

Wpłynęło 7.05.2019 r.
Zrecenzowano 3.06.2019 r.
Zaakceptowano 14.06.2019 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

REWITALIZACJA

ZEUTROFIZOWANYCH EKOSYSTEMÓW WODNYCH METODĄ BAGROWANIA – PROBLEMY I ROZWIĄZANIA

Andrzej EYMONTT^{ABCDEF}, **Krzysztof WIERZBICKI**^{ABCDEF}

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach

Streszczenie

Rewitalizacja jest procesem wyprowadzania ze stanu kryzysowego obszarów zdegradowanych, prowadzonym w sposób kompleksowy, poprzez zintegrowane działania na rzecz lokalnej społeczności, przestrzeni i gospodarki, skoncentrowane terytorialnie. Istnieje zbieżność realizacji tego procesu z aktualnymi zobowiązaniami Polski wobec Unii Europejskiej i krajowych ustaw dotyczących ochrony ekosystemów wodnych przed degradacją. Mając powyższe na uwadze opisano technologię rewitalizacji wybranych ekosystemów wodnych usytuowanych na obszarach wiejskich, którym grozi degradacja spowodowana eutrofizacją ich wód. Zastosowanie tej technologii umożliwia jednocześnie rolnicze wykorzystanie usuwanych osadów dennych w wybranych ekosystemach w celu zwiększenia żyzności gleby pod względem wzbogacenia w niezbędne pierwiastki, a także polepszenie struktury gleby. Jest to pierwsza tego rodzaju technologia w Polsce, jak również, według rozpoznanego stanu wiedzy, na świecie.

Słowa kluczowe: ekosystemy wodne, rewitalizacja, wydobywanie osadów dennych

WSTĘP

Proces wyprowadzania ze stanu kryzysowego obszarów zdegradowanych, realizowany przez interesariuszy rewitalizacji w sposób kompleksowy, poprzez zintegrowane działania na rzecz lokalnej społeczności, przestrzeni i gospodarki, skoncentrowany terytorialnie, może być prowadzony na podstawie gminnego programu, zgodnie z Ustawą o rewitalizacji [2015], z wykorzystaniem „Praktycznego komentarza” do ww. ustawy opracowanego przez LESZCZYŃSKIEGO i KADŁUBOWSKIEGO

Do cytowania For citation: Eymontt A., Wierzbicki K. 2019. Rewitalizacja zeutrofizowanych ekosystemów wodnych metodą bagrowania – problemy i rozwiązania. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 19. Z. 2 (66) s. 21–37.

[2016]. Ponadto, działania te są zbieżne z Dyrektywami 2000/60/WE i 2008/105/WE, 2004/35/WE oraz ustawą „Prawo wodne” z 20 lipca 2017 r.

Obszarami zdegradowanymi w odniesieniu do ekosystemów wodnych są te, w których zgromadzona woda uległa eutrofizacji. Proces ten jest wynikiem nadmiernego wzbogacania wody w mineralne składniki odżywcze w rezultacie niekontrolowanej działalności gospodarczej człowieka (nieodpowiednia utylizacja ścieków bytowo-gospodarczych i innych, nieprzestrzeganie przepisów dotyczących nawożenia mineralnego i organicznego), działalnością niektórych gałęzi przemysłu (m.in. spożywczego) itd. Na tempo tego procesu w największym stopniu wpływa ładunek fosforu, a także innych składników odżywczych powodujący zwiększenie żyzności wody, a w rezultacie zakwit glonów i innej roślinności, skutkujący m.in. deficytem tlenu w wodzie i osadach dennych. Jednym z bardziej zauważalnych przez człowieka zjawisk eutrofizacji wody jest masowy rozwój fitoplanktonu o dużym stężeniu azotu i fosforu, skutkujący m. in. zakwitaniem cyjanobakterii (sinic) produkujących cyjanotoksyny zagrażających zdrowiu oraz życiu ludzi i zwierząt. W Polsce występowanie cyjanotoksyn stwierdzono w zbiornikach użytkowanych rekreacyjnie, m.in. Sulejrowskim, Jeziorsko, Włocławskim, Siemianówka, a także w rzekach Warta i Narew [MĄDRECKA 2015]. Rekreacja czy też czerpanie ze zbiorników wody skażonej cyjanobakteriami mogą być niebezpieczne lub bardzo kosztowne.

Objawem skrajnej eutrofizacji wód, określanej terminem politrofii lub hipertrofii jest, zdaniem BAJKOWSKIEJ-GRABOWSKIEJ [2013], saprobizacja – stan wynikający z nadmiernej dostawy i kumulacji ładunków organicznych, prowadzących do przewagi warunków beztlenowych oraz organizmów polisaprobowych (grzyby, bakterie – patogenne mikroorganizmy hamujące naturalne procesy mineralizacji osadów dennych i wywołujące procesy gnilne). W efekcie eutrofizacja wód powoduje niekorzystne zmiany jakościowe i ilościowe na wszystkich poziomach troficznych; proces ten wzmaga się wraz ze wzrostem temperatury.

BAJKIEWICZ-GRABOWSKA [2013], oceniając stan wód powierzchniowych i występujących w nich różnorodnych ekosystemów, stwierdza m.in.:

- są one ważne dla zachowania różnorodności i cykliczności procesów biochemicznych w środowisku przyrodniczym;
- stanowią miejsce cyklicznych przemian materii organicznej i mineralnej, będących podstawą samoodnawiania się ich wartości użytkowych i walorów przyrodniczych;
- są to niezwykle ważne siedliska umożliwiające zachowanie różnorodności biologicznej zgromadzonych gatunków (w tym zagrożonych), a także obszarem alimentacji (zlewnią) stanowiącej istotny składnik krajobrazu.

Wobec powyższego przed rozpoczęciem rewitalizacji ww. ekosystemów należy przeprowadzić diagnozę, w której powinno się uwzględnić:

- wskaźnik presji środowiskowych, które decydują o tempie eutrofizacji jezior; są to wskaźniki „naturalne”, wynikające z typu geoekosystemu jeziora, oraz „antropogeniczne”, oceniane wielkością ładunku trafiającego do jeziora;
- wskaźniki stanu środowiska, które określają jakość wody i stabilność zasobów wodnych jeziora;
- wskaźniki reakcji, które informują o stanie zaawansowania eutrofizacji jeziora;
- wskaźnik perspektywy przywrócenia/utrzymania dobrego stanu ekologicznego jeziora.

DOTYCHCZAS STOSOWANE METODY REWITALIZACJI ZDEGRADOWANYCH EKOSYSTEMÓW WODNYCH

Zagadnieniu dotychczas stosowanych metod rewitalizacji zdegradowanych ekosystemów wodnych poświęcono szereg publikacji [BROGOWSKI i in. 2017; EYMONTT, WIERZBICKI 2015; ZAWADZKI 2017], a syntetycznie zostało ono opisane przez SIUDĘ i CHRÓSTA [2015] jak poniżej.

„Substancje biogenne krążące w zbiornikach wodnych mogą być z nich eliminowane następującymi metodami:

- mechanicznymi (bagrowanie, usuwanie wód z głębszych partii (hipolimnionu), przepłukiwanie wodami uboższymi w związku odżywcze itp.);
- oddziaływaniami na procesy fizykochemiczne zachodzące w wodach (natlenianie, stratyfikacja, wytrącanie związków fosforu) opisane szczegółowo m.in. przez KOSTECKIEGO [2014];
- ingerencją w łańcuchy i sieci troficzne (biomanipulację – prowadzącą do intensyfikacji naturalnych procesów samooczyszczania się wód zachodzących w zbiornikach, jak odłowy ryb karpowatych, restytucja zespołów roślinności zanurzonej, stosowanie probiotyków środowiskowych zawierających mikroorganizmy i ich enzymy)”.

Mnogość wymienionych technologii świadczy o bardzo złożonym procesie, który należy przeprowadzić podczas rewitalizacji ekosystemów wodnych, aby jednocześnie uniknąć nowych zagrożeń dla środowiska wynikających ze stosowania działań rewitalizacyjnych.

Dlatego też przed podjęciem decyzji o zastosowaniu danej technologii BAJKIEWICZ-GRABOWSKA [2013] zaleca przeprowadzenie wymienionej uprzednio diagnozy stanu ekosystemu wodnego.

Dotychczas stosowane technologie są ukierunkowane na rewitalizację ekosystemów wodnych, a wydobywanie osadów dennych metodą bagrowania uznano za kosztowną i kłopotliwą ze względu na znaczne ich uwodnienie (ponad 80%), ale jednocześnie za metodę najbardziej skuteczną [KOSTECKI 2014]. Pozostałe technologie ukierunkowane są na pozostawienie osadów dennych bez wydobywania ich oraz unieszkodliwienie w ekosystemie wodnym, aby nie powodowały dalszej eu-

trofizacji wody, co – zdaniem autorów niniejszej pracy – jest nieracjonalne. Pomija się istotne fakty, a mianowicie wartość nawozową osadów dennych i ich ponowne wniesienie do gleby, skąd w większości pochodzą, a w której pełnią funkcje regeneracyjne wobec jej struktury.

Przykładem nieuwzględnienia tych korzyści może być przeprowadzona w 2017–2018 r. rewitalizacja jeziora Gołdap o powierzchni 160 ha, gdzie przyjęto technologię stosowaną w Niemczech, polegającą na rozprowadzeniu po powierzchni wody w jeziorze substancji absorbującej fosforany; w jej skład wchodzi glinki bentonitowe oraz lantan. Opadająca mieszanina łączy się w trwałe związki chemiczne z fosforanami i azotanami, tworząc na dnie izolacyjną warstwę uniemożliwiającą kontakt osadów dennych z wodą, tym samym przenikanie z nich biogenów. Niewątpliwą zaletą rewitalizacji z zastosowaniem tej technologii jest uzyskanie po roku widocznych korzystnych rezultatów, ale koszt w przeliczeniu na 1 ha, wynoszący 26 000 zł, może okazać się wysoki, jeśli trwałość zabiegu będzie krótka, a to zależy m.in. od staranności przeprowadzenia tego zabiegu [ŁAWNICZAK i in. 2015]. Dodatkowym, negatywnym rezultatem tego rozwiązania jest zatrzymanie na dnie zbiornika związków fosforu pożądaných w rolnictwie.

Tego rodzaju technologie zostały dotychczas zastosowane w Polsce i opisane m.in. przez KOSTECKIEGO [2014] oraz PIKULĘ i HESEGO [2015]. Brak natomiast wyników badań trwałości utworzonej w ten sposób bariery oraz procesów zachodzących w osadach dennych pod nią.

KOSTECKI [2014] stwierdził, że wydobywanie osadów dennych z ekosystemów wodnych jest najbardziej skuteczną metodą. Jednocześnie BROGOWSKI i in. [2017] oraz GAŁKA i WIATKOWSKI [2010] na podstawie badań podają, że osady denne charakteryzują się właściwościami nawozowymi zbliżonymi do obornika. Ponadto mogą one zmniejszyć spływy powierzchniowe po nawożeniu użytków rolnych dzięki poprawie struktury gleby i przyswajalności naturalnych substancji odżywczych przez rośliny, a także zwiększyć wodną retencję glebową.

Wymienione powyżej korzystne właściwości omawianych osadów nie były dotychczas dostrzegane. Podstawową przyczyną był brak upowszechnienia dotychczas uzyskanych wyników badań oraz stosowanie technologii dostosowanych do wydobywania żwiru lub piasku na potrzeby budownictwa. Wydobywanie wodnionych osadów bogatych w części pochodzenia organicznego i pylistych części mineralnych stwarzało zbyt dużo problemów z dostosowaniem ich do nawożenia tradycyjnymi technologiami (rozrzutnikiem obornika).

Analiza i ocena tematycznej literatury oraz wyniki badań obcych i własnych dały podstawy do sformułowania niżej podanych stwierdzeń.

Wśród wielu publikacji dotyczących ochrony wybranych ekosystemów wodnych (jeziora, zbiorniki zaporowe itp.) pojawiają się dość często sprzeczne opinie, np. dotyczące zawartości metali ciężkich [BROGOWSKI i in. 2017; SIEBIELEC i in. 2015] lub też możliwości zastosowania do wydobywania osadów dennych o dużej zawartości części organicznych pogłębiarek (bagrowanie) wyposażonych w wirow-

we pompy ssące [EYMONTT, WIERZBICKI 2015; WIERZBICKI, EYMONTT 2017]. Nie ulega najmniejszej wątpliwości, że przed podjęciem decyzji o wydobywaniu osadów dennych należy poddać je badaniom pod względem fizycznym, chemicznym i przydatności dla rolnictwa, a ponadto po uzyskaniu ww. wyników należy zastosować odpowiednie technologie wydobywania [EYMONTT, WIERZBICKI 2015]. Szczególnie istotne jest określenie w osadach dennych zawartości węgla organicznego, którego zasoby maleją od wielu lat [BROGOWSKI i in 2017; LAL 2000; 2009], a ponadto określenie zasobności w fosfor, którego naturalne źródła w postaci fosforanów gwałtownie zmaleły na świecie [PODEWILS 2014]. Również niejednolite są opinie o potrzebie ingerencji w naturalne procesy związane z istnieniem ekosystemów wodnych, która chroniłaby te ekosystemy przed degradacją. Zapewne ingerencje te w wielu przypadkach są konieczne, zważywszy na degradujący wpływ na środowisko rolnictwa, w tym chemizacji, stosowania nawozów sztucznych, rozwoju skoncentrowanej w fermach hodowli i chowu zwierząt. Istotny jest bowiem fakt, że przeważająca liczba ekosystemów wodnych jest usytuowana na obszarach wiejskich, które są wyposażone w nowe technologie, nie zawsze wystarczająco sprawdzone pod względem oddziaływania na środowisko.

RACJONALNA TECHNOLOGIA REWITALIZACJI EKOSYSTEMÓW WODNYCH

Racjonalna technologia rewitalizacji ekosystemów wodnych powinna uwzględniać niżej wymienione aspekty.

- A. Zalecenia wymienione w ocenie stanu wód powierzchniowych autorstwa BAKIEWICZ-GRABOWSKIEJ [2013].
- B. Konieczność usuwania osadów dennych ze względu na zabezpieczenie zgromadzonej wody w ekosystemie przed eutrofizacją. Ponadto konieczność ta wynika z faktu, że w Polsce [IGRAS 2006], w przeciwieństwie do większości innych krajów europejskich, zagrożenia jakości gleb są przede wszystkim rezultatem niedoboru składników pokarmowych, ale także silnego zakwaszenia. Istnieje więc realne zagrożenie dalszego pogarszania się zarówno odczynu gleby, jak i jej zasobności w składniki pokarmowe. Tym zagrożeniom można przeciwdziałać, stosując racjonalną technologię wydobywania osadów dennych, a następnie przetwarzając je na nawóz organiczny [BROGOWSKI i in. 2017; EYMONTT, WIERZBICKI 2017; ROSSA, STRZELCZYK 2017].
- C. Właściwości organicznej frakcji osadów dennych, która powyżej pewnej wartości koncentracji granicznej S_{lim} osadów zachowuje się jak ciało plastyczno-lepkie, a poniżej tej koncentracji S_{lim} jak zawiesina drobnodispersyjna o właściwościach cieczy newtonowskiej.

Do opisu osadów zachowujących się jak ciało plastyczno-lepkie najczęściej [MADEYSKI 1998, PARZONKA 1977; WIERZBICKI 1982] stosuje się wzór Bingham'a w postaci:

$$\tau = \tau_o + \eta_B G \quad (1)$$

gdzie:

- τ = naprężenie ścinające (Pa);
- τ_o = próg plastyczności (Pa);
- η_B = lepkość (Pa·s);
- G = szybkość ścinania (s^{-1}).

W procesie wydobywania osadów dennych szczególnie istotne jest pozostawienie bez zmian ww. koncentracji granicznej S_{lim} i progu plastyczności.

W sposób przystępny dla niespecjalistów z zakresu reologii można ten warunek zapisać zależnością:

$$\tau_o \geq \tau \rightarrow G \quad (2)$$

Wzrokowo zależność ta będzie się objawiać np. brakiem płynięcia farby po pionowej ścianie. Jednocześnie, gdy zwiększać się będzie szybkość ścinania (np. po wzroście temperatury), nastąpi zjawisko płynięcia farby, co jest charakterystyczne dla cieczy pseudoplastycznych [SCHRAM 1998]. Tak też zachowują się osady denne, a technologia ich wydobywania musi uwzględniać te właściwości, jeśli mają być wydobywane w stanie małego uwodnienia.

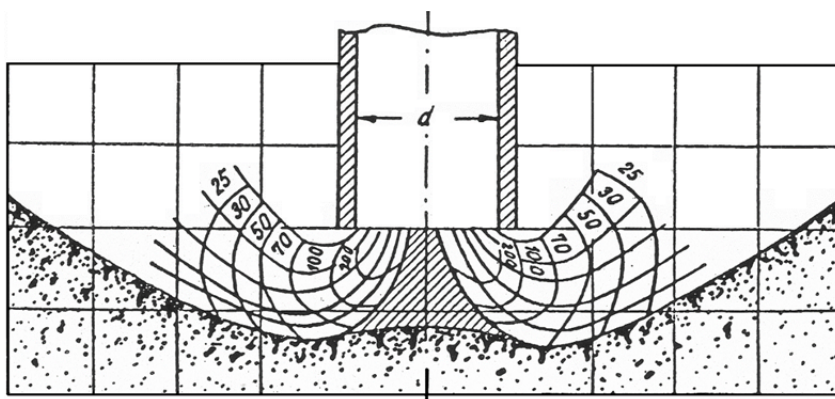
Wszystkie dotychczas stosowane technologie wydobywania osadów dennych (bagrowania), które w sposób syntetyczny opisał KLAPPER [1991], nie ujmują zależności opisanych wzorem Bingham'a (1) i nie mogą być stosowane do wydobywania osadów z dużą zawartością części pochodzenia organicznego i drobnych mineralnego ze względu na dużą zawartość wody, ponad 80%.

- D. Środowiskowe wymagania dotyczące toni ekosystemu wodnego odnośnie do terminów wydobywania osadów dennych, które należy dostosować do okresów w ciągu roku określonych m.in. przez BORSUKA [2014], przy najmniejszej zawartości masy organicznej w sestonie i największej przezroczystości wody. A zatem proces wydobywania w możliwie jak najmniejszym stopniu powinien wpływać na zastany stan toni.
- E. Mając na uwadze dużą zmienność składników nawozowych i składu granulometrycznego osadów dennych z jezior, zbiorników wodnych i stawów rybnych, należy przewidywać konieczność dodawania do wydobytych osadów odpowiednich komponentów sorbujących wodę w celu uzyskania kalibrowanego nawozu zgodnego z wymaganiami, a zarazem dostosowanego do wybranej technologii rozpraszania po powierzchni lub pod powierzchnią pola (hydroobsiew, rozrzucanie obornika itp.).

DLACZEGO DOTYCHCZASOWE TECHNOLOGIE WYDOBYWANIA OSADÓW DENNYCH (BAGROWANIE) NIE SĄ PRZYDATNE W INNOWACYJNEJ REWITALIZACJI EKOSYSTEMÓW WODNYCH

Od początku technikę bagrowania rozwijano w celu pozyskania żwiru, piasku, a więc materiałów potrzebnych dla budownictwa lądowego i wodnego. Osady dennie o średnicach ziaren poniżej 1 mm były bezużyteczne. Podejmowane próby wydobywania tych osadów z racji nieodpowiedniej techniki okazały się nieefektywne i z tej też przyczyny kosztowne, na co zwracali uwagę m.in. SIUDA i CHRÓST [2015] oraz EYMONTT i WIERZBICKI [2015; 2017].

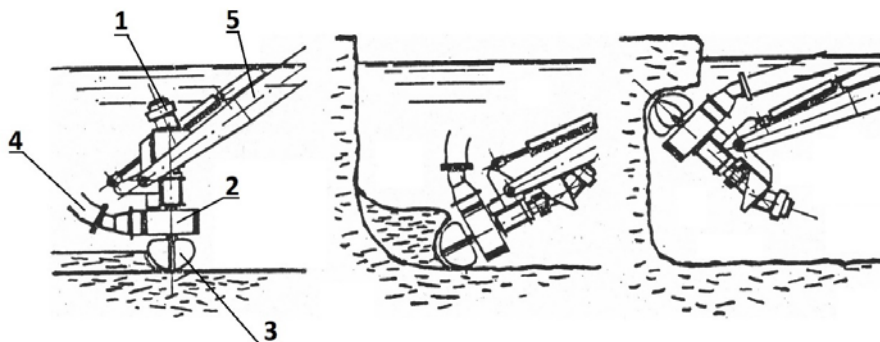
Dowodem jest tu m.in. wynik doświadczeń VOLNINA [1965] ilustrujący rozkład pól prędkości podczas zasysania osadu dennego, którego rezultat przedstawiono na rysunku 1.



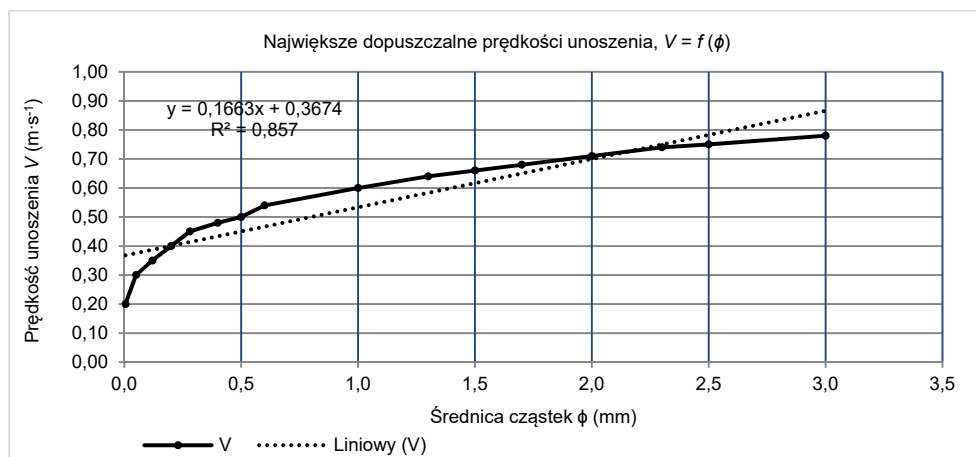
Rys. 1. Rozkład pól prędkości podczas zasysania osadu dennego rurociągiem pogłębiarki; (dane z eksperymentu: d = średnica rurociągu 37 mm; d_{sr} = średnie uziarnienie osadu 0,75 mm, V = prędkość zasysania ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$); źródło: VOLNIN [1965])

Zasysanie osadu dennego rurociągiem ssawnym pogłębiarki będzie nieefektywne, gdyż w warunkach nawet małej różnicy gęstości woda–osad zawsze będzie zasysana większa objętość wody.

Do wydobywania osadów często na końcu rurociągu ssawnego montowano wirujący frez (rys. 2), którego zadaniem było spulchnianie warstwy osadu, co było uzasadnione w przypadku wydobywania gruntów zwięzłych oraz piasku i żwiru. Natomiast w przeważającej większości przypadków tego rodzaju spulchnianie powoduje rozproszenie części stałych osadu i zmniejszenie jego koncentracji w pompowanej wodzie. Skutki tego spulchniania są widoczne, jeśli przeanalizuje się przebieg zależności zilustrowanej na rysunku 3. Stwierdzić można, że ziarna osadu o średnicy poniżej 1 mm są unoszone w warunkach bardzo małych prędkości (od $0,2$ do $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



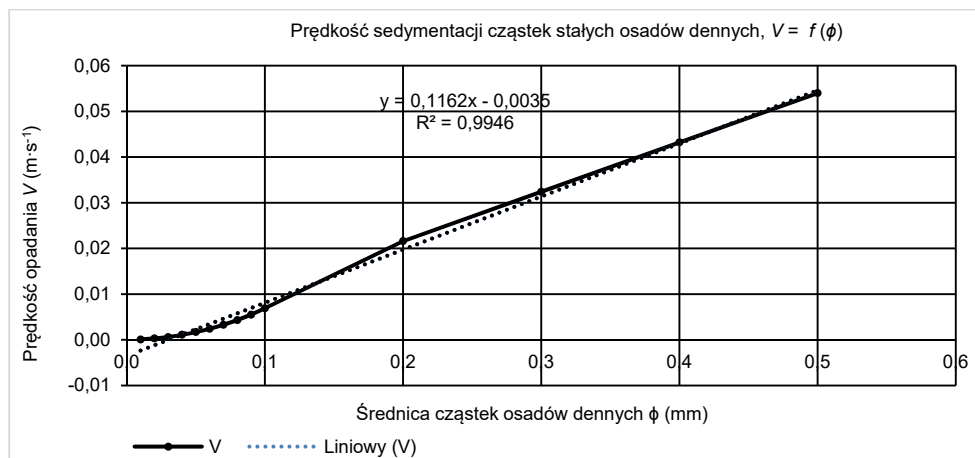
Rys. 2. Zasysanie osadu dennego pogłębiarką wyposażoną w spulchniacz; 1 = silnik hydrauliczny; 2 = pompa; 3 = frez; 4 = rurociąg tłoczny; 5 = wysięgnik; źródło: PARZONKA, WIERZBICKI [1965]



Rys. 3. Wykres prędkości unoszenia cząstek w wodzie; źródło: WOŁOZYN [1974]

Wobec powyższego ziarna te na ogół nie będą zasysane przez pogłębiarkę ssącą czy innego rodzaju zespół wydobywczy osadu (np. kubelki), lecz zostaną porwane przez nurt wody lub też zawisną w toni zbiornika [BORSUK 2014]. Skutki zmaczenia wody w zbiorniku będą długotrwałe, szczególnie długo będą utrzymywały się w stanie zwieszenia cząstki poniżej 0,01 mm, co ilustruje wykres sedimentacji cząstek na rysunku 4. Zmniejszenie dostępu światła do głębszych warstw wody będzie ponadto sprzyjać eutrofizacji wody w zbiorniku.

Reasumując powyższe informacje, można wykluczyć wydobywanie osadów dennych za pomocą dotychczas stosowanych technologii, w sposób umożliwiający przetwarzanie tych osadów na nawozy organiczne. Wyniki badań LAMPERTA i SOMMERA [1996], KAJAKA [1998], KENTZERA [2001], SOBCZYŃSKIEGO i JONIAKA [2009] oraz SIWEK [2011] wskazują, że w osadach dennych kumuluje się o wiele więcej fosforu niż w pozostałych partiach ekosystemu. Należy podkreślić,



Rys. 4. Prędkość sedimentacji cząstek stałych w wodzie; źródło: WOŁOSZYN [1974]

że w większości przypadków ok. 90% łącznej zawartości fosforu znajduje się w wierzchniej warstwie osadów dennych o grubości 10 cm. Warstwa osadów o tej grubości może być wydobywana jedynie z zastosowaniem opisanej, racjonalnej technologii.

INNOWACYJNE ROZWIĄZANIE PROBLEMU WYDOBYWANIA OSADÓW DENNYCH W PROCESIE REKULTYWACJI ZBIORNIKÓW WODNYCH

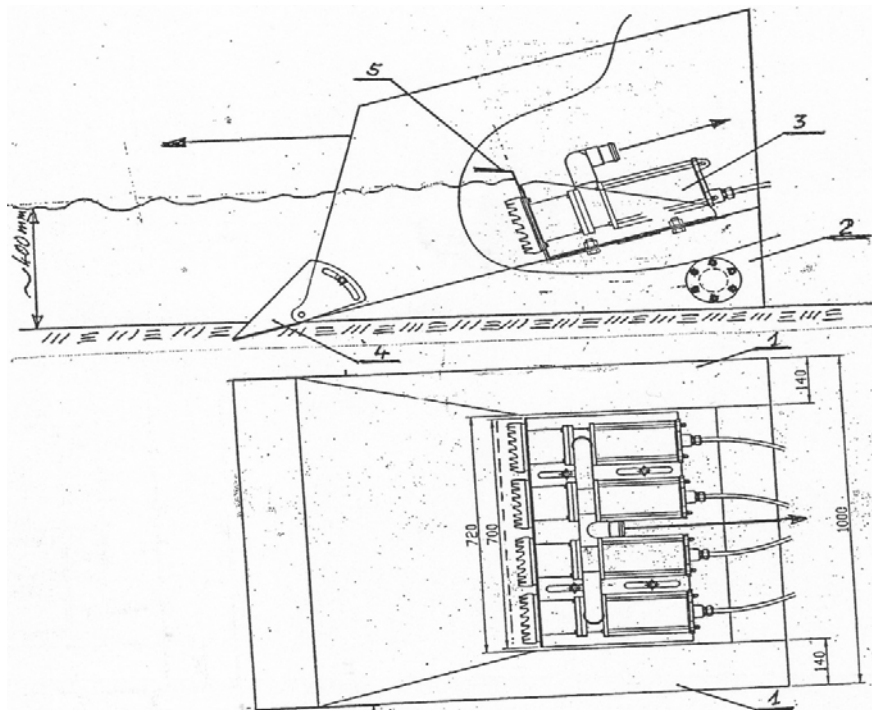
Za główny cel uznano potrzebę wydobywania ze zbiorników wodnych osadów dennych zasobnych w składniki nawozowe o średnicach ziaren poniżej 1 mm, co może zmniejszyć zagrożenie wód eutrofizacją oraz zwiększyć pojemność wodną zbiorników retencyjnych. Wobec powyższego należy zbudować urządzenie poruszające się poniżej prędkości rozmywającej ziarna części stałych, korzystnie pod powierzchnią wody, zbierające górną warstwę osadów najbardziej zasobną w fosfor i zagrażającą eutrofizacją. Wydobywanie tej warstwy nie powinno powodować zwiększenia masy organicznej w sestonie, a tym samym zmniejszenia przezroczystości wody, mając na uwadze długotrwałe procesy sedimentacji części stałych pochodzenia organicznego i mineralnego. Terminy wydobywania należy dostosować do okresów w ciągu roku wynikających z badań BORSUKA [2014], przy najmniejszej zawartości masy organicznej w sestonie i największej przezroczystości wody.

W celu potwierdzenia ww. założeń zbudowano w wyspecjalizowanej firmie model pogłębiarki ze wsparciem finansowym Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (Projekt RPMA 01.02.004/4-4539/16), według założeń konstrukcyjnych Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego, Oddział w Warszawie.

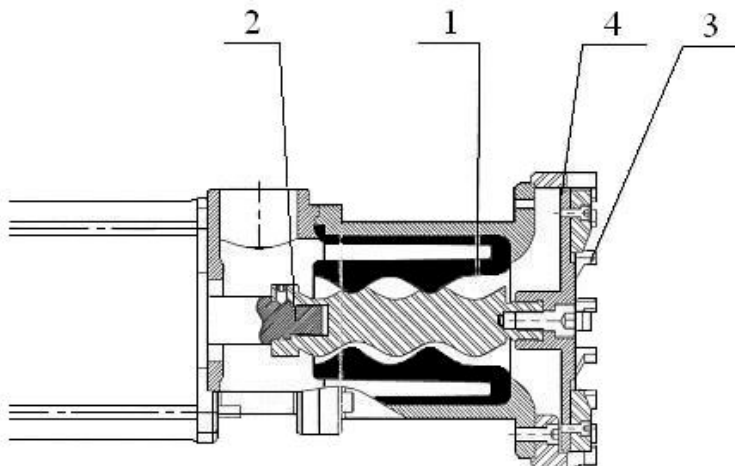
Model pogłębiarki (rys. 5) składa się z trzech zespołów.

1. Szufła (rys. 5) wykonana z dwóch prostokątnych pływaków bocznych ukształtowanych ukośnie z wewnętrznej i górnej strony oraz zespolonego pływaka dolnego o szerokości 1000 mm i ukośnej górnej płaszczyzny, na której zamocowano cztery agregaty pompowe oraz w przedniej części lemiesz o regulowanym kącie natarcia. W pływakach bocznym i dolnym wykonano otwory umożliwiające wypełnienie przestrzeni pływaków wodą lub piaskiem w celu równoważenia sumarycznego wyporu pływaków z masą szufli pogłębiarki.

Do hydrotransportu osadów dennych wybrano wyporowe agregaty pompowe z jednozwojnym rotorem współpracującym z dwuzwojnym gumowym statorem (rys. 6). W przedniej części rotora na wale silnika elektrycznego zamocowano wirnik rozdrabniający części stałe (2), wewnątrz uzębionej obudowy (3). Silnik napędowy pompy o mocy 1,1 kW i obrotach wału $1450 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ jest dostosowany do pracy pod powierzchnią wody i zewnętrznego ciśnienia do 10 m słupa wody. Króćce tłoczne pomp są zespolone kolektorem połączonym z rurociągiem tłocznym, na którym zainstalowano konsystometr mierzący stopień koncentracji części stałych w hydromieszaniu. Silniki elektryczne pomp są zasilane w energię elektryczną ze spalinowego agregatu prądowczego umieszczonego na drugim zespole.

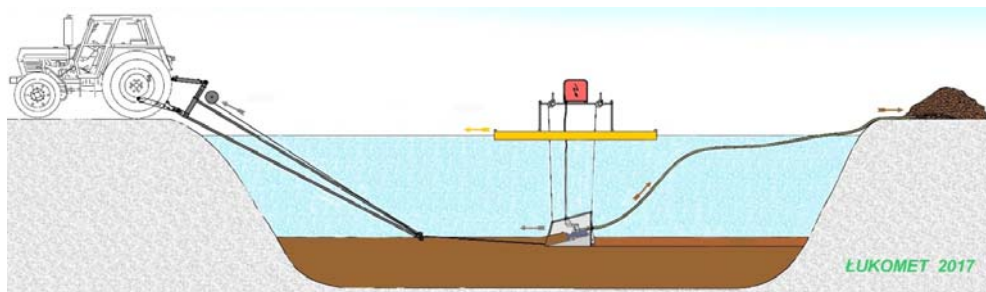


Rys. 5. Schemat konstrukcji części roboczej pogłębiarki;
1 = szufła, 2 = korpus, 3 = pompy, 4 = osłony boczne; źródło: Łukomet



Rys. 6. Pompa woporowa z rozdrabniaczem części stałych; 1 = stator, 2 = wał napędowy, 3 = noże rozdrabniające, 4 = korpus rozdrabniacza; źródło: Łukomet

2. Zespół drugi (rys. 7) jest wykonany w formie katamaranu, na którym umocowano agregat prądotwórczy oraz skrzynkę sterowniczą zasilające w energię elektryczną cztery silniki elektryczne. Ponadto na nośnej konstrukcji katamaranu umieszczono cztery ręczne wciągarki linowe, na których zawieszono wyżej opisaną szufłę w celu regulowania jej położenia względem poziomu wody. Obsługujący pogłębiarkę ma odpowiednio przygotowane stanowisko umożliwiające jej sterowanie.
3. Trzecim zespołem jest wciągarka linowa napędzana silnikiem hydraulicznym zamocowana na wysięgniku długości 6 m, mocowanym do trzypunktowego zawieszenia ciągnika rolniczego. Wysięgnik ten umożliwia opuszczenie lub też wydobywanie obu zespołów pogłębiarki ze zbiornika wodnego. Po zwodowaniu pogłębiarki ciągnik zajmuje pozycję na przeciwległym brzegu zbiornika, a lina wciągarki zostaje zamocowana do szufli. W tym momencie wysięgnik jest tak



Rys. 7. Schemat przemieszczenia odmularki przeciąganej typu T 808 produkcji Łukomet; źródło: Łukomet

opuszczony, aby zblocze liny wciągarki znajdowało się w górnym poziomie osadów dennych. Schemat ustawienia pogłębiarki i ciągnika zilustrowano na rysunku 7.

Po uruchomieniu wciągarki następuje przemieszczanie szufl i skrawanie warstwy urobku o szerokości 1 m i założonej grubości, np. ok. 0,23 m. Warstwa ta ulega zacieśnieniu do szerokości 0,7 m. W wyniku przemieszczania szufl na króćce ssawne pomp napiera wówczas warstwa o powierzchni ok. 0,16 m². Fundamentalną zasadą pracy pogłębiarki jest, aby ta napierająca warstwa miała nieco większą objętość od sumarycznej wydajności pomp. W takich warunkach uzyskuje się możliwość maksymalnej koncentracji składnika stałego w hydromieszaninie, który jest zawarty w skrawanym osadzie dennym do szufl. Znaczącą z charakterystyki zakres wydajności czterech pomp wynoszący od 11,52 do 3 m³·h⁻¹ w zależności od wysokości tłoczenia, można obliczyć zakres prędkości przemieszczania się szufl, który wynosi od 0,01 do 0,015 m·s⁻¹, średnio 0,0125 m·s⁻¹, a wówczas można wydobywać średnio 7,2 m³·h⁻¹ osadów dennych. Zakres prędkości przemieszczania się szufl jest dodatkowo kontrolowany za pośrednictwem konsystometru. Wskazuje on aktualną gęstość tłoczonej hydromieszaniny; jeżeli jest ona zbyt mała, należy zwiększyć prędkość przemieszczania szufl lub też zmniejszyć, jeśli jest zbyt duża. Dodatkowymi wskaźnikami natężenia przepływu hydromieszaniny są mierniki natężenia prądu zasilającego silniki agregatów pompowych.

Dzięki odpowiednio dobranym parametrom pogłębiarki jej prędkość przemieszczania szufl jest znacznie mniejsza (ok. 16 razy) od prędkości unoszenia (rozmywającej) osady denne o dużej zawartości pyłów (średnica $d = 0,005$ mm), która wynosi 0,2 m·s⁻¹ [WOŁOŻYŃ 1974].

W warunkach tak znacznej różnicy ww. prędkości i wprowadzenia dodatkowej osłony nad króćcami ssawnymi pomp (rys. 5) istnieje możliwość wydobywania osadów dennych o dużej koncentracji składnika stałego pochodzenia mineralnego i organicznego, co udokumentowano na fotografii 1.

Wyposażenie pogłębiarki w pompy wyporowe umożliwia uzyskanie maksymalnej wysokości ciśnienia do 80 m słupa wody. W warunkach wydajności 5 m³·h⁻¹, ciśnienia na kolektorze 65 m słupa wody, rurociągu tłocznego o średnicy wewnętrznej 45 mm i prędkości przepływu $v = 1$ m³·h⁻¹ mieszaniny o koncentracji $S = 3,32\%$ straty hydrauliczne wyniosą 0,0284 m·m⁻¹, co umożliwia transportowanie wody na odległość do 2320 m. Gdy koncentracja hydromieszaniny będzie wynosiła ok. 10%, straty te wzrosną – w warunkach $v = 1$ m·s⁻¹ odległość transportu wyniesie $L = 300$ m, a w warunkach $v_{sr} = 2$ m·s⁻¹ odległość ta skróci się do 232 m.

Przewidziano również dalszy rozwój konstrukcji pogłębiarki w kierunku zwiększenia jej wydajności oraz możliwości samodzielnego poruszania się po dnie zbiornika. Wydajność pogłębiarki zwiększyłaby się wówczas od 15 do 30 m³·h⁻¹ w zależności od odległości transportu hydraulicznego (wysokości strat hydraulicznych). Jednostkowe zapotrzebowanie na energię wynosiłoby od 1,1 do 0,41 kWh·m⁻³ wydobytych osadów. Parametry te świadczą o wysokiej sprawności pro-



Fot. 1. Wydobyty osad denny o konsystencji zaprawy betonowej (fot. K. Wierzbicki)

ponowanej technologii. Natomiast zapewnienie dobrych właściwości trakcyjnych pogłębiarki będzie wymagać dalszych badań.

Praktyczne szerokie zastosowanie opisanej w artykule technologii rewitalizacji ekosystemów wodnych może przynieść, ze względu na możliwość wykorzystania milionów ton osadów zalegających w akwenach, znaczące efekty ekonomiczne. Wymaga to jednak podjęcia działań związanych z uzyskaniem środków finansowych na pokrycie kosztów wdrożenia tej technologii do praktyki. Źródłem tych środków powinien być Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz przeznaczone na ochronę środowiska fundusze Unii Europejskiej.

PODSUMOWANIE

Wykorzystując dotychczas zebrane krajowe i zagraniczne doświadczenia dotyczące ochrony ekosystemów wodnych przed degradacją wywołaną procesem eutrofizacji, przedstawiono nowe możliwości ich rewitalizacji. Zastosowanie opisanych w artykule technologii rewitalizacji umożliwia wydobywanie osadów dennych, powodujących tę eutrofizację, w sposób minimalizujący szkodliwość osadów i niekorzystny wpływ procesu wydobywania na naturalne środowisko wodne. Jednocześnie zastosowanie osadów jako składnika nawozów organicznych umożliwia poprawę dobrostanu gleby, zwiększając zawartość niezbędnych związków chemicznych (fosfor, azot, węgiel, wapno) oraz przyczynia się do polepszenia struktury gleby i zwiększenia jej wodnej retencji.

BIBLIOGRAFIA

- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E. 2013. Czyste jeziora Pomorza. W: Biologizacja warunkiem zdrowego środowiska i ekonomicznego rolnictwa [Clear Pomeranian lakes. In: Biologization as a condition for a healthy environment and economic agriculture]. Materiały pokonferencyjne. Toruń. Urząd Marszałkowski woj. Kujawsko-Pomorskiego s. 45–57.
- BORSUK S. 2014. Ekologiczno-geochemiczny system oceny jakości wód jeziornych [Ecological and geochemical system for evaluation the quality of lake waters]. Bydgoszcz. Wydaw. Uczeln. UTP. ISBN 978-93-64235-19-1 ss. 18
- BROGOWSKI Z., BURZYŃSKA I., EYMONTT A., WIERZBICKI K. 2017. Możliwości wykorzystania osadów dennych w rolnictwie [Possibilities of using bottom sediments in agriculture]. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie. Nr 1 s. 37–43.
- EYMONTT A., WIERZBICKI K. 2015. Analiza i ocena możliwości wydobywania antropogenicznych osadów dennych z jezior, zbiorników i cieków wodnych [Analysis and evaluation of the possibility of mining anthropogenic bottom sediments from lakes, reservoirs and watercourses]. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie. Nr (3)446 s. 113–120.
- EYMONTT A., WIERZBICKI K. 2017. Nowe możliwości rewitalizacji małych zbiorników wodnych [New options for revitalizing small water reservoirs]. Mazowsze. Studia Regionalne. Nr 21 s. 61–77. DOI 1021858/msr.
- GAŁKA B., WIATKOWSKI M. 2010. Charakterystyka osadów dennych zbiornika zaporowego Młyny oraz możliwości ich rolniczego wykorzystania [Characteristics of bottom sediments of the Młyny dam reservoir and the possibilities of their agricultural use]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 10. Z. 4(32) s. 53–63.
- IGRAS J. 2006. Środowiskowe skutki nawożenia roślin w Polsce [Environmental effects of plant fertilization in Poland]. Problemy Inżynierii Rolniczej. Nr 1 s. 83–91.
- JUDA J., CHRÓŚCIEL S. 1974. Ochrona powietrza atmosferycznego [Atmospheric air protection]. Warszawa. WNT ss. 488.
- KAJAK Z. 1998. Hydrobiologia – limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych [Hydrobiology – limnology. Inland water ecosystems]. Warszawa. PWN. ISBN 83-0112537-3 ss. 355.
- KENTZER A. 2001. Fosfor i jego biologicznie dostępne frakcje w osadach jezior różnej trofii [Phosphorus and its biologically available fractions in lake sediments of various trophies]. Toruń. Wydaw. Nauk. UMK. ISBN 8323113033 ss. 111.
- KLAPPER H. 1991. Control of eutrophication in inland waters. London, Toronto, Sydney, Tokyo, Singapore. Ellis Horwood Series in Water and Wastewater Technology. ISBN 0131748300 ss. 337.
- KOSTECKI M. 2014. Rekultywacja antropogenicznego zbiornika wodnego Pławniowice metodą usuwania hypolimnionu – studium limnologiczne [Reclamation of the anthropogenic Pławniowice water reservoir by the hypolimnion removal method – a limnological study]. Works and Studies. Nr 84. Zabrze. IPIŚ PAN. ISBN 978-83-60877-09-8 ss. 215.
- LAL R. 2000. Węgiel aktywny i nasilenie efektu cieplarnianego [Activated carbon and intensification of the greenhouse effect]. Falenty. IMUZ. Zeszyty Edukacyjne. Nr 6 s. 22–36.
- LAL R. 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. European Journal of Soil Science. Vol. 60 s. 158–169.
- LAMPERT W., SOMMER U. 1996. Ekologia wód śródlądowych [Ecology of inland waters]. Warszawa. PWN. ISBN 8301133872 ss. 416.
- LESZCZYŃSKI M., KADŁUBOWSKI J. 2016. Ustawa o rewitalizacji. Praktyczny komentarz [Act on revitalization. A practical comment]. Warszawa. MliB, Dpt. Polityki Przestrzennej ss. 56.
- ŁAWNICZAK A.E., KUTYLA S., ACHTENBERG K. 2015. Ocena sposobu zagospodarowania zlewni i stanu hydromorfologicznego Jeziora Kierskiego. W: Sposoby ochrony i rekultywacji jezior poznańskich [Assessment of the management of the catchment and the hydromorphological state

- of Kierskie Lake. In: *Methods of protection and recultivation of Poznań lakes*. Red. A. Ławniczak. Poznań. Bogucki Wydaw. Nauk. s. 109–132.
- MADEYSKI M. 1998. Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu zamulania stawów rybnych [Hydraulic and rheological characteristics of the silting process of fish ponds]. *Zeszyty Naukowe AR Kraków. Ser. Rozprawy. Z. 236. ISSN 1233-4189* ss. 77.
- MADRECKA B. 2015. Zakwity cyjnobakterii i cyjanotoksyny: zagrożenie dla zdrowia ludzi [Cyanobacteria blooms and cyanotoxins: threat to human health]. *Technologia Wody. Nr 1* s. 44–50.
- PARZONKA W. 1977. Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych [Hydraulic basics of pipe transport of two-phase mixtures]. *Skrypty AR Wrocław. Nr 159* ss. 140.
- PARZONKA W., WIERZBICKI K. 1965. Transport namulów przy robotach melioracyjnych i hydrotechnicznych. W: *Melioracja robót ziemnych [Transport of sediments for drainage and hydrotechnical works. In: Land reclamation of earthworks]. Materiały V Międzynarodowej konferencji. Warszawa. NOT. A-40* ss. 13.
- PIKUŁA K., HEESE T. 2015. Metody rekultywacji jezior. W: *Sposoby ochrony i rekultywacji jezior poznańskich [Methods of lake recultivation. In: Methods of protection and recultivation of Poznań lakes]. Red. A.E. Ławniczak. Poznań. Bogucki Wydaw. Nauk. s. 101–107.*
- PODEWILS W. 2014. Recykling fosforu w Niemczech – stan aktualny i perspektywy [Phosphorus recycling in Germany – current status and perspectives]. *Wodociągi – Kanalizacje. Nr 1(91)* s. 26–30.
- ROSSA L., STRZELCZYK M. 2017. Raport z wstępnych wyników doświadczeń wazonowych dotyczących nawożenia traw mieszkankami substancji półpłynnych z zmikronizowaną słomą. Badania przy zastosowaniu mikronizatu ze słomy [Report on preliminary results of vase experiments on fertilizing grass with mixtures of semi-liquid substances with micronized straw. Research using straw micronizate]. *Maszynopis. Warszawa. ITP* ss. 8.
- SCHRAMM G. 1998. Reologia, podstawy i zastosowania [Rheology, basics and applications]. Poznań. PAN. Ośrodek Wydaw. Nauk. ISBN 83-85481-63-X ss. 272.
- SIEBIELEC S., SIEBIELEC G., SMRECAK B. 2015. Zanieczyszczenie osadów dennych rzek i zbiorników wodnych [Pollution of river and water reservoirs bottom sediments]. *Studia i Raporty IUNG – PIB. Z. 46(20)* s. 163–181.
- SIUDA W., CHRÓST R.J. 2015. Hydrobiotechnologia – biologiczne podstawy, aktualny stan wiedzy i perspektywy rozwoju [Hydrobiotechnology – biological basis, current state of knowledge and development perspectives]. *Technologia Wody. Nr 5(43)* s. 31–41.
- SIEWEK H. 2011. Zachowanie się frakcji mineralnego fosforu w interfacie osad-woda małych zbiorników wodnych na obszarach wiejskich [Behavior of the mineral phosphorus fraction in the sludge-water interface of small water reservoirs in rural areas]. *Szczecin. ZUT. ISBN 978-83-7663-066-3* ss. 90.
- SIEWEK H., WESOŁOWSKI P., BRYŚIEWICZ A., RAFACZ E. 2015. Zawartość fosforu i jego przyswajalnych form w osadach dennych śródpolnych zbiorników wodnych w kontekście ich znaczenia nawozowego [Content of phosphorus and its assimilable forms in bottom sediments of mid-field water reservoirs in the context of their importance for fertilizing]. *Przemysł Chemiczny. Nr 94/6* s. 118–121. DOI 10.15199/62.2015.6.32.
- SOBCZYŃSKI T., JONIAK T. 2009. Differences in composition and proportion of phosphorus fractions in bottom sediments of Lake Góreckie (Wielkopolska National Park). *Environment Protection Engineering. Vol. 35(2)* s. 89–95.
- SOSZKA H., PASZTALENIAC A., KOLADA A. 2016. Is unstable reliable? Oxygen conditions in the ecological status assessment of lakes. *Limnological Review. Vol. 16(2)* s. 85–94.
- VOLNIN B.A. 1965. Tekhnologia gidromekhanizacii v gidrotekhnicheskom stroitel'stve [Hydromechanization technology in hydrotechnical constructions]. Moskwa – Leningrad. *Energia* ss. 199.

- WIERZBICKI K. 1965. Kierunki mechanizacji robót konserwacyjnych w kraju. W: Mechanizacja robót wodno-melioracyjnych [Directions of mechanization of maintenance works in the country. In: Mechanisation of water-reclamation works]. Materiały z konferencji. Gdańsk–Sopot. Wydaw. SITWM s. 163–175.
- WIERZBICKI K. 1982. Transport hydrauliczny w instalacjach rolniczego wykorzystania gnojowicy [Hydraulic transport in installations for the agricultural use of liquid manure]. Warszawa. IBMER ss. 185.
- WIERZBICKI K., EYMONTT A. 2017. Nowe technologie stosowane do usuwania osadów dennych na stawach rybnych. W: Innowacyjne technologie w produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem standardów Unii Europejskiej i ochrony środowiska. Monografia [New technologies used to remove bottom sediments in fishponds. In: Innovative technologies in animal production taking into account the standards of the European Union and environmental protection. Monograph]. Red. W. Romaniuk, H. Jankowska-Huflejt. Falenty–Warszawa. ITP s. 192–197.
- WIERZBICKI K., EYMONTT A., ROSSA L., STRZELCZYK M. 2017. Nowe możliwości wzrostu produkcji roślinnej, a zarazem realizacji strategii Unii Europejskiej. W: Innowacyjne technologie w produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem standardów Unii Europejskiej i ochrony środowiska. Monografia [New opportunities to increase plant production and, at the same time, to implement the European Union strategy. In: Innovative technologies in animal production taking into account the standards of the European Union and environmental protection. Monograph]. Red. W. Romaniuk, H. Jankowska-Huflejt. Falenty–Warszawa. ITP s. 184–191.
- WOŁOZYN J. 1974. Regulacja rzek i potoków [Regulation of rivers and streams]. Warszawa. PWN. ISBN 83-85582-45-2 ss. 463.
- ZAWADZKI P. 2017. Odmulanie zbiorników retencyjnych i oddzielanie wybranych frakcji osadów w separatorze szczelinowym [Removing sediment from water reservoirs and sorting proces of selected sediment fractions by a slotter separator]. Rozprawy Naukowe. Nr 494. Poznań. Wydaw. UP. ISBN 978-83-7160-877-3 ss. 108.

AKTY NORMATYWNE

- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej [Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy]. Dz.U. UE L z dnia 22 grudnia 2000 r. ze sprostowaniami Dz.U.UE.L.2014.124.1 i późn. zm.
- Dyrektywa 2004/35/WE w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu [Directive 2004/35/CE of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage]. Dz.U. UE 2004, L 143 ss. 56.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/105/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej, zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy Rady 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG i 86/280/EWG oraz zmieniająca dyrektywę 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady [Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC and 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council]. OJ L 348 z 24.12.2008 s. 84–97.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/39/UE z dnia 12 sierpnia 2013 r. zmieniająca dyrektywy 2000/60/WE i 2008/105/WE w zakresie substancji priorytetowych w dziedzinie polityki

- wodnej [Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy]. Tekst mający znaczenie dla EOG. OJ L 226 z 24.8.2013 s. 1–17.
- Ustawa z dnia 9 października 2015 r. o rewitalizacji [Act of 9 October 2015 on revitalization]. Dz.U. 2015 r. poz. 1777.
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody [Act of 16 April 2004 on nature protection]. Dz.U. 2004. Nr 92 poz. 880.
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne [Act of 20 July 2017 Water Law]. Dz.U. 2017 poz. 1566 z późn. zm.

Andrzej EYMONTT, Krzysztof WIERZBICKI

REVITALIZATION OF EUTROFICATED WATER ECOSYSTEMS BY THE DREDGING METHOD – PROBLEMS AND SOLUTIONS

Key words: *mining of bottom sediments, revitalization, water ecosystems*

S u m m a r y

Revitalization is the process of deriving from the crisis state degraded areas, conducted in a comprehensive manner, through integrated activities for the benefit of the local community, space and economy, territorially concentrated. There is a convergence in the implementation of this process with Poland's current obligations towards the European Union and national laws regarding the protection of aquatic ecosystems from degradation. Having the above in mind, the technology of revitalization of selected water ecosystems located in rural areas which are threatened with degradation caused by the eutrophication of their waters. Application of this technology enables simultaneous agricultural use of removed bottom sediments in selected ecosystems in order to increase soil fertility in terms of enrichment with necessary elements, as well as improve soil structure. This is the first technology of this type in Poland and also, according to the known state of knowledge, in the world.

Adres do korespondencji: dr hab. inż. Andrzej Eymontt, prof. nadzw., Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Warszawie, ul. Rakowiecka 32, 02-532 Warszawa; e-mail: a.eymontt@itp.edu.pl