnych, a nie wyłącznie na wartościach normatywnych lub teoretycznych (Boardman i in., 2018).

Zgodnie z posiadanymi danymi łączna ilość odpadów przyjętych do utylizacji w 2024 roku wyniosła 11 992,79 Mg, natomiast ilość ścieków powstających w procesie utylizacji emulsji olejowych osiągnęła 11 785 m³/rok. Skala ta jednoznacznie potwierdza przemysłowy charakter analizowanej instalacji oraz istotny potencjał oddziaływania środowiskowego i kosztowego, co jest typowe dla obiektów przetwarzania odpadów ciekłych o średniej i dużej przepustowości (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2014).

Struktura przychodów w analizowanym okresie obejmowała przychody netto z utylizacji odpadów w wysokości 3 157 958,18 PLN/rok oraz przychody netto ze sprzedaży odzyskanego oleju na poziomie 366 302,00 PLN/rok, co łącznie dało 3 524 260,18 PLN/rok. Jednocześnie należy wskazać, że w procesie utylizacji emulsji olejowych powstają szlamy wymagające zagospodarowania przez wyspecjalizowane firmy zewnętrzne. W 2024 roku koszt netto ich utylizacji wyniósł 86 592,00 PLN/rok, co stanowi stały element kosztów operacyjnych i jest zgodne z obserwacjami literatury dotyczącymi gospodarki osadowej w instalacjach przemysłowych.

Zgodnie z danymi roczna ilość ścieków podlegających procesowi neutralizacji wynosi 11 785 m³. Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych (Chrapczyńska i in., 2025a; 2025b) oraz analizy projektowej wykonanej przez firmę zewnętrzną określono zapotrzebowanie na odczynniki chemiczne, skalę instalacji oraz intensywność procesu. Pozwoliło to na oszacowanie jednostkowego kosztu neutralizacji na poziomie 65 PLN/m³.

Przyjęta wartość pozostaje spójna z danymi, jakie znaleźć można w literaturze przedmiotu. Jak wskazują Kurniawan i in. (2006), koszty chemicznej obróbki ścieków zawierających metale ciężkie kształtują się w przedziale 60–150 PLN/m³ w zależności od składu ścieków, doboru reagentów oraz skali instalacji. Umiejscowienie analizowanej instalacji w dolnym zakresie tego przedziału potwierdza racjonalność kosztową zaprojektowanego rozwiązania. W konsekwencji roczny koszt neutralizacji metali ciężkich wynosi 11 785 m³ × 65 PLN/m³ = 766 025 PLN/rok.

Jest to nowy, dodatkowy koszt operacyjny (OPEX), wynikający bezpośrednio z realizacji wymogów środowiskowych i regulacyjnych. Literatura przedmiotu jednoznacznie wskazuje, że technologie chemicznego strącania metali ciężkich, mimo relatywnej prostoty technologicznej, generują istotne koszty eksploatacyjne związane głównie ze zużyciem reagentów i energii oraz ze zwiększoną ilością osadów. Wyniki uzyskane dla analizowanej spółki są zatem zgodne z dominującymi trendami sektorowymi.

Tab. 1. Dane dotyczące przyjmowanych odpadów oraz powstających ścieków w stacji utylizacji odpadów przemysłowych w roku 2024

	Odpady przyjmowane do stacji utylizacji emulsji olejowych (SUEO) według klasyfikacji														
	070101*	070104*	070604*	110113*	120109*	120110*	120301*	130105*	130208*	130507*	130802*				
Limit roczny (Mg)	**100**	**2000**	**150**	**3500**	**8000**	**100**	**3500**	**2000**	**50**	**1500**	**200**				
styczeń	0,00	0,00	0,80	150,00	940,93	0,00	123,59	8,80	0,00	63,02	0,00	Suma	1287,14	Ilość generowanych ścieków z procesu utylizacji emulsji olejowych (m^3)	1085
luty	2,00	0,00	0,40	162,30	778,09	0,00	106,10	8,20	0,00	62,26	0,00		1119,34		1015
marzec	0,00	0,00	0,80	144,22	719,23	0,20	84,10	4,00	0,00	279,34	0,00		1231,89		1085
kwiecień	0,00	0,00	0,80	170,40	760,49	0,00	56,80	28,16	6,60	163,14	9,46		1195,85		1050
maj	0,00	0,00	0,80	130,00	492,64	0,00	126,01	22,49	0,00	23,60	18,82		814,36		1085
czerwiec	0,00	0,00	0,40	159,96	736,69	0,00	91,79	15,27	0,00	58,22	0,00		1062,33		1050
lipiec	0,00	0,00	0,80	196,62	926,39	0,00	43,50	18,52	0,00	24,35	8,68		1218,86		1085
sierpień	0,00	0,00	0,80	179,90	825,90	0,00	41,03	5,50	0,00	49,03	0,00		1102,16		1085
wrzesień	0,00	0,00	0,80	194,41	519,26	0,00	105,99	16,74	0,00	118,52	0,00		955,73		1050
październik	0,00	0,00	1,20	189,60	717,62	0,00	89,06	16,18	0,00	47,02	0,00		1060,68		1085
listopad	0,00	6,82	0,40	150,00	429,05	0,00	27,17	0,00	0,00	20,75	0,00		634,19		730
grudzień	0,00	0,00	0,40	120,00	118,50	0,00	67,00	0,00	0,00	4,36	0,00		310,26		380
Suma (Mg)	**2,00**	**6,82**	**8,40**	**1947,41**	**7964,80**	**0,20**	**962,15**	**143,86**	**6,60**	**913,60**	**36,96**		11992,79		11785
Procent (%)	**0,02**	**0,06**	**0,07**	**16,24**	**66,41**	**0,00**	**8,02**	**1,20**	**0,06**	**7,62**	**0,31**				

070101* – Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania podstawowych produktów przemysłu chemii organicznej. Wody popłuczne i ługi macierzyste.
070104* – Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania podstawowych produktów przemysłu chemii organicznej. Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste.
070604* – Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania tłuszczów, natłustek, mydeł, detergentów, środków dezynfekujących i kosmetyków. Inne rozpuszczalniki organiczne, roztwory z przemywania i ciecze macierzyste.
110113* – Odpady z chemicznej obróbki i powlekania powierzchni metali oraz innych materiałów i z procesów hydrometalurgii metali nieżelaznych. Odpady z odtłuszczania zawierające substancje niebezpieczne.
120109* – Odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych. Odpadowe emulsje i roztwory z obróbki metali niezawierające chlorowców.

120110* – Odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych. Syntetyczne oleje z obróbki metali.
120301* – Odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych. Wodne ciecze myjące.
130105* – Oleje odpadowe i odpady ciekłych paliw (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05, 12 i 19). Emulsje olejowe niezawierające związków chlorowcoorganicznych.
130208* – Odpadowe oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe. Inne oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe.
130507* – Odpady z odwadniania olejów w separatorach. Zaolejona woda z odwadniania olejów w separatorach.
130802* – Odpady olejowe nieujęte w innych podgrupach. Inne emulsje.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych SUEO AQUA S.A.

Z perspektywy ekonomii środowiska racjonalnym mechanizmem ograniczania wpływu nowych kosztów operacyjnych jest częściowy transfer kosztów na wytwórców odpadów. Obecne ceny odbioru emulsji olejowych kształtują się w przedziale 200–400 PLN/Mg netto i są ustalane indywidualnie. Uwzględniając rosnące wymagania środowiskowe oraz poprawę jakości świadczonej usługi, przyjęto założenie wzrostu ceny odbioru o około 10%, co odpowiada średnio 30 PLN/Mg. Przy rocznym wolumenie odpadów wynoszącym 11 992,79 Mg oznacza to wzrost przychodów o 359 783,79 PLN/rok.

Takie rozwiązanie jest zgodne z zasadą „zanieczyszczający płaci", stanowiącą fundament unijnej polityki środowiskowej oraz kluczowy element teorii internalizacji kosztów zewnętrznych w ekonomii środowiska (Tietenberg, Lewis, 2018).

Po uwzględnieniu zwiększonych przychodów oraz kosztów utylizacji szlamów przychód netto przedsiębiorstwa (przed doliczeniem kosztów neutralizacji) wynosi 3 784 463,17 PLN/rok, natomiast po uwzględnieniu kosztów neutralizacji metali ciężkich kształtuje się na poziomie 3 031 426,97 PLN/rok.

Dodatkowo należy uwzględnić wzrost ilości szlamów powstających w procesie strącania metali ciężkich. Na podstawie badań laboratoryjnych oszacowano, że ilość ta wzrośnie o około 15% w stosunku do roku bazowego, co generuje dodatkowy koszt: 86 592,00 PLN × 15% = 12 988,80 PLN/rok. Zjawisko to jest powszechnie opisywane w literaturze jako typowa konsekwencja procesów chemicznego strącania metali (Alloway, 2013).

Wdrożenie instalacji usuwania metali ciężkich wiąże się z jednorazowym nakładem inwestycyjnym (CAPEX) w wysokości 1 000 000 PLN, zgodnie z wyceną sporządzoną w ramach projektu technologicznego przez firmę zewnętrzną. W analizie przyjęto pięcioletni horyzont czasowy, bez stosowania dyskonta, co jest podejściem często stosowanym w analizach infrastrukturalnych o charakterze regulacyjnym i operacyjnym (Boardman i in., 2018). Koszty eksploatacyjne neutralizacji w okresie pięciu lat wynoszą: 5 × 766 025 PLN = 3 830 125 PLN, natomiast całkowity koszt inwestycji (CAPEX + OPEX) w tym okresie osiąga 4 830 125 PLN.

Należy zaznaczyć, że analizowana inwestycja nie generuje bezpośrednich dodatkowych przychodów, co odpowiada charakterystyce *compliance-driven investments*, czyli inwestycji realizowanych w celu zapewnienia zgodności z regulacjami prawnymi, normami środowiskowymi oraz standardami ESG – ang. *Environmental*, *Social*, *Governance* (środowisko, społeczna odpowiedzialność, ład korporacyjny) (Eccles, Serafeim, Ioannou, 2014). W literaturze podkreśla się, że tego typu projekty należy oceniać przede wszystkim

przez pryzmat redukcji ryzyka prawnego, finansowego i reputacyjnego, a nie wyłącznie krótkookresowej maksymalizacji zysku.

Łączne przychody przedsiębiorstwa w analizowanym okresie pięcioletnim wynoszą: 5 × 3 031 426,97 PLN = 15 157 134,85 PLN.

Po uśrednieniu kosztów inwestycyjnych:

- CAPEX/rok = 200 000 PLN,
- całkowity koszt roczny (CAPEX + OPEX) = 966 025 PLN.

W przeliczeniu na jednostki operacyjne daje to:

- 81,97 PLN/m³ ścieków,
- 80,55 PLN/Mg odpadów.

Uzyskane wartości jednoznacznie potwierdzają, że instalacja – mimo istotnego kosztu początkowego – nie powoduje spadku rentowności przedsiębiorstwa poniżej poziomu opłacalności operacyjnej, co jest kluczowe z perspektywy efektywności ekonomicznej przedsiębiorstwa rozumianej jako zdolność do trwałego generowania dodatniego wyniku finansowego (Samuelson, Nordhaus, 2010). Relatywnie niski poziom kosztów jednostkowych wskazuje ponadto, że inwestycja ta pełni funkcję stabilizującą działalność przedsiębiorstwa, umożliwiając jednoczesną realizację celów ekonomicznych, środowiskowych i regulacyjnych w średnim oraz długim horyzoncie czasowym.

Podsumowanie i wnioski

Planowane wdrożenie procesu strącania metali ciężkich ze ścieków przemysłowych pochodzących ze stacji utylizacji emulsji olejowych (SUEO), funkcjonującej przy Oczyszczalni Ścieków AQUA S.A., stanowi rozwiązanie wielowymiarowe. Analiza przeprowadzona na podstawie danych technologicznych i ekonomicznych wskazuje, że projekt ten należy traktować nie tylko jako modernizację technologiczną, lecz jako instrument zarządzania efektywnością ekonomiczną, ryzykiem środowiskowym oraz wartością strategiczną przedsiębiorstwa.

Przeprowadzona analiza ekonomiczna jednoznacznie potwierdza, że realizacja tej inwestycji – pomimo istotnych nakładów początkowych o charakterze inwestycyjnym – nie prowadzi do obniżenia rentowności przedsiębiorstwa poniżej poziomu opłacalności operacyjnej. Jest to wniosek kluczowy z punktu widzenia oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięcia oraz jego zgodności z długookresową stabilnością finansową spółki. Przedsięwzięcie to będzie generowało mierzalne korzyści finansowe, środowiskowe i regulacyjne, a jednocześnie wzmocni długoterminową wartość strategiczną i wizerunkową spółki. Co istotne, efekty te mogą być systematycznie monitorowane przy użyciu wskaźników finansowych i ESG, opartych na danych już dostępnych w sprawozdawczości technicznej i finansowej przedsiębiorstwa. Tym samym projekt ten potwierdza tezę, że zrównoważony rozwój w sektorze wodno-ściekowym może stanowić realne źródło efektywności ekonomicznej, a nie wyłącznie koszt regulacyjny.

W szczególności należy podkreślić, że koszty początkowe związane z zaprojektowaniem i uruchomieniem instalacji (nakłady inwestycyjne, koszty adaptacji infrastruktury,

wydatki na aparaturę i automatykę procesową) mają charakter jednorazowy, podczas gdy korzyści ekonomiczne generowane przez instalację ujawniają się w horyzoncie wieloletnim. Analiza przepływów finansowych wykazała, że wzrost kosztów operacyjnych wynikający z prowadzenia procesu neutralizacji i strącania metali ciężkich (między innymi zużycie reagentów chemicznych, energia, obsługa technologiczna, zagospodarowanie osadów) pozostaje kontrolowalny i proporcjonalny do skali działalności stacji utylizacji emulsji olejowych.

Jednocześnie wdrożenie instalacji pozwala na ograniczenie kosztów pośrednich i potencjalnych strat finansowych, które w scenariuszu braku inwestycji mogłyby wystąpić w dłuższej perspektywie. Dotyczy to w szczególności ryzyka:

- przekroczeń dopuszczalnych stężeń metali ciężkich w ściekach kierowanych do dalszego oczyszczania,
- wzrostu opłat środowiskowych lub kar administracyjnych,
- konieczności kosztownych działań interwencyjnych lub modernizacyjnych w przyszłości,
- pogorszenia parametrów technologicznych pracy głównej oczyszczalni ścieków.

Z perspektywy finansowej kluczowym efektem wdrożenia procesu strącania metali ciężkich będzie zwiększenie przewidywalności kosztów operacyjnych oraz poprawa efektywności ekonomicznej segmentu usług przemysłowych. Koszty neutralizacji i strącania metali ciężkich, ponoszone w sposób bezpośredni i możliwe do alokacji do konkretnego strumienia ścieków, mogą być traktowane jako koszty zmienne przypisane do działalności odpadowej. Umożliwi to bardziej precyzyjną kalkulację rentowności usług oraz ograniczy ryzyko przenoszenia kosztów na pozostałe obszary działalności spółki.

Z punktu widzenia strategii rozwoju AQUA S.A. wdrożenie procesu strącania metali ciężkich wzmocni pozycję spółki jako innowacyjnego i odpowiedzialnego operatora infrastruktury krytycznej. Projekt ten może być traktowany jako przykład materialnej realizacji strategii ESG, co – zgodnie z badaniami – pozytywnie wpływa na reputację przedsiębiorstw sektora użyteczności publicznej oraz ich zdolność do pozyskiwania finansowania zewnętrznego.

Bibliografia

Al-Khatib L.A., Al-Hanaktah A.M. (2025), *Wastewater Treatment Plant Upgrade and Its Interlinkages with the Sustainable Development Goals*, „Resources", https://www.researchgate.net/publication/390693243_Wastewater_Treatment_Plant_Upgrade_and_Its_Interlinkages_with_the_Sustainable_Development_Goals [dostęp: 12.08.2026].

Alloway B.J. (2013), *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.)*, Dordrecht: Springer.

Baza Danych Lokalnych (BDL) (2023), Warszawa: Główny Urząd Statystyczny.

Boardman A.E., Greenberg D.H., Vining A.R., Weimer D.L. (2018), *Cost–benefit analysis: Concepts and practice (5th ed.)*, Cambridge: Cambridge University Press.

Camargo F.P., Tonello P.S., dos Santos A.C.A., Duarte I.C.S. (2016), *Removal of toxic metals from sewage sludge through chemical, physical, and biological treatments – a review*, „Water, Air, & Soil Pollution", vol. 227(12), art. 433, https://doi.org/10.1007/s11270-016-3141-3

Chrapczyńska A., Chandzlik M., Kosior A., Nikiel K., Puchalik A., Szufłat D., Jurzak M., Żoczek Ł., Grübel K. (2025a), *Wpływ wartości pH oraz czasu mieszania na neutralizację i strącanie metali ciężkich w ściekach przemysłowych pochodzących z przetworzenia emulsji olejowych*, „Gaz, Woda, Technika Sanitarna", nr 7–8, s. 23–28, https://doi.org/10.15199/17.2025.7-8.4

Chrapczyńska A., Chandzlik M., Kosior A., Nikiel K., Puchalik A., Szufłat D., Jurzak M., Żoczek Ł., Grübel K. (2025b), *The possibility of the neutralisation and precipitation of heavy metals in industrial wastewater from oil emulsion processing*, „Journal of Ecological Engineering", vol. 26(6), s. 402–409, https://doi.org/10.12911/22998993/202752

Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzienniki-UE/dyrektywa-2000-60-we-ustanawiajaca-ramy-wspolnotowego-dzialania-w-dziedzinie-67427579 [dostęp: 12.08.2026].

Eccles R., Serafeim G., Ioannou I. (2014), *The Impact of Corporate Sustainability on Organizational Processes and Performance*, „Management Science", vol. 60(11), s. 2835–2857, https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.1984

Espinoza-Guillen J.A., Alderete-Malpartida M.B., Gallegos-Huaman R.L., Paz-Rosales Y.M., Dommguez-Vivar R.M., Bujaico-León C. (2022), *Ecological risk assessment and identification of sources of heavy metals contamination in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants in the Metropolitan Area of Lima-Callao*, „Environment, Development and Sustainability", vol. 26(10), s. 1559–1590, https://doi.org/10.1007/s10668-022-02774-w

Fu B., Wu J., Chen S., Cheng J., Zheng Z., Zhang Y., Lin X., Xiao L. (2025), *Does resource recovery and utilization improve environmental and economic performance of rural wastewater treatment plants? A case study in Xiamen, China*, „Water Research", vol. 283(1), 121734, https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123791

Gawdzik J. (2012), *Mobilność wybranych metali ciężkich w osadach ściekowych*, Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.

Geng H., Xu Y., Zheng L., Gong H., Dai L., Dai X. (2020), *An overview of removing heavy metals from sewage sludge: Achievements and perspectives*, „Environmental Pollution", vol. 266(2), art. 115375, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115375

Hernández-Chover V., Castellet-Viciano L., Fuentes R., & Hernández-Sancho F. (2023), *Circular economy and efficiency to ensure the sustainability in the wastewater treatment plants*, „Journal of Cleaner Production", vol. 384(9), art. 135994, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135563

Khumarova N., Mahats N., Kakabadze G. (2025), *Assessment of Economic Greening Efficiency in Water Resource Management*, „Economics Ecology Socium", vol. 9(1), s. 1–15, https://doi.org/10.61954/2616-7107/2025.9.1-1

Krishnan S., Zulkapli N.S., Kamyab H., Taib S.M., Din M.F.B.M., Majid Z.A., Chaiprapat S., Kenzo I., Ichikawa Y., Nasrullah M., Chelliapan S., Othman N. (2021), *Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview*, „Environmental Technology & Innovation", vol. 22, art. 101525, https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101525

Kurniawan T.A., Chan G.Y.S., Lo W.H., Babel S. (2006), *Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals*, „Chemical Engineering Journal", vol. 118(1–2), s. 83–98, https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015

Masi F., Rizzo A., Regelsberger M. (2017), *The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm*, „Journal of Environmental Management", vol. 216, s. 275–284, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.086

Pogłódek A. (2024), *Dostęp do wody jako podstawowe prawo człowieka: otoczenie prawa międzynarodowego oraz funkcjonowanie instrumentów krajowych*, https://iws.gov.pl/wp-content/uploads/PDF/2024/PRAWA%20PODSTAWOWE/2024_PrawaP_A_Poglodek_Dostep_do_wody_jako_podstawowe_prawo_czlowieka.pdf [dostęp: 14.02.2026].

Qayoom U., Bhat S.U., Ahmad I., Kumar A. (2022), *Assessment of potential risks of heavy metals from wastewater treatment plants of Srinagar city*, „International Journal of Environmental Science and Technology", vol. 19, s. 9027–9046, https://doi.org/10.1007/s13762-021-03612-8

Rani A., Snyder S., Kim H., Lei Z., Pan S. (2022), *Pathways to a net-zero-carbon water sector through energy-extracting wastewater technologies*, „Clean Water", vol. 5(1), s. 1–17, https://doi.org/10.1038/s41545-022-00197-8

Riediger P.I., Marques G., Dalcin A.P., Frediani Jardin P., Magalhães Filho F.M., Persson K.M. (2025), *Improving sanitation strategies through coordinated investment on wastewater treatment reuse and water supply at the watershed scale: A Brazilian view of water security*, „Water Policy", vol. 27(2), s. 182–203, https://doi.org/10.2166/wp.2025.168

Samuelson P.A., Nordhaus W.D. (2010), *Ekonomia*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. (2014), *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*, New York–Columbus: McGraw-Hill Education.

Tietenberg T., Lewis L. (2018), *Environmental and natural resource economics*, New York: Routledge.

Yang J., Li J., van Vliet M.T.H., Jones E., Huang Z., Liu M., Bi J. (2024), *Economic risks hidden in local water pollution and global markets: A retrospective analysis (1995–2010) and future perspectives on sustainable development goal 6*, „Water Research", vol. 244, art. 120627, https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121216

You M., Hu Y., Yan Y., Yao J. (2021), *Speciation Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Municipal Sludge of Huainan, China*, „Molecules", vol. 26(21), art. 6711, https://doi.org/10.3390/molecules26216711

Zhang H., Huang Y., Zhou S., Wei L., Guo Z., Li J. (2020), *Pollution level and risk assessment of heavy metals in sewage sludge from eight wastewater treatment plants in Wuhu City, China*, „Spanish Journal of Agricultural Research", vol. 18(2), art. e1103, https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-15796

Zhang Y., Khan S., Swallow B., Liu W., Zhao M. (2022), *Coupling coordination analysis of China's water resources utilization efficiency and economic development level*, „Journal of Cleaner Production", vol. 357, art. 131897, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133874

Żoczek Ł., Dudziak M. (2022), *Types and valorization of sludge generated in water treatment processes*, „Architecture Civil Engineering Environment", vol. 15(1), s. 115–121, https://doi.org/10.21307/ACEE-2022-010

O autorach

Łukasz Żoczek – wieloletni pracownik spółki wodociągowo-kanalizacyjnej AQUA S.A. Absolwent studiów Executive Doctor of Business Administration i Executive Master of Business Administration Wydziału Nauk Ekonomicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Absolwent Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Dziedziny badawcze: technologie oczyszczania wody i ścieków, zrównoważony rozwój. Współautor artykułów w czasopismach naukowych.

Arkadiusz Kocot – prezes AQUA S.A., z branżą wodno-kanalizacyjną związany od 2007 roku. Absolwent Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu, magister zarządzania finansami przedsiębiorstw. Od 1992 roku sprawował funkcje w zarządach i radach nadzorczych spółek z udziałem kapitału prywatnego, komunalnego i Skarbu Państwa.

Klaudiusz Grübel – doktor habilitowany w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplina inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Profesor Uczelni w Uniwersytecie Bielsko-Bialskim. Dziedziny badawcze: technologia wody i ścieków, zaawansowane metody usuwania zanieczyszczeń. Autor wielu artykułów w czasopismach naukowych i monografiach.

About the Authors

Łukasz Żoczek – a long-standing employee of AQUA S.A., a water and wastewater utility company. A graduate of the Executive Doctor of Business Administration and Executive Master of Business Administration programmes at the Faculty of Economic Sciences of the Polish Academy of Sciences in Warsaw. He also graduated from the Faculty of Management at the University of Bielsko-Biala. His research interests include water and wastewater treatment technologies and sustainable development. He is a co-author of articles published in academic journals.

Arkadiusz Kocot – President of the Management Board of AQUA S.A., associated with the water and wastewater sector since 2007. A graduate of the WSB University in Poznań, with a master's degree in corporate financial management. Since 1992, he has held positions on the management and supervisory boards of companies with private and state-owned companies.

Klaudiusz Grübel – holder of a postdoctoral degree in engineering and technology, in the discipline of environmental engineering, mining and energy. University Professor at the University of Bielsko-

-Biala. His research interests include water and wastewater technology and advanced pollutant removal methods. He is the author of numerous articles published in academic journals and contributions to monographs.

Ten utwór jest dostępny na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa-Na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe.



Open Access