

**prof. Silke Wieprecht**

Jest profesorem zwyczajnym w Instytucie Modelowania Systemów Hydraulicznych i Środowiskowych na Uniwersytecie w Stuttgarcie w Niemczech. W centrum jej zainteresowań badawczych jest transport osadów. Specjalizuje się w analizach hydrologicznych i hydraulicznych, ochronie przeciwpowodziowej ze szczególnym uwzględnieniem analizy ryzyka i ekologii wodnej, procesach hydro- i morfodynamicznych w rzekach oraz biostabilizacji drobnych osadów. Odbyla staże badawcze na UiTM w Kuala Lumpur, Norweskim Uniwersytecie Nauki i Technologii w Trondheim i Uniwersytecie Pekinśkim. Jest przewodniczącą kilku krajowych i międzynarodowych komitetów eksperckich. W IAHR od 2005 roku, od 2017 roku pełni funkcję jej wiceprezesa. [silke.wieprecht@iws.uni-stuttgart.de](mailto:silke.wieprecht@iws.uni-stuttgart.de)

# BRUDNE SEKRETY ZBIORNIKÓW ZAPOROWYCH

Wielofunkcyjne zbiorniki zaporowe odgrywają ważną rolę w zaopatrzeniu w wodę, również pitną, a także w nawadnianiu, hydroenergetyce, ochronie przeciwpowodziowej, rekreacji, żegludze itd. Jednocześnie często wywierają niekorzystny, choć niewidoczny wpływ na środowisko i lokalną bioróżnorodność. Owe „brudne sekrety” to m.in. depozycja osadów, zakwity cyjanobakterii i emisja gazów cieplarnianych.

**prof. Silke Wieprecht  
i zespół projektu CHARM**

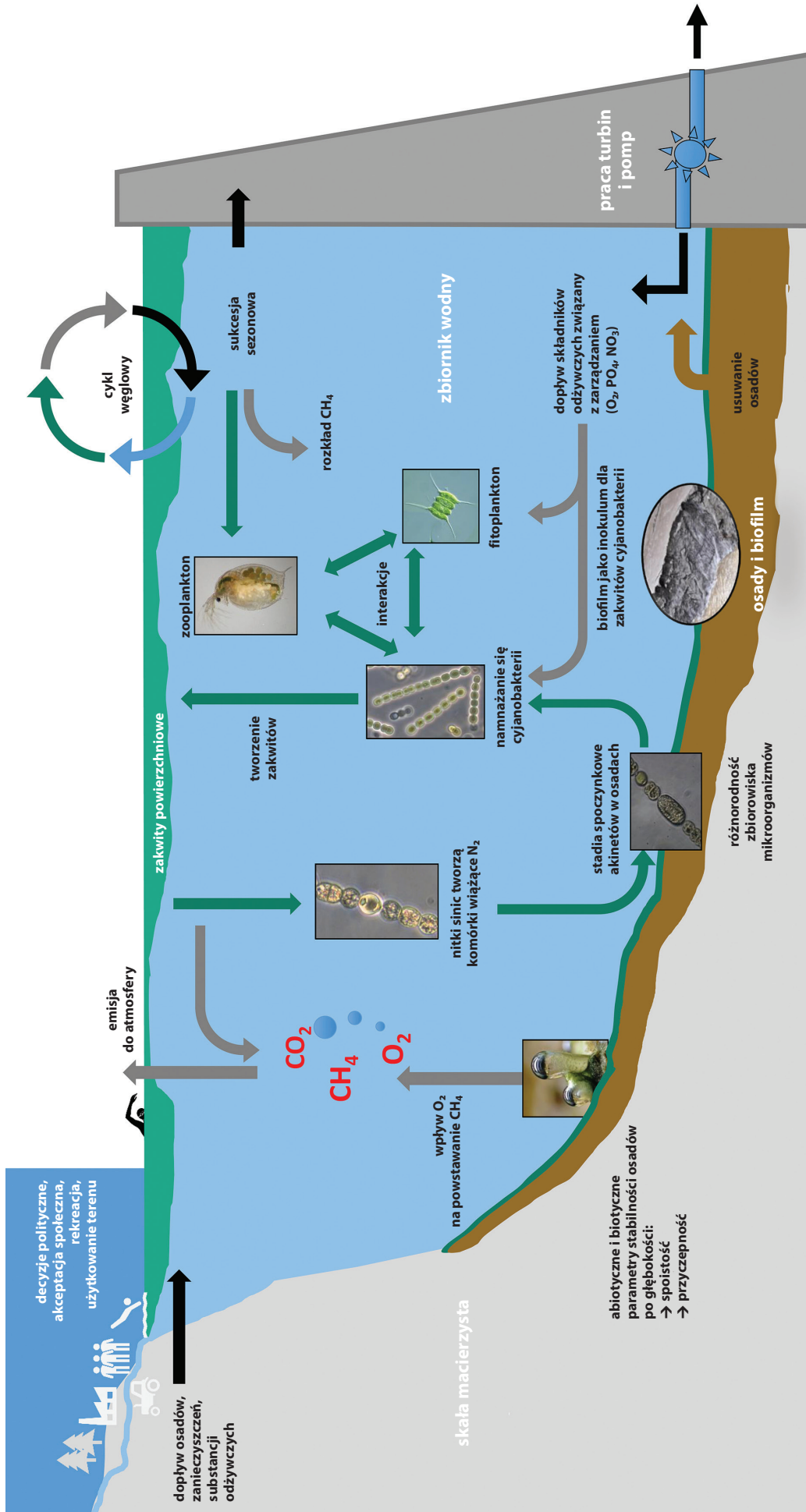
Instytut Modelowania Hydraulicznego i Systemów Środowiskowych, Katedra Hydrotechniki i Zarządzania Zasobami Wodnymi, Uniwersytet w Stuttgarcie, Niemcy  
Zespół projektu CHARM  
skupia naukowców z Uniwersytetów w Stuttgarcie, Fryburgu i Konstancji

potrzeby i stanowią nieodłączny element życia społecznego. Ich społeczne znaczenie prawdopodobnie jeszcze wzrośnie ze względu na czynniki antropogeniczne, spotęgowane dodatkowo przez zmiany klimatyczne i demograficzne.

Obecnie mniej więcej połowa wielkich zapór znajduje się w Chinach, USA, Indiach i Japonii. W Europie krajem o ich największej liczbie (około 1000) jest Hiszpania. Polska z 69 takimi zaporami zajmuje 41. miejsce w światowym rankingu ICOLD.

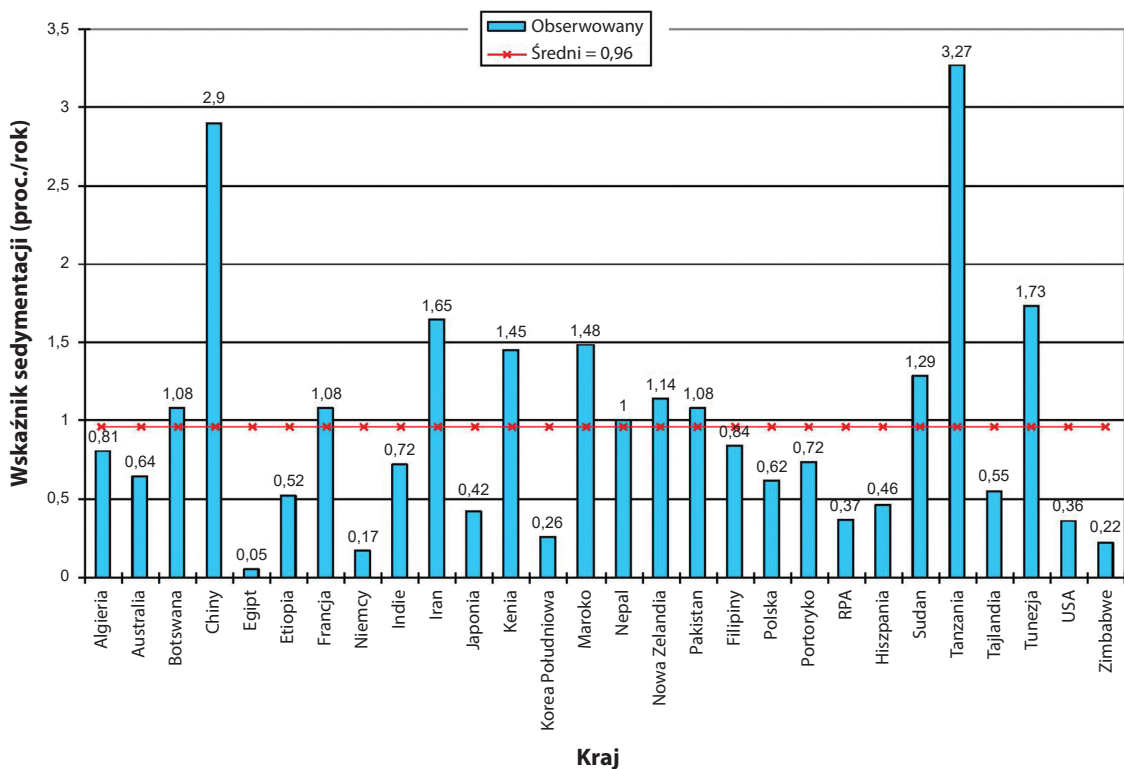
Sposób zarządzania zbiornikiem, czyli ilość spuszczonej wody oraz wynikające stąd wahania jej poziomu, zależy przede wszystkim od głównej funkcji, jaką spełnia dany zbiornik. Prawda jest jednak taka, że zbiorniki często służą różnym celom jednocześnie i z tego powodu wymagają antycypacyjnego zarządzania, a do tego przemyślanych ekonomicznych i ekologicznych koncepcji zarządczych. Przykładem zagrożenia, któremu należy zapobiegać, jest osadzanie się rumowiska w zbiorniku, co powoduje znaczne zmniejszenie jego pojemności użytkowej, skutkując jednocześnie niedoborem osadów w zlewni poniżej zapory. Innym problemem jest gromadzenie się materiału organicznego, takiego jak drzewa, gałęzie czy liście, co w warunkach beztlenowych prowadzi

**N**a całym świecie istnieje około 58 tys. zapór o wysokości ponad 15 metrów, które w klasyfikacji Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór (ICOLD – International Commission on Large Dams) są uznawane za „wielkie”. Takie zapory spełniają różne funkcje, m.in. nawadnianie (około 47 proc.), wytwarzanie hydroenergii (około 22 proc.), zapewnianie wody pitnej (około 12 proc.), ochrona przeciwpowodziowa (około 9 proc.) czy żegluga (około 10 proc.). Istotnie zaspokajają one nasze życiowe



Rys. 1  
 Powiązania między najważniejszymi procesami fizykochemicznymi i biologicznymi w zbiornikach zaporowych oraz społeczne konsekwencje istnienia zbiorników (na podstawie Beckers i in., 2018a)

Rys. 2  
 Średni roczny wskaźnik  
 sedymentacji w zbiornikach  
 zaporowych w wybranych  
 krajach (ICOLD, 2009)



do powstawania gazów cieplarnianych. Dopyły składników odżywczych, np. z rolnictwa, przyczynia się do wzrostu cyjanobakterii (nazywanych też sinicami) w wodzie, co może prowadzić do ich toksycznych zakwitów. W większości zjawiska te mają charakter ukryty i są rzadko widoczne, toteż można je potocznie określić mianem „brudnych sekretów” zbiorników zaporowych.

## Wykrywanie i ograniczanie skutków

Całościowy obraz złożonych powiązań między procesami fizykochemicznymi i biologicznymi pokazano na rys. 1. Stabilność depozycji osadów zależy od parametrów abiotycznych, takich jak rozkład ziaren, gęstość i spoistość, a także od czynników biotycznych, takich jak biostabilizacja czy przyczepność. Warunki beztlenowe panujące w głębokiej wodzie i zgromadzone w niej frakcje organiczne sprawiają, że w osadach następuje produkcja gazów cieplarnianych. Strumienie składników odżywczych w wodzie wpływają na bliskie powiązania między wzrostem fitoplanktonu i wzrostem zooplanktonu, co wiąże się z namnażaniem cyjanobakterii i w efekcie powstawaniem zakwitów. Zakwity są zwykle postrzegane jako szkodliwe dla ludzi ze względu na swoją toksyczność. Są widoczne gołym okiem i bardzo niekorzystnie wpływają na ogólną ocenę społeczno-gospodarczą zbiorników zaporowych.

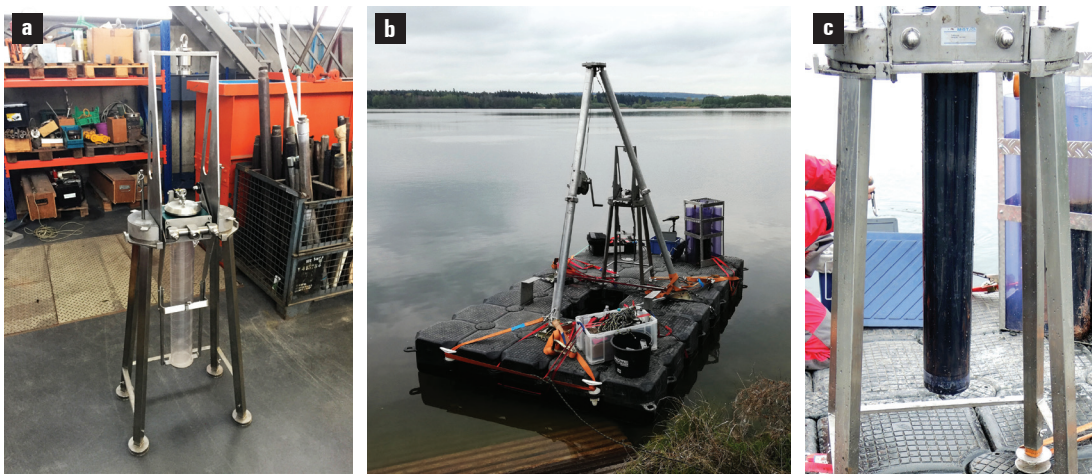
Właśnie dlatego intensywne i wieloaspektowe badania inter- i transdyscyplinarne są tak ważne dla

lepszego zrozumienia złożonych interakcji występujących w zbiornikach zaporowych, a tego można dokonać jedynie przez bliską współpracę uczonych z różnych dziedzin. Taka współpraca przyczyni się do realizacji wspólnego celu – opracowania strategii zarządzania, która pozwoli skutecznie określić „brudne sekrety” zbiorników.

## Sekret pierwszy: sedymentacja w zbiorniku

Sedymentacja skraca żywotność zbiorników zaporowych i negatywnie oddziałuje na ich funkcjonowanie, a także ma niekorzystny wpływ na zlewnię poniżej zapory (w ten sposób przyczyniając się do zjawiska „głodnych rzek”). Straty wskutek sedymentacji w skali globalnej wynoszą średnio około 1 proc. pojemności zbiornika rocznie (rys. 2).

Do zminimalizowania sedymentacji w zbiorniku, ponownego uruchomienia już zdeponowanych osadów, a w miarę możliwości do przywrócenia naturalnej ciągłości sedymentacji są niezbędne zrównoważone strategie zarządzania. Ich opracowanie wymaga całościowej wiedzy na temat składu, właściwości fizycznych i stabilności erozyjnej deponowanych osadów. Szczególnym wymaganiem zadaniem jest sporządzenie charakterystyki mieszanin drobnych osadów ze względu na ich spoistość erozyjną. W zbiornikach drobny materiał występuje przede wszystkim w pobliżu zapory. Opracowanie efektywnych strategii remobilizacji wymaga badań eksperymentalnych potencjału



Fot. 1

- a) próbnik osadów Frahma w laboratorium,  
 b) platforma pływająca do pobierania próbek wraz z wyposażeniem,  
 c) pozyskane rdzenie osadów (Beckers i in., 2018b)

erozyjnego takich osadów (np. podczas spłukiwania zbiornika).

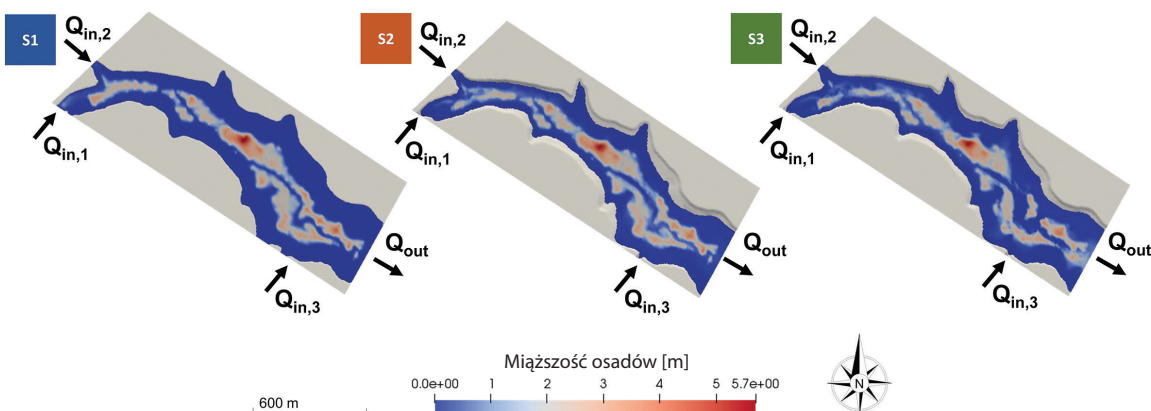
Instytut Modelowania Hydraulicznego i Systemów Środowiskowych Uniwersytetu w Stuttgarcie (IWS) opracował eksperymentalną metodę badania zależności stabilności erozyjnej spoiwystych osadów w zbiornikach zaporowych od ich głębokości, a także ich charakterystyk sedimentacyjnych obejmujących fizyczne, chemiczne i biologiczne parametry stabilności (więcej informacji na temat projektu CHARM można znaleźć na stronie [www.charm-bw.de](http://www.charm-bw.de)). W tym celu z materiału osadzonego w zbiorniku pozyskano rdzenie osadów za pomocą próbnika osadów Frahma. Urządzenie pozwala na wydobywanie ze zbiornika względnie nienaruszonych rdzeni o średnicy 0,1 m i długości do 1 m z głębokości do 100 metrów. Na fot. 1 pokazano chwytacz z zamkniętą pokrywą i zaciskiem, pływającą platformę z trójnogiem i wydobyty rdzeń osadów.

Pobrane rdzenie zostają poddane analizie pod kątem stwierdzenia zależności między erozją a głębokością za pomocą systemu SETEG, opracowanego przez IWS. SETEG składa się z prostej, zamkniętej, prostokątnej rynny działającej w warunkach przepływu ciśnieniowego. Rdzenie osadów zostają unieruchomione na dnie rynny. Następnie próbkę osadów

wprawia się w ruch pionowy przy użyciu tłoka. Warstwa osadów zostaje poddana stopniowo rosnącemu naprężeniu, a proces erozji mierzy się metodami fotograficznymi. Uzyskane dane pomiarowe są ujęte na wykresie dla każdego naprężenia w poszczególnych analizowanych warstwach osadów. Dzięki nim można obliczyć stabilność erozji w zależności od głębokości, wyrażoną jako graniczne naprężenie styczne. Zostaje także opracowany profil pionowy stabilności erozji w zależności od głębokości osadów.

Wiedza o stabilności erozji dla danej lokalizacji w zależności od głębokości osadu umożliwia zaawansowane modelowanie numeryczne, np. w badaniu skuteczności spłukiwania zbiornika jako potencjalnego sposobu usuwania osadów.

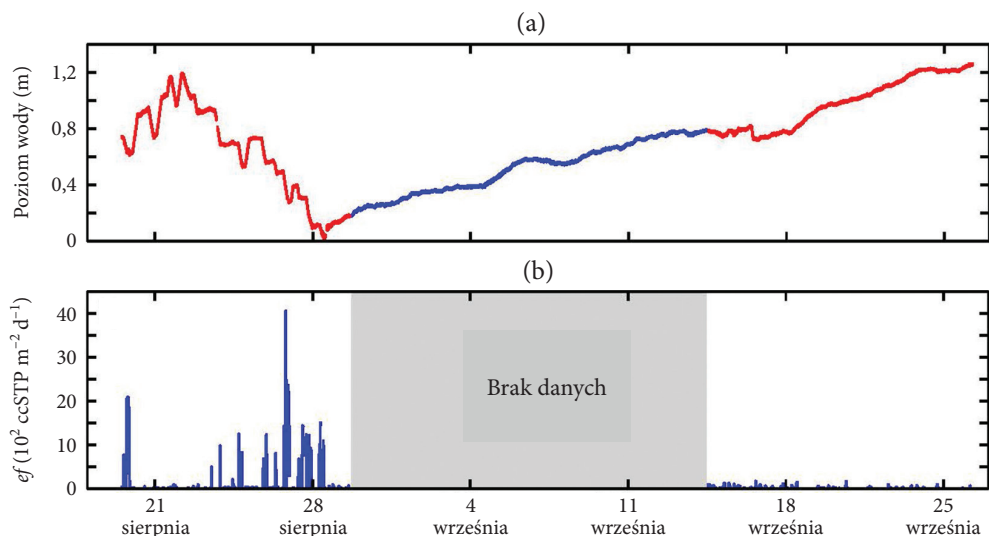
Rysunek 3 przedstawia wyniki obliczeń dla badanej lokalizacji, tj. zbiornika Schwarzenbach w południowo-zachodnich Niemczech. Mimo że nie występują tam znaczące problemy z sedymentacją (jej średnia wartość wynosi 0,02 proc. rocznie), do symulacji skuteczności różnych scenariuszy płukania naturalnym przepływem rzeki zbudowano trójwymiarowy model hydromorfodynamiczny. Efekty symulacji dla trzech scenariuszy ukazano poniżej (S1–S3). Warunki brzegowe dopływu i odpływu są stałe (maksymalny



Rys. 3

- Porównanie miąższości osadów po spłukiwaniu:  
 S1) bez obniżenia poziomu wody,  
 S2) z obniżeniem poziomu wody do minimalnego poziomu operacyjnego (częściowe spuszczenie wody ze zbiornika),  
 S3) z pełnym spuszczeniem wody ze zbiornika (Saam i in. 2019)

Rys. 4  
 Poziom wody (a) i strumień  
 ebulicji (b) w zbiorniku  
 Schwarzenbach w 2016 roku.  
 Poziom wody odniesiono  
 do poziomu wynoszącego  
 658,7 m n.p.m., czyli  
 minimalnego poziomu wody  
 stwierdzonego w okresie  
 pomiarowym. Krzywa  
 w kolorze czerwonym  
 odpowiada dwóm okresom  
 pomiaru strumienia ebulicji



dopływ roczny, otwarty spust dolny i operacyjny), podobnie jak czas spłukiwania (350 godzin). Opisane scenariusze spłukiwania charakteryzują następujące różnice: S1) nie następuje obniżenie zwierciadła wody, S2) zwierciadło wody zostaje obniżone do minimalnego poziomu operacyjnego (częściowe spuszczenie wody ze zbiornika) i S3) całkowite spuszczenie wody ze zbiornika. W scenariuszu z całkowitym spuszczeniem wody stwierdzono, że masa erodowanych osadów wynosi 35 tys. ton (S3), podczas gdy przy częściowym spuszczeniu wody (S2) wyniosła 10 344 tony, a w scenariuszu bez obniżenia poziomu wody (S1) zaledwie 39 ton. Wyniki te jednoznacznie wskazują na istnienie zależności między obniżeniem poziomu wody i skutecznością spłukiwania zbiornika – najefektywniejszy jest scenariusz S3, który zakłada pełne obniżenie poziomu wody, czyli warunki swobodnego przepływu.

## Sekret drugi: wzrost cyjanobakterii

W warunkach postępującego ocieplenia klimatu cyjanobakterie częściej zakwitają w jeziorach i zbiornikach zaporowych, co niesie poważne konsekwencje dla zdrowia i stabilności ekosystemów wodnych. Cyjanobakterie są źródłem wielu zagrożeń dla jakości wody, w związku m.in. z ich zdolnością do wytwarzania toksyn, wpływania na smak i zapach wody czy tworzenia zagrożenia dla bezpieczeństwa wody pitnej i zdrowia ludzi. Ich szkodliwy wpływ na środowisko, gospodarkę i funkcjonowanie zbiorników przejawia się m.in. śmiertelnością ryb, wytwarzaniem toksyn, ograniczeniem funkcji rekreacyjnych czy zagrożeniem dla uzdatniania wody pitnej i jej zasobów.

Obecnie jest duże zapotrzebowanie na skuteczne przewidywanie i zapobieganie zakwitom cyjanobakterii w zbiornikach zaporowych. Istniejące metody

nie sprawdzają się najlepiej, co utrudnia ograniczenie ryzyka i zmniejszenie strat gospodarczych związanych z tym zjawiskiem. Realizowany przez nas interdyscyplinarny projekt CHARM po raz pierwszy zbadał zakwity cyjanobakterii w zbiorniku elektrowni szczytowo-pompowej. Badania terenowe zostały uzupełnione przez pomiary stężenia składników odżywczych (fosforu, azotu), zasadowości oraz składu fito- i zooplanktonu. Pobrano także próbki wody do badań w laboratorium, a także próbki cyjanobakterii w stanie spoczynku i dafni (*Daphnia*) w pelagialu, profundalu i bentosie osadów zbiornika.

Nasze studium przypadku wykazało, że zakwity tworzą przede wszystkim sinice z rodzaju *Anabaena*, jednak skład zooplanktonu zmienia się w trakcie tworzenia się zakwitu w taki sposób, że liczebność większych gatunków zooplanktonu (*Daphnia longispina*) maleje, a wzrasta liczebność gatunków mniejszych (*Ceriodaphnia sp.* i *Bosmina sp.*).

Badania potwierdziły hipotezę wpływu pracy pomp na zakwity sinic. Jednocześnie wykazano, że powstają one również niezależnie od stopnia pompowania wody i istnieje silne zróżnicowanie intensywności zakwitów w zależności od pory roku i między poszczególnymi latami, co wskazuje na pozytywną korelację z temperaturą wody, a negatywną z zawartością nieorganicznych związków azotu.

## Sekret trzeci: emisja gazów cieplarnianych

Coraz więcej badań naukowych wskazuje na to, że zbiorniki zaporowe stanowią znaczące źródło globalnej emisji gazów cieplarnianych. W 2007 roku brazylijscy badacze stwierdzili, że metan ze zbiorników odpowiada za mniej więcej 4 proc. zmian klimatycznych będących skutkiem działalności człowieka. Źródłem emisji jest rozkład materii organicznej, w tym

roślinności i gleb, które zostały zalane przez wodę przy spiętrzeniu zbiornika. Węgiel zawarty w planktonie i roślinach, które żyją i umierają w zbiorniku, szczątki roślin i zwierząt splukane z odcinka rzeki powyżej zapory i okresowe zalewanie roślin rosnących wzdłuż zbiornika sprawiają, że gazy uwalniają się przez cały cykl życia zbiornika. Różne zbiorniki wykazują znaczne różnice w poziomach emisji w zależności od terenu i rodzaju znajdujących się pod wodą ekosystemów, głębokości i kształtu zbiornika, jego sposobu użytkowania i lokalnego klimatu.

Żeby uzyskać długoterminowe dane w orientacji pionowej, w zbiorniku Schwarzenbach zainstalowano stanowisko cumownicze wyposażone w akustyczny dopplerowski prądomierz profilujący (ADCP), termistory (T), optody ( $O_2$ ,  $CO_2$ ) i mierniki pH. Wzdłuż osi doliny i w miejscu wpływu rzeki do zbiornika zainstalowano lejki samoistnie dokonujące pomiarów, by ocenić ebulicję  $CH_4$  (uwalnianie bąbli gazowych). Na podstawie uzyskanych danych emisję i retencję gazów cieplarnianych odniesiono do warunków hydrodynamicznych, osadów i rozwoju fitoplanktonu. W badanym przypadku ilość osadów jest niewielka, toteż strumienie dyfuzyjne  $CH_4$  uwalniane z osadów są stosunkowo małe, jest za to widoczna istotna korelacja między ebulicją i codziennymi wahaniami poziomu wody. Ogólnie można stwierdzić, że uwalnianie bąbli gazowych wskutek pompowania wody znacząco zwiększa całkowitą emisję  $CH_4$  (rys. 4). Stężenie  $O_2$  w głębokiej wodzie spada w mniejszym stopniu, kiedy pompy pracują, niż kiedy są w stanie spoczynku. Wskutek wysokiego stężenia  $O_2$  zmniejsza się gromadzenie  $CH_4$  w głębokiej wodzie. Dlatego też można stwierdzić, że praca pomp pośrednio utrzymuje emisję  $CH_4$  na względnie niskim poziomie w okresie jesiennym.

## Wnioski z badań

Dzięki prowadzonym badaniom coraz lepiej poznajemy „brudne sekrety” zbiorników zaporowych, na które składają się depozycja osadów, zakwity cyjanobakterii i emisja gazów cieplarnianych.

Eksploatujący zbiorniki muszą szukać równowagi między różnymi, często sprzecznymi potrzebami i jednocześnie zarządzać nimi w sposób, który pozwala na funkcjonowanie zbiornika tak długo, jak to jest uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia. Służy temu m.in. utrzymywanie sedymentacji na jak najniższym poziomie i opracowanie strategii remobilizacji zdeponowanych osadów. Obecnie sedymentacja powoduje duże straty globalne w pojemności zbiorników w skali roku (średnio około 1 proc.). Oznacza to koszty odtworzenia utraty pojemności użytkowej rzędu 10 mld dolarów rocznie. Jednocześnie należy dbać o to, by zbiorniki wywierały jak najmniejszy wpływ na środowisko. Oprócz ograniczenia zmian

w systemach rzecznych i jeziornych należy zmniejszać czy wręcz całkowicie wyeliminować emisję gazów cieplarnianych i występowanie zakwitów cyjanobakterii. W tym celu konieczne jest uzyskanie odpowiedniej wiedzy na temat interakcji między takimi parametrami operacyjnymi jak wahania poziomu wody czy procesy hydrobiologiczne, gdyż pozwoli ona na opracowanie efektywnych zaleceń dotyczących zrównoważonego zarządzania zbiornikiem.

Mimo że zostały zauważone powiązania między zmianami w warunkach limnologicznych i funkcjonowaniem zbiornika, szczegółowe mechanizmy fizyczne, chemiczne i biologiczne, tak złożone i ściśle z sobą powiązane, w części pozostają nieznanne. W zbiorniku Schwarzenbach, na którym przeprowadzaliśmy badania, emisja gazów cieplarnianych jest niewielka ze względu na niski poziom sedymentacji. Mimo to istnieje korelacja między ebulicją i dziennymi wahaniami poziomu wody, wzrost sinic zaś wydaje się niezależny od samej pracy pomp. Wyniki badań wskazują, że procesy sedymentacji, biostabilizacji, powstawania szkodliwych zakwitów cyjanobakterii i emisji gazów cieplarnianych są z sobą powiązane w skomplikowany sposób.

Badania dotyczące wyboru optymalnych strategii zarządzania zbiornikami, ze względu na stopień skomplikowania i wzajemne powiązania między zachodzącymi w nich procesami hydraulicznymi, transportu osadów i biochemicznymi, pozostaną trudnym tematem także w przyszłości, wymagającym współpracy badawczej specjalistów z pokrewnych dyscyplin. Badania będące w toku przynoszą nadzieję na dalsze odkrywanie „brudnych sekretów” zbiorników zaporowych. Tak naprawdę jednak należałoby powiedzieć, że nie chodzi o procesy „brudne” czy „sekretne”, lecz o zjawiska przyrodnicze, które uważamy za pasjonujące, i o wyzwania, którym – jak sądzimy – jesteśmy w stanie podołać.

## Projekt CHARM

Projekt „Challenges of Reservoir Management – Meeting Environmental and Social Requirements” (CHARM, [www.charm-bw.de](http://www.charm-bw.de)) – Wyzwania związane z zarządzaniem zbiornikami zaporowymi – spełnianie wymogów ekologicznych i społecznych) to część Sieci Badań nad Wodą Badenii-Wirtembergii. Projekt jest finansowany przez Ministerstwo Nauki, Badań i Humanistyki Badenii-Wirtembergii, a w jego realizacji bierze udział zespół naukowców i studentów z Uniwersytetów w Stuttgarcie, Fryburgu i Konstancji kierowany przez prof. Silke Wieprecht. Bez ich wysiłków i zaangażowania przedstawienie wyników zawartych w powyższej pracy nie byłoby możliwe. W szczególności prof. Wieprecht dziękuje następującym osobom (wymieniamy ich nazwiska w porządku alfabetycznym i w mianowniku): Felix Beckers, Milan Daus, Daniel Dietrich, Michelle Dietz, Jorge Encinas, Sabine Gerbersdorf, Rüdiger Glaser, Stefan Haun, Hilmar Hofmann, Katharina Koberger, Kaan Koca, Dominik Martin-Creuzburg, Frank Peeters i Barbara Weisbrod. Zespół projektu CHARM dziękuje spółce EnBW za umożliwienie wykorzystania do badań zbiornika Schwarzenbach. [www.icold-cigb.org](http://www.icold-cigb.org)

Chcesz wiedzieć więcej?

Beckers F. i in. 2018a, CHARM – Challenges of Reservoir Management – Meeting Environmental and Social Requirements. *HydroLink*, „Reservoir Sedimentation” 3/2018.

Beckers F. i in., 2018b, *Experimental investigation of reservoir sediments, E3S Web of Conferences* 40, 03030, River Flow, [doi.org/10.1051/e3sconf/20184003030](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003030).

Beckers F. i in., 2020, *High spatio-temporal resolution measurements of cohesive sediment erosion*, „Earth Surface Processes and Landforms” esp. 4889, [doi.org/10.1002/esp.4889](https://doi.org/10.1002/esp.4889).

Dietrich D., *Risk cyanobacterial toxins: occurrence, ecology, detection, toxicology, and health effects assessment*, „Toxicology and Applied Pharmacology” 2005, 203, 191, [doi.org/10.1016/j.taap.2005.02.003](https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.02.003).

Encinas F., *On the methane paradox: Transport from shallow water zones rather than in situ methanogenesis is the major source of CH<sub>4</sub> in the open surface water of lakes*, „Journal of Geophysical Research: Biogeosciences”, 2016, 121.

ICOLD, *Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems*, „Draft Bulletin” 2009, 147.

Ivan B.T. i in., *Methane Emissions from Large Dams as Renewable Energy Resources: A Developing Nation Perspective*, „Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change” 2007.

Kortmann R., *Cyanobacteria in Reservoirs: Causes, Consequences, Controls*, „Journal of the New England Water Works Association” 2015, vol. 129.

Noack M. i in., *PHOTOSED—PHOTOgrammetric Sediment Erosion Detection*, „Geosciences” 2018, 8, 243, [doi.org/10.3390/geosciences8070243](https://doi.org/10.3390/geosciences8070243).

Saam L. i in., *Three-dimensional numerical modelling of reservoir flushing to obtain long-term sediment equilibrium*, „Proceedings of the 38th IAHR World Congress”, Panama 2019.

Zarfl C. i in., *A global boom in hydropower dam construction*, „Aquatic Sciences” 2015, 77, [doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0](https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0).