

KRZYSZTOF PODWYSOCKI^{1*} , ELIZA SZCZERKOWSKA-MAJCHRZAK² 

* Autor korespondencyjny /corresponding author: krzysztof.podwysocki@gamtc.lt

¹ Laboratorium Ekologii Ewolucyjnej Hydrobiontów, Państwowy Instytut Badawczy – Centrum Badań Przyrodniczych, Akademijos 2, LT-08412 Wilno, Litwa

Laboratory of Evolutionary Ecology of Hydrobionts, State Scientific Research Institute Nature Research Centre, Akademijos 2, LT-08412 Vilnius, Lithuania

² Katedra Ekologii i Zoologii Kręgowców, Uniwersytet Łódzki, Banacha 12/16, 90-236 Łódź, Polska

Department of Ecology and Vertebrate Zoology, University of Lodz, Banacha 12/16, 90-236 Lodz, Poland

Znaczenie ostróg regulacyjnych na rzekach dla środowiska

The environmental implications of river groynes

DOI: <http://dx.doi.org/10.12775/KOSMOS.2026.005>

Abstrakt

Ostrogi regulacyjne na rzekach konstruowane są w celu zapewnienia dogodnych warunków do żeglugi rzecznej przy jednoczesnej ochronie brzegu przed erozją. W konsekwencji, ostrogi zmieniają bieg nurtu rzecznego oraz zmieniają przebieg cyklu erozji–transportu–sedymentacji osadów w obrębie koryta. Generowane przez nie zmiany hydrologiczne i geomorfologiczne sprzyjają mieszaniu wody i natlenieniu, wspierając tym samym procesy samooczyszczania rzek. Ponadto dzięki zmienionym warunkom fizykochemicznym wody oraz deponowaniu osadów w pobliżu brzegu wzmocnionego ostrogami, kreowane jest bardziej różnorodne środowisko, co wspiera sukcesję roślinności oraz występowanie specyficznych gatunków bentosowych, planktonu oraz ryb, przy jednoczesnym negatywnym wpływie na występowanie większości gatunków ptaków. Ostrogi regulacyjne mogą spełniać swoje funkcje zarówno w działalności człowieka (żeglowność, retencja wody), jak i stwarzać mozaikowe środowisko dla licznych gatunków fauny i flory, lecz ich konstrukcja musi być dobrze planowana i uwzględniać zarówno aspekty hydrologiczne, jak i biotyczne.

Słowa kluczowe: inżynieria wodna; jakość wody; tlen rozpuszczony; ekohydrologia; konstrukcje hydrotechniczne

Abstract

River groynes are constructed to ensure favourable conditions for river navigation while protecting the banks from erosion. As a result, groynes change the course of the river current and alter the cycle of erosion–transport–sedimentation within the riverbed. The hydrological and geomorphological changes they generate promote water mixing and oxygenation, thus supporting the self-cleaning processes of rivers. In addition, thanks to the changed physicochemical conditions of the water and the deposition of sediments near the bank reinforced by groynes, a heterogeneous environment is created that supports vegetation succession and the occurrence of specific benthic species, plankton and fish while at the same time harming the occurrence of most bird species. River groynes can fulfil their functions in human activities (navigability, water retention) and at the same time create a mosaic environment for numerous species of fauna and flora, but their design must be well planned and consider both hydrological and biotic aspects.

Keywords: water engineering; water quality; dissolved oxygen; ecohydrology; hydrotechnical constructions

WSTĘP

Wody słodkie stanowią jedynie 3% zasobów wodnych na Ziemi, z czego zaledwie 0,4% stanowią rzeki (Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski, 2013; Suchożębski, 2018). Mimo to wody słodkie zapewniają miejsce do życia dla 6% światowej bioróżnorodności, szczególnie dla ryb, z których aż 40% gatunków na świecie żyje w wodach słodkich (Dudgeon i in., 2006). Rzeki pełnią szczególnie ważne funkcje środowiskowe, ekonomiczne, sanitarne, kulturowe, naukowe i turystyczne (Anderson i in., 2019). Ponad 2/3 miast na świecie zlokalizowanych jest w dolinach rzecznych, a rzeki pełnią ważne funkcje w rozwoju i obronności miast od samych początków dziejów ludzkości (Igielski, 2023; Kędzierska i Kaźmierczak, 2023; Nycz, 2023). Człowiek od dawna starał się kontrolować bieg rzeki oraz naturalne procesy w niej zachodzące. Pierwsze próby melioracji i kontroli zasobów wodnych rzek prowadzili m.in. Majowie, jak również cywilizacje starożytnego Egiptu, Mezopotamii, Chin i Indii (Minaev i Maslov, 2009; Gilewski, 2011).

Naturalne procesy zachodzące w rzekach, które człowiek od zawsze starał się kontrolować, należą do dwóch kategorii: działalności budującej (akumulacyjnej) oraz niszczącej (erozyjnej). W porównaniu z biegiem górnym rzek, gdzie dominuje erozja denna, czyli wcinanie się rzeki w głębsze warstwy skalne, w biegu środkowym przeważa erozja boczna. Nurt rzeczny, czyli obszar o najszybszym przepływie wody, zmienia

swój przebieg wzdłuż rzeki, co sprzyja meandrowaniu, powstawaniu starorzeczy, tworzeniu klifów na brzegach podciętych oraz plaż na brzegach przeciwnych. Na skutek meandrowania rzek prędkość przepływu wody spada, intensyfikują się procesy samooczyszczania się cieku, ale jednocześnie maleje przydatność rzeki w transporcie rzeczonym. Jednym z rozwiązań zwiększających żeglowność rzek jest wyprostowanie i zwężenie koryta rzeczno. W takim scenariuszu ta sama objętość wody przepływa przez węższe koryto, dzięki czemu głębokość koryta staje się optymalna dla pojazdów wodnych. W konsekwencji szybciej płynący nurt rzeczny w zwężonym i wyprostowanym korycie działa z większą siłą niszczącą na brzeg rzeczny. Aby chronić brzeg przed podmywaniem, budowane są konstrukcje hydrotechniczne zwane ostrogami regulacyjnymi. Kierują one przepływ w kierunku środka rzeki, zapewniając odpowiednią głębokość żeglugową i chroniąc brzeg przed erozją (Duan, 2009).

Celem niniejszej pracy jest przegląd literatury poświęcony wpływowi ostróg regulacyjnych na ekosystem rzeczny, m.in. na procesy samooczyszczania się rzek, sukcesję roślinności brzegowej oraz różnorodność biologiczną. Przedstawiamy również skrócony opis poświęcony konstrukcji ostróg oraz ich wpływowi na hydrologię cieku. Czytelników bardziej zainteresowanych tymi aspektami odsyłamy do prac hydrologicznych m.in. Yossef (2002), Łajczak (2006), Robakiewicz (2006).

KONSTRUKCJA I MECHANIZM DZIAŁANIA OSTRÓG REGULACYJNYCH

Regulację rzek stosuje się, aby zmniejszyć ryzyko powodzi, zwiększyć wydajność transportu osadów, chronić brzegi przed erozją, zwiększyć żeglowność cieku, spiętrzyć wodę w celu produkcji energii oraz zwiększyć walory turystyczne regionu (Yossef 2002; Robakiewicz 2006; Szczerkowska-Majchrzak i Grzybkowska 2008). Historyczne procesy regulacyjne rzek, szczególnie nasilone od połowy XIX wieku, w dużej mierze opierały się na prostowaniu koryt poprzez wykonywanie przekopów, co miało na celu usprawnienie żeglugi oraz ochronę przeciwpowodziową (Kiss i in., 2008). Mechanizm ten prowadzi do drastycznego skrócenia długości koryta, co skutkuje bezpośrednim zwiększeniem spadku podłużnego rzeki (Ferguson, 2012). Wzrost spadku generuje wyższe prędkości przepływu oraz potęguje siłę napędową nurtu, co z jednej strony przyspiesza odpływ wód wezbraniowych, ale z drugiej inicjuje procesy intensywnej erozji dennej i pogłębiania się koryta (Kiss i in., 2008). Prostowanie meandrujących rzek prowadzi do utraty złożoności hydraulicznej, wpływając m.in. na dynamikę transportu osadów (Zhou i Endreny, 2020). W dłuższej perspektywie takie przekopy wywołują reakcję morfologiczną całego systemu rzeczno, prowadząc do zmian w geometrii przekrojów poprzecznych i parametrach przepływowości (Micheli i Larsen, 2011). W odpowiedzi na te zagrożenia zaczęto konstruować ostrogi regulacyjne.

Ostrogi budowane są prostopadle lub pod niewielkim kątem do brzegu rzeki z początkiem zaczynającym się na brzegu oraz końcem dochodzącym do linii regulacyjnej na rzece, a ich główną funkcją jest sterowanie przepływem wody, ochrona brzegów przed erozją, utrzymanie żeglownego toru wodnego (koncentracja nurtu) oraz kształtowanie przekroju koryta i retencja rumowiskowa (Yossef, 2002). Budowane są z kamieni, żwiru, betonu, ziemi lub faszyń, czyli elementu budowlanego składającego się z pędów wikliny, gałęzi drzew liściastych i iglastych oraz pęków chrustu (Wołoszyn i in., 1994). W nowoczesnych rozwiązaniach stosuje

się również materiały biologiczne, takie jak zeolit z biofilmem mikroorganizmów, które pełnią funkcje filtracyjne i wspierają procesy oczyszczania wody (Chen i in., 2022).

Współczesne podejście do projektowania regulacji rzek odchodzi od statycznych schematów na rzecz dynamicznego zarządzania reżimem przepływów (Escameia, 1998; Simon i in., 2013). Projektowanie odcinków regulowanych uwzględnia zatem pełne spektrum hydrauliczne: od przepływów niskich i średnich po przepływy wezbraniowe. Dlatego ostrogi są elementem zabudowy systemowej i współpracują z opaskami brzegowymi – równoległymi do brzegu – oraz przekopami. Kluczowym elementem tego podejścia jest synergia między budowlami poprzecznymi (ostrogami), podłużnymi (opaskami) oraz korektą trasy koryta (przekopami). Podczas gdy ostrogi mają za zadanie odsunąć nurt od brzegu i skoncentrować go w osi koryta (linii regulacyjnej), opaski brzegowe stabilizują linię brzegową w miejscach bezpośrednio narażonych na rozmywanie (Escameia, 1998).

Współczesne projektowanie ostróg uwzględnia aspekty techniczne i ekologiczne, a roślinne ostrogi rzeczne stanowią zintegrowane rozwiązanie stabilizujące brzegi i poprawiające warunki siedliskowe poprzez redukcję prędkości przepływu, turbulencji oraz wspieranie sedymentacji (Iqbal i in., 2024).

W zależności od lokalnych warunków hydrologicznych i geomorfologicznych stosuje się różne typy ostróg, w tym konstrukcje T-kształtne, L-kształtne, I-kształtne oraz struktury o bardziej złożonej geometrii (np. w kształcie litery „W”). Pod względem przepuszczalności dzieli się je na ostrogi przepuszczalne i nieprzepuszczalne, a ze względu na zanurzenie – na zanurzone i wynurzone (Pandey i in., 2018). Ostrogi mogą się również różnić użytym budulcem (Samide i Beckstead, 1975).

W literaturze można spotkać się z takimi terminami jak: *river groyne*, *spur dike* oraz *wing dam*. Często nazwy te stosowane są jako synonimy dla jednej klasy obiektów pomimo istnienia pomiędzy nimi różnic technicznych (Tabela 1).

Tabela 1. Charakterystyka budowli regulacyjnych wysuniętych z brzegu w stronę nurtu rzeki (Boland, 1980; Abraham i in., 2006; Glas i in., 2018; Seignemartin i in., 2023; Guo i in., 2023; Nandhini et al., 2024; Török i Parker, 2025)

Cecha/ /Nazwa budowli	River groyne	Spur dike	Wing dam
Pochodzenie terminu	termin brytyjski / europejski (UK, Europa kontynentalna)	termin amerykański / międzynarodowy inżynierski	termin amerykański (US Army Corps of Engineers)
Dosłowne tłumaczenie	ostroga rzeczna	grobla, nasyp poprzeczny (dosł. „tama skrzydłowa”)	tama skrzydłowa / ostroga skrzydłowa
Położenie względem nurtu	zwykle prostopadła lub ukośna do brzegu; często w seriach (pola ostrogowe)	wysunięta konstrukcja ukośna lub prostopadła do brzegu, ale może też mieć łukowaty kształt i pracować bardziej kierunkowo	zwykle prostopadła lub lekko ukośna, budowana głównie w rzekach żeglownych (np. Missisipi)
Widoczność	może wystawać ponad poziom wody lub być zatopiona przy wyższych stanach	zależna od projektu, często powyżej wody przy niskich przepływach	zazwyczaj zanurzone przy średnich i wysokich stanach, aby nie przeszkadzać w żegludze
Kierunek działania	deflektuje przepływ od brzegu	może kierować przepływ od brzegu lub do brzegu (w zależności od nachylenia)	koncentruje przepływ ku środkowi rzeki
Funkcja hydrauliczna	kierowanie nurtu, ochrona brzegu, pogłębianie toru wodnego, redukcja erozji	kierowanie nurtu, ale często z większym naciskiem na ochronę brzegu i stabilizację koryta	utrzymywanie stałej głębokości toru żeglownego, poprzez wymuszanie nurtu w osi rzeki
Konstrukcja	kamienna, betonowa, drewniana, ażurowa; często w systemie wielu ostróg	masywna konstrukcja ziemno-kamienna, o łagodnym nachyleniu	kamienne lub betonowe, niskie (często częściowo zanurzone)
Zasięg	Europa (Ren, Odra, Wisła, Łaba)	Azja i Ameryka Płn.	USA (głównie na Missisipi i jej dopływach)

W zależności od przeznaczenia i sytuacji hydrologicznej, a także wielkości cieku stosuje się różne formy ostróg. Przykładowo, na dużych rzekach żeglownych, takich jak Jamuna, Wisła, Ren, stosuje się masywne systemy ostróg, aby kontrolować dynamiczne przemieszczanie się łach (Bac-kiel i Penczak, 1989; Hu i in., 2023; Hasan i Toda, 2024). Z kolei na rzekach podgórskich i górskich (np. rzeki w Karpatach, rzeki RPA) częściej stosuje się ostrogi zalane, wykonane z gabionów lub dużych głazów, które aktywują się tylko podczas wezbrań, chroniąc infrastrukturę przed wysoką energią przepływu (Shynkaruk i in., 2024; King, 2015).

KONSEKWENCJE KONSTRUKCJI OSTRÓG REGULACYJNYCH

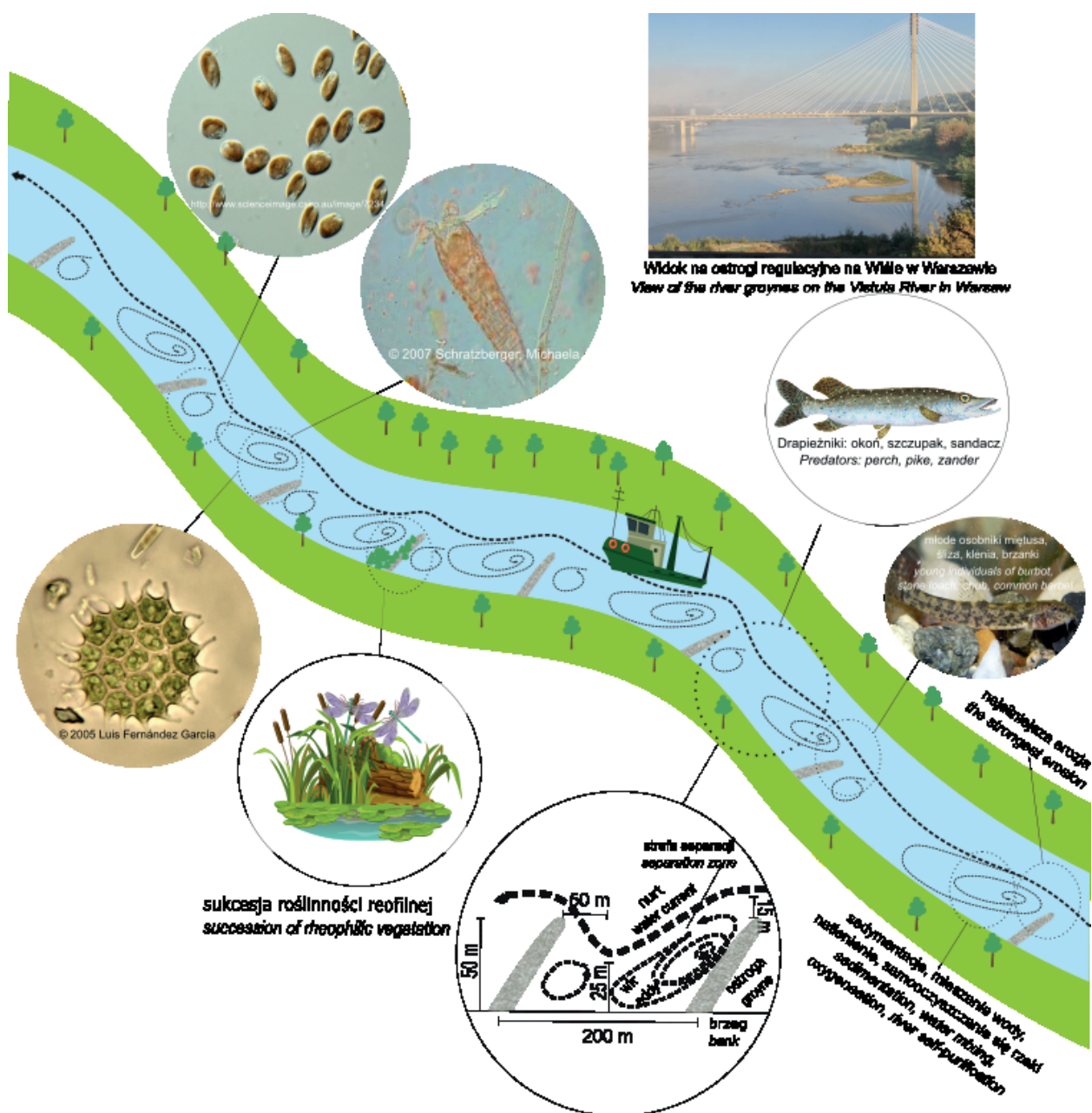
Hydrauliczne oddziaływanie

Regulacja rzeki zwykle wiąże się z wykonywaniem przekopów, które skracają bieg rzeki i zwiększają jej spadek podłużny, co pozwala na uporządkowanie sposobu, w jaki główny strumień wody przemieszcza się w obrębie koryta rzeki, a efektywność tego układu jest następnie wzmacniana przez system ostróg (Prasad i in., 2016; Dutta i Kalita, 2019; Chabokpour, 2024). W efekcie ostrogi regulacyjne przyczyniają się

do zwiększenia prędkości nurtu w korycie głównym oraz wzrostu wysokości brzegów (Łajczak, 2006). Szybciej przepływająca woda w korycie rzeczonym stanowi szczególne zagrożenie w czasie wezbrania. Fala powodziowa koncentruje się na mniejszej powierzchni, zatem rośnie jej wysokość przy krótszym czasie trwania wezbrania, zarówno w przypadku ostróg zanurzonych, jak i wystających ponad powierzchnię wody (Han i in., 2025). Jednakże przy niskich przepływach ostrogi mogą obniżać poziom wody poprzez

pogłębianie koryta, natomiast przy wysokich przepływach mogą zwiększać poziom wody, ograniczając przekrój przepływu i powodując spiętrzenia (Watson i in., 2013) (Ryc. 1).

Jedynie w przypadku powodzi zatorowych, powodowanych przez lód na rzece, ostrogi mogą pełnić pozytywną rolę, zapobiegając gromadzeniu się lodu i tworzeniu zatorów (Shynkaruk, 2024). Ten pozytywny wpływ zaznacza się szczególnie na odcinkach rzek z ostrogami zatopionymi, jednakże w niektórych przypad-



Ryc. 1. Mechanizm działania i efekty wywołane ostrogami regulacyjnymi

kach ostrogi nie pełnią takiej roli, a mogą nawet utrudniać spływ lodu podczas powodzi zatorowych (Grześ, 1991).

Z drugiej strony, pogłębianie koryta przez wzmożoną erozję denną na odcinkach regulowanych może mieć swoje negatywne konsekwencje podczas niskich przepływów wody, tzw. niżówek. Regulacja rzeki przy pomocy ostróg powoduje obniżenie dna cieku, co w trakcie zmniejszonych przepływów przyczynia się do wzmożonego drenażu doliny, a tym samym spadku wysokości zwierciadła wód gruntowych (Babiński, 1997; van der Wal, 2020).

Oddziaływanie hydrologiczne ostróg zanika przy zapewnieniu określonego minimalnego rozstawu konstrukcji (Pasha i in., 2025). Najwyższą efektywność hydrologiczną przy jednoczesnym zachowaniu stabilności brzegu uzyskuje się przy odstępach pomiędzy ostrogami wynoszącymi od 12- do 15-krotności długości pojedynczej ostrogi, a czasami nawet do 130-krotności (Gu i in., 2020). Taki rozstaw przyczynia się do poprawy kondycji rzek, zaś przy mniejszych rozstawach rośnie ryzyko erozji i wymagane jest stosowanie umocnień przeciwerozyjnych. Przy bardzo małych odstępach ostrogi działają jak jedna przeszkoda, natomiast przy dużych odstępach każda ostroga działa niezależnie, co ma duże znaczenie w przypadku fali wezbraniowej (Azinfar i Kells, 2011). Efekt powodzi jest częściowo kompensowany przez erozję dna, przyczyniającą się do pogłębiania koryta. Ta morfodynamiczna reakcja zmniejsza wzrost poziomu wody, ale go nie eliminuje (Han i in., 2025). Należy jednak zaznaczyć, że w przeciwieństwie do wałów ostrogi nie podnoszą poziomu wody w całej rzece, a działają wyłącznie lokalnie, a więc w niewielkim stopniu przyczyniają się do wezbrań w sensie hydrologicznym (Iqbal i Tanaka, 2023).

Geomorfologiczne efekty

Zmiany geomorfologiczne rozpoczynają się natychmiast po wybudowaniu ostróg i są one silnie uzależnione od sezonowych zmian hydrologicznych oraz odległości między ostrogami,

przy czym najsilniejsza erozja występuje przy pierwszej ostrodze (Mohammad i in., 2016).

Erozja występuje głównie za głowicami ostróg, natomiast sedimentacja zachodzi w strefach recyrkulacji (tj. wewnątrz przestrzeni ograniczonej przez kolejne ostrogi oraz brzeg rzeki), gdzie prędkości przepływu są niskie (Sukhodolov i in., 2002) (Ryc. 1).

Ostrogi wpływają na kształtowanie się przepływów w polach ostrogowych (ang. *groyne fields*), co z kolei prowadzi do charakterystycznych wzorców erozji i sedimentacji w obrębie koryta rzecznego, gdzie grubsze cząstki osadzają się, a w wodzie pozostają drobniejsze, często organiczne frakcje (Sukhodolov i in., 2002).

W przypadku dużego odstępu między ostrogami, woda omijając konstrukcje, tworzy lokalne cofki i silne prądy boczne w polach między nimi, co skutkuje erozją brzegu, powstawaniem głębokich plos w strefie międzyostrogowej oraz utrudnieniami w stabilizacji nurtu, natomiast seria ostróg tworzy ciągłą strefę ochronną, która stabilizuje brzeg na całej długości, utrzymuje jednolity nurt w osi rzeki i ogranicza lokalne wiry oraz cofki niebezpieczne dla żeglugi (Mohammad i in., 2016).

Na intensywność erozji wpływ ma również kąt ustawienia ostróg. Ostrogi skierowane w dół biegu rzeki powodują najmniejsze zakłócenia przepływu i są najbezpieczniejsze pod względem ryzyka erozji (Liu i in., 2024).

Istotne pozostaje również zanurzenie ostróg. W przypadku ostróg zanurzonych, przepływ częściowo przechodzi nad ostrogą, co zmniejsza intensywność lokalnych wirów i sił ścinających przy dnie. W efekcie energia strumienia kierowana w dół jest mniejsza, a powstające wiry przy podstawie ostróg są słabsze, co ogranicza zdolność wody do unoszenia i transportu materiału dennego i skutkuje płytszymi zagłębieniami w strefie erozji (Mohammad i in., 2016).

Jako przykład pozytywnego oddziaływania ostróg na depozycję osadów wskazać można afrykańskie rzeki (np. Buffeljags River, Gamka River, Hex River), charakteryzujące się dużą zmiennością przepływów wynikającą z sezonowości opadów, gwałtownych wezbrań oraz antropopresji, takiej jak usuwanie roślinności czy postępująca

urbanizacja (King, 2009). Erozja brzegów tych rzek przyczynia się do degradacji infrastruktury, utraty gruntów rolnych i zwiększonego transportu osadów. Zastosowanie ostróg regulacyjnych ogranicza prędkość przepływu w strefie przybrzeżnej, generuje wiry sprzyjające akumulacji osadów oraz przekierowuje główny nurt dalej od brzegu, zmniejszając jego podatność na erozję.

WPŁYW OSTRÓG REGULACYJNYCH NA STĘŻENIE TLENU ROZPUSTCZONEGO I JAKOŚĆ WODY W RZEKACH

Tlen rozpuszczony (DO, *dissolved oxygen*) jest jednym z kluczowych parametrów jakości wody decydujących o funkcjonowaniu ekosystemów wodnych. Utrzymanie jego odpowiedniego poziomu warunkuje procesy biologiczne, takie jak oddychanie organizmów wodnych, rozkład materii organicznej oraz samooczyszczanie cieków (Wetzel i Likens, 2000). Poprzez wpływ na dynamikę przepływu i procesy sedymentacyjne, ostrogi regulacyjne mogą modyfikować stężenie tlenu w wodzie, oddziałując tym samym na jakość środowiska wodnego. Ich obecność zmienia lokalną strukturę przepływu, ponieważ zwiększa turbulencję, przyspiesza przepływ oraz intensyfikuje mieszanie wód o różnym stężeniu tlenu (Wang i in., 2025). W rezultacie dochodzi do efektywniejszego rozcieńczania zanieczyszczeń i zwiększenia tempa reoksygenacji atmosferycznej, co przyczynia się do poprawy jakości wody zarówno w strefie ostróg regulacyjnych, jak i w dalszym biegu rzeki (Shen i in., 2024). Takie warunki sprzyjają przywracaniu równowagi tlenowej i wspierają funkcjonowanie biocenoz wodnych.

Szczególną rolę w tym kontekście odgrywa strefa separacji przepływu, tj. obszar, w którym woda oddziela się od głównego nurtu, tworząc cofki lub lokalne wiry (Ryc. 1). W strefach tych prędkości przepływu są niewielkie, a procesy mieszania ograniczone, co sprzyja akumulacji zanieczyszczeń oraz spadkowi stężenia tlenu. Wprowadzenie ostróg prowadzi do zmniejszenia strefy rozdzielającej nurt główny od cofki i lokalnych wirów, ograniczając tym samym obszar cofki oraz przepływ wsteczny za przeszkodą, a to ostatecznie poprawia warunki natlenienia wody

i ogranicza występowanie obszarów o niskim poziomie tlenu rozpuszczonego (Wang i in., 2025). Z drugiej strony, w polach międzyostrogowych dochodzi do sedymentacji materii organicznej, a więc intensyfikują się procesy biochemicznego rozkładu osadów, a tym samym zapotrzebowanie na tlen rośnie. W konsekwencji pojawiają się lokalne deficyty tlenowe (Tseng i Tinoco, 2021).

Skuteczność mieszania wód w strefie dopływu zależy w dużej mierze od geometrii i rozmieszczenia ostróg. Ostrogi zlokalizowane po przeciwnej stronie ujścia dopływu zmniejszają zasięg stref o obniżonym stężeniu tlenu, ograniczają przenikanie zanieczyszczeń do głównego nurtu i kierują wodę o lepszej jakości w stronę obszarów zdegradowanych. Z kolei ostrogi po stronie dopływu intensyfikują proces mieszania dzięki powstawaniu wirów między ostrogami, co sprzyja wzrostowi stężenia tlenu i poprawie warunków ekologicznych wód przybrzeżnych (Shen i in., 2024). W takich układach obserwuje się szybsze procesy samooczyszczania i regeneracji jakości wód głównego cieku po dopływie wód zanieczyszczonych do rzeki głównej.

EKOLOGICZNE OSTROGI HYDROTECHNICZNE JAKO ELEMENT POPRAWY JAKOŚCI WÓD RZECZNYCH

Działalność człowieka w pobliżu rzek, zwłaszcza rolnictwo, przyczynia się do zanieczyszczenia rzek związkami azotu i fosforu, odpowiedzialnymi za proces eutrofizacji (Czerebiej i in., 2013). Samooczyszczanie rzek jest istotnym procesem świadczącym o jej kondycji (Tian i in., 2011). Rzeka oczyszcza się poprzez przepływ, rozpuszczanie, odkładanie oraz wchłanianie kontaminantów, co zachodzi przy udziale rozpuszczonego tlenu i mikroorganizmów (Kaniecki, 1976). Na intensywność procesu samooczyszczania się rzek wpływają prędkość i natężenie przepływu, rodzaj osadów oraz organizmy. Procesy samooczyszczania zachodzą wydajniej w naturalnych odcinkach rzek, gdzie rzeka meandruje, tworząc się mielizny i rozlewiska, a brzegi porośnięte są roślinnością drzewiastą (Survilé, 2017). Przyspieszony przepływ wody w regulowanym korycie, także w wyniku konstrukcji ostróg, przyczynia

się do skróconego czasu, jaki rzeka ma na samooczyszczanie. Jednakże procesy samooczyszczania mogą zachodzić w pobliżu brzegu wzmocnionego ostrogami. Przyspieszony i turbulentny przepływ wody w obrębie ostróg przyczynia się do lepszego mieszania wody, zwiększenia ilości rozpuszczonego tlenu, a tym samym poprawy jakości wody w pobliżu ostróg (Wang i in., 2025). Równocześnie dłuższy czas retencji wody w obrębie ostróg daje więcej możliwości dla biologicznych procesów rozkładu zanieczyszczeń organicznych (Shen i in., 2024).

W ostatnich latach coraz częściej podkreśla się, że konstrukcje te mogą pełnić funkcje ekohydrotechniczne, wspierając procesy samooczyszczania wód oraz poprawę warunków ekologicznych rzek. W kontekście nowych trendów projektowych coraz większe zainteresowanie budzą tzw. ekologiczne ostrogi hydrotechniczne, w których kluczową rolę odgrywają nie tylko geometria, lecz także dobór materiałów o właściwościach sorpcyjnych i biologicznych. Badania prowadzone w Chinach wykazały, że zastosowanie materiałów biologicznych, np. biologicznego zeolitu, w konstrukcji ostróg może znacząco zwiększyć ich potencjał w oczyszczaniu wód z zanieczyszczeń azotowych, a efektywność tego oczyszczania zależy również od czasu kontaktu wody z biofilmem, warunkowanego położeniem ostrogi (Chen i in., 2022).

Najkorzystniejsze efekty uzyskano dla ostróg naprzemiennych (ang. *staggered*), w których woda omijająca pierwszą ostrogę napotyka kolejną, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo kontaktu z biofilmem. Taki układ sprzyja tworzeniu się wielokrotnych stref recyrkulacji, co prowadzi do najwyższej skuteczności oczyszczania – nawet dwukrotnie wyższej niż w przypadku pojedynczej ostrogi (Chen i in., 2022).

ODDZIAŁYWANIE OSTRÓG NA RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNĄ

Ostrogi regulacyjne istotnie wpływają na organizację przestrzenną siedlisk oraz strukturę zespołów biologicznych w ekosystemach rzecznych. Ich obecność sprzyja powstawaniu stref o zróżnicowanych warunkach hydraulicznych, co pro-

wadzi do tworzenia mikrosiedlisk o odmiennych właściwościach fizykochemicznych (Teraguchi i in., 2011; Nakagawa i in., 2013). Odpowiednio zaprojektowane ostrogi mogą odtwarzać warunki zbliżone do naturalnych, wspierające utrzymanie wysokiej różnorodności biologicznej (Shih i in., 2008). Wydmy powstałe w przestrzeniach między ostrogami stanowią siedliska dla roślin i zwierząt, a niska prędkość przepływu oraz cykliczne zalewanie i osuszanie tych obszarów tworzą warunki sprzyjające rozwojowi zróżnicowanych zespołów organizmów. Pola między ostrogami mogą pełnić rolę mikrosiedlisk o podwyższonej jakości wody. Wykazują wyższe stężenie tlenu i wyższe pH w ciągu dnia oraz niższą mętność w wyniku szybkiej sedymentacji, czego konsekwencją jest wyższa produkcja pierwotna fitoplanktonu (Böhme, 2006). W przestrzeniach między ostrogami dochodzi do sedymentacji osadów, co sprzyja tworzeniu się mikrosiedlisk o zróżnicowanym charakterze – od miękkiego dna (muł, glina) po odsłonięte skały i żwir (Hennig i Hentschel, 2013; Friedrich i in., 2008). Taka heterogenność siedliskowa sprzyja występowaniu różnych grup organizmów, w tym zbieraczy, drapieżników i skrobaczy (Heino i in. 2015; Sueiro i in. 2011) (Ryc. 1).

ODDZIAŁYWANIE NA PLANKTON

Ostrogi rzeczne i przestrzenie między nimi mają wpływ na to, jak rozprowadzane są substancje odżywcze w wodzie. To z kolei wpływa na wzrost i rozmieszczenie planktonu, który jest podstawą łańcucha pokarmowego w ekosystemach wodnych. W kontekście zmian klimatycznych (np. częstsze susze, intensywniejsze opady, zmiany temperatury) ten wpływ może się nasilić lub zmienić, co może mieć konsekwencje dla całego ekosystemu rzecznoego (Quiel i in., 2011).

Zwiększoną różnorodność planktonu obserwuje się za ostrogami w porównaniu z obszarami przed nimi, co wynika z modyfikacji warunków środowiskowych, takich jak przepływ wody, dostępność światła i składników odżywczych. Jednakże bakterie (prokaryoty) wykazują odwrotny trend, z wyższą różnorodnością przed ostrogami, co prawdopodobnie związane jest

ze zmianami w dostępności materii organicznej i warunkach tlenowych (Wan i in., 2023).

Jak podają Wan i in. (2023), zmiany w strukturze taksonomicznej planktonu są wyraźne. W fitoplanktonie zaobserwowano dominację Cryptophyta przed ostrogami, podczas gdy za ostrogami dominują Chlorophyta. Wśród zooplanktonu Arthropoda (np. Copepoda) preferują obszary za ostrogami, szczególnie typu spur dikes, gdzie znajdują najbardziej sprzyjające warunki. Grzyby (Ascomycota) również rozwijają się lepiej za ostrogami, szczególnie za wydłużonymi ostrogami. W przypadku bakterii β -Proteobacteria i Bacteroidetes wykazują spadek liczebności za ostrogami, co może być związane ze zmniejszeniem mętności wody. Z drugiej strony, Proteobacteria (np. *Limnohabitans*, *Acinetobacter*) rozwijają się lepiej w warunkach zwiększonego stężenia tlenu, które często występują za ostrogami.

PRZESTRZENIE POMIĘDZY OSTROGAMI I ICH ROLA W KSZTAŁTOWANIU HABITATÓW

Systemowa zabudowa drastycznie zmienia cykl transportu osadów. Ostrogi tworzą strefy o niskiej prędkości przepływu i wiry powrotne, co wymusza sedymentację materiału w polach międzyostrogowych – proces ten nazywany jest załadowaniem. Przestrzenie między ostrogami są miejscem akumulacji osadów, które sprzyjają tworzeniu się wydym na terenach zalewowych (Ten Brinke i in., 2004). Osady (np. piasek, żwir, muł) transportowane z górnego odcinka rzeki podczas powodzi są deponowane w polach między ostrogami, szczególnie w obszarach o najniższych prędkościach przepływu. Głównymi strefami depozycji są miejsca tuż za głową ostrogi, środkowa część pola między ostrogami oraz obszary przy terenach zalewowych (Friedrich i in., 2008). Przeciwnie do zwężonego koryta rzecznoego z przyspieszonym nurtem rzecznoym, brzeg rzeki wzmocniony ostrogami, a szczególnie przestrzenie pomiędzy ostrogami cechują się zaburzonym przepływem wody uzależnionym od kształtu i położenia ostrogi (Yossef, 2002). Jak podaje Brolsma (1988), w przestrzeniach pomiędzy ostrogami prąd wodny formuje wir obejmujący $\frac{3}{4}$ strefy pomiędzy ostrogami, a najbardziej burzliwy przepływ wody obserwuje się na końcach ostróg.

Nurt główny wpływa do połowy szerokości strefy pomiędzy ostrogami, poszerzając w tym miejscu koryto rzeczne. Drugi, mniejszy wir powstaje na górnej powierzchni kolejnej ostrogi (Ryc. 1). Zmieniony przepływ wody w strefie ostróg regulacyjnych przyczynia się do formowania odmiennych warunków i powstania nowych habitatów. Wiry formujące się pomiędzy ostrogami przyczyniają się do depozycji osadów transportowanych przez rzekę przy wewnętrznych krawędziach ostróg oraz pomiędzy nimi i jednocześnie wzmoczonej erozji końców ostróg (Henning i Hentschel, 2013). Proces załadowania jest wspomagany przez roślinność, która biomechanicznie wzmacnia strukturę nowo powstałych łądów i stabilizuje brzegi (Maurya i in., 2025). Ma to również negatywne skutki. W wyniku rozwoju roślinności i załadowania obszarów między ostrogami rosną opory przepływów, a tym samym maleje przepustowość hydrauliczna koryta, a prędkości przepływu w różny sposób rozkładają się w przekroju pionowym (Bednarczyk i Duszyński 2008).

ROŚLINY PORASTAJĄCE OSTROGI

Rola roślinności porastającej ekosystemy wodne jest ogromna, działają one jako inżynierowie ekosystemu, aktywnie oddziałując na procesy hydrologiczne, geomorfologiczne i ekologiczne (O'briain i in., 2024). Roślinność poprzez transpirację, infiltrację i opór hydrauliczny wpływa na łączność hydrologiczną w rzece (Tabacchi i in., 2000). Jednocześnie dzięki możliwości zatrzymywania osadów i stabilizacji brzegów reguluje zdolność systemu rzecznoego do transportu osadów w obrębie zlewni (Gurnell i Bertoldi, 2022).

Sukcesywnie deponowane osady w pobliżu ostróg przyczyniają się do wypłylenia brzegu i umożliwiają sukcesję roślinności nadbrzeżnej i wodnej, tworząc w ten sposób nowe habitaty (Sukhodolov i in., 2016). Jeżeli brzeg rzeki, jak i same ostrogi porastają makrofity (ukorzenione rośliny wodne), jak np. wywłócznik kłosowy (*Myriophyllum spicatum*), część zanieczyszczeń może być absorbowana z wody (Tian i in., 2011).

W obliczu narastających problemów związanych z erozją brzegów rzek oraz degradacją ekosystemów wodnych, inżynieria wodna coraz częściej sięga po rozwiązania zintegrowane z naturą. Jednym z takich rozwiązań są roślinne ostrogi rzeczne, które łączą funkcje techniczne z ekologicznymi. Tradycyjne ostrogi, szczególnie w warunkach wysokiego poziomu wody, mogą ulec zatopieniu, co ogranicza ich skuteczność. Iqbal i in. (2024) wykazali, że dodanie roślinności na górnej części ostrogi znacząco poprawia jej działanie nawet w warunkach zanurzenia. Roślinność działa jako naturalny moderator hydrauliczny, zmniejszając prędkość przepływu, energię turbulencji oraz naprężenia styczne przy dnie.

Oprócz funkcji technicznych, ważnych dla kontroli przepływu i depozycji osadów, roślinne ostrogi pełnią istotną rolę ekologiczną, poprawiając jakość wody poprzez naturalną filtrację, zatrzymując korzeniami osady i zanieczyszczenia, stabilizując brzegi oraz tworząc siedliska dla organizmów wodnych i przybrzeżnych (Iqbal i in., 2025).

ODDZIAŁYWANIE NA BEZKRĘGOWCE

Zmiany w rodzaju podłoża i w reżimie przepływu wywołane intensywnymi pracami regulacyjnymi mają istotny wpływ na skład zespołów bentosowych. Kamieniste fragmenty dna sprzyjają drapieżnikom (np. ważki), skrobaczom (np. *Semisulcospira* sp.) oraz filtratorom (np. *Limnoperna lacustris*), natomiast obszary pokryte drobnym osadem są preferowane przez zbieraczy, takich jak rureczniki czy larwy ochotkowatych. W strefach recyrkulacji mogą powstawać mikrosiedliska o podwyższonej jakości wody, które sprzyjają różnorodności bentosu (Pan i in., 2015).

Podobny efekt obserwuje się w przypadku ostróg, które modyfikują warunki hydrauliczne i tworzą pola o spokojnym przepływie, przypominające starorzecza. Badania Buczyńskiej i in. (2018) wykazały, że obecność ostróg w Odrze zwiększa heterogeniczność siedlisk i różnorodność biologiczną larw chruścików (Trichoptera), sprzyjając zasiedlaniu przez gatunki limnofilne i limnobiontyczne (typowe dla wód stojących)

oraz kształtowaniu zróżnicowanej struktury troficznej bentosu, co jest charakterystyczne dla bardziej naturalnych lub zrenaturyzowanych odcinków rzek.

Pola między ostrogami pełnią funkcję kompensacyjną, ograniczając negatywny wpływ żeglugi i umożliwiając rozwój gatunków o wąskich wymaganiach siedliskowych. Ostrogi działają jak „wewnętrzne wyspy”, które w warunkach przekształconych antropogenicznie mogą częściowo przywracać funkcje utraconych równin zalewowych, zwiększając bioróżnorodność zarówno bezkręgowców bentosowych, jak i drapieżnych owadów wodnych (Buczyńska i in., 2018).

Badania Buczyńskiego i in. (2017) wykazały, że ostrogi zwiększają różnorodność biologiczną ważek, wpływając na liczebność larw oraz obecność gatunków o wąskich wymaganiach siedliskowych. W rzekach zmienionych przez człowieka ostrogi tworzą zatoki o wolnym przepływie, które przypominają naturalne starorzecza, czyli typowe siedliska wielu bezkręgowców, w tym ważek. Obecność ostróg zwiększa nie tylko różnorodność gatunkową, ale także liczebność larw ważek w porównaniu z odcinkami bez ostróg. W umocnionym odcinku Odry wysoką różnorodność ważek obserwowano głównie w polach między ostrogami, natomiast fragmenty rzeki pozbawione tych struktur cechowały się znacznie uboższą fauną, co wynikało m.in. z falowania wody wywołanego przez przepływające jednostki.

ODDZIAŁYWANIE NA RYBY

Jakość siedliska (np. dostępność tlenu, struktura dna, przepływ) ma kluczowe znaczenie dla przetrwania i rozmnażania ryb (Gebrekiros, 2016). Tlen rozpuszczony jest jednym z najważniejszych czynników chemicznych wpływających na skład populacji ryb. Wzrost temperatury wody ogranicza rozpuszczalność tlenu, jednocześnie zwiększając zapotrzebowanie metaboliczne ryb. Może to prowadzić do śmiertelności wśród gatunków wrażliwych, zwłaszcza drapieżnych, takich jak szczupak czy bass, które charakteryzują się wyższymi wymaganiami tle-

nowymi niż mniejsze gatunki przystosowane do warunków niedotlenienia. Brak odpowiednich warunków może prowadzić do spadku liczebności populacji, wymierania gatunków lub zastępowania ich przez gatunki bardziej tolerancyjne (Gebrekiros, 2016).

Ostrogi regulacyjne tworzą warunki sprzyjające bytowaniu ryb reofilnych i limnofilnych. Główki ostróg stanowią dogodne siedliska dla młodych osobników takich gatunków jak miętus pospolity (*Lota lota*), śliz (*Barbatula barbatula*), kleń (*Leuciscus cephalus*) czy brzanka (*Barbus barbus*) (Bischoff i Wolter, 2001). Strefy o obniżonej prędkości przepływu między ostrogami tworzą mikrohabitaty, w których ryby drapieżne, takie jak szczupak, okoń i sandacz, mogą bezpiecznie odpoczywać i aktywnie żerować (Eick i Thiel, 2013). Dodatkowo wysoki poziom natlenienia oraz obecność osadów sprzyjają tarłu ryb, np. troci wędrownej (*Salmo trutta*) (Winkler, 2024). Roślinność w obrębie ostróg stanowi również miejsce rozrodu i schronienia dla wielu gatunków ryb, w tym dla form młodocianych, takich jak miętus pospolity (*Lota lota*) czy śliz (*Barbatula barbatula*).

Zanurzone ostrogi mogą lokalnie podnosić poziom wody, umożliwiając migrację ryb w warunkach niskiego przepływu. Odpowiednie rozmieszczenie ostróg oraz ich geometria tworzą ciągłe korytarze migracyjne o optymalnej głębokości i prędkości przepływu (Lasinger i in., 2024). Zróżnicowanie warunków hydraulicznych, takich jak wiry, strefy cienia czy zmienne przepływy, zwiększa heterogeniczność środowiska, co sprzyja agregacji ryb, ponieważ daje im możliwość wyboru miejsc o korzystnych warunkach energetycznych i schronienia przed drapieżnikami (Huang i in., 2019). W przypadku niekorzystnego rozmieszczenia i geometrii ostróg migracja ryb może być zakłócona np. poprzez znoszenie narybku do habitatów o mniej optymalnych warunkach (Shih i in., 2008). Dlatego projektowanie ostróg, oprócz analizy hydraulicznej, powinno uwzględniać gatunki docelowe i ich wymagania ekologiczne oraz dane biologiczne, takie jak preferencje siedliskowe czy cykl życiowy gatunków zasiedlających dany ekosystem.

ODDZIAŁYWANIE NA PTACTWO

Obecność ostróg regulacyjnych wpływa na roślinność, skład bentosu, stabilność poziomu wody oraz jej chemizm, tym samym różnicując dostępność odpowiednich siedlisk i pokarmu dla ptactwa (Pardo i in. 2008).

Przyspieszony nurt koryta rzecznoego uniemożliwia odkładanie się osadów w postaci mierzwi, łach, ławic, odsypisk, przyczyniając się do zaniku habitatów niektórych gatunków ptaków. Obecność ostróg i betonowych umocnień powoduje zanik wysp i łach w nurcie, utratę siedlisk kluczowych dla gatunków siewkowych i rybitw oraz homogenizację środowiska, czyli brak zróżnicowania siedlisk, tworząc na rzecce warunki praktycznie niedostępne dla ptaków (Bukaciński i in., 2020).

Wprowadzenie ostróg do środowiska i związana z nimi izolacja hydrologiczna wpływają na strukturę zespołów ptaków w mokradłach przybrzeżnych. Analizy porównawcze przeprowadzone na mokradłach Wielkich Jezior wykazały, że choć zagęszczenie i bogactwo gatunkowe ptaków lęgowych w mokradłach groblowanych i otwartych na naturalne wahania poziomu wody są zbliżone, ich skład gatunkowy różni się istotnie (Pardo i in., 2008). W mokradłach tworzonych przez ostrogi dominują kaczki i czaplowate, natomiast liczebność rybitw i mew jest mniejsza. Bąk amerykański (*Botaurus lentiginosus*) oraz karolinka (*Aix sponsa*) częściej występują w mokradłach groblowanych, podczas gdy rybitwa czarnoucha (*Sterna forsteri*) i mewa (*Larus argentatus*, *Larus delawarensis*) preferują mokradła otwarte. Różnice te wynikają ze zmian w strukturze roślinności, stabilności poziomu wody, dostępności pokarmu (większej liczby makrobezkręgowców w mokradłach groblowanych) oraz odmiennych warunków chemicznych wody (Pardo i in., 2008).

Podobne różnice pomiędzy uregulowanym i nieuregulowanym odcinkiem rzeki zaobserwowano na Wiśle (Bukaciński i in., 2020). Silnie uregulowany odcinek Wisły przy Elektrowni Kozienice (km 421–426) jest prawie całkowicie przekształcony przez liczne betonowe ostrogi, opaski brzegowe i betonowy brzeg chroniący elektrow-

nię, niemal całkowicie wykluczając możliwość gniazdowania w korycie rzeki. Stwierdzono jedynie pojedyncze pary czajki (*Vanellus vanellus*), piskliwca (*Actitis hypoleucos*), sieweczki rzecznej (*Charadrius dubius*) i nurogęsia (*Mergus merganser*), sporadycznie rybitwy rzecznej (*Sterna hirundo*). Dla porównania, na odcinku nieuregulowanym (km 416–421) gniazdowało 27–30 gatunków, w tym wszystkie gatunki zagrożone, takie jak rybitwa białoczarna (*Sterna albifrons*), sieweczka obrożna (*Charadrius hiaticula*), ostrzygojad (*Haematopus ostralegus*), mewa siwa (*Larus canus*), derkacz (*Crex crex*) i dudek (*Upupa epops*) (Bukaciński et al., 2020).

Także na dolnym odcinku Wisły prace regulacyjne przyczyniły się do zaniku naturalnych wysp z lasami łęgowymi i drobnych łąch, a zamiast nich pojawiły się monotonne, płaskie formy akumulacyjne, tzw. ławice skośno-naprzemianległe, powiązane z obecnością ostróg i opasek brzegowych (Habel, 2018). Struktury te zmniejszyły różnorodność siedlisk. Brak jest tam miejsc osłoniętych (krzewy, trawy, pnie), co ogranicza możliwości gniazdowania ptaków wodnych. Łachy są niższe (ok. 0,5 m niższe niż w odcinkach nieuregulowanych) i bardziej podatne na zalewanie. Nawet krótkotrwałe wezbrania (naturalne lub sztuczne) przekształcają powierzchnię łąch, niszcząc gniazda i lęgi (Habel, 2018).

Regulacja i eksploatacja zapory we Włocławku powodują częste wahania poziomu wody, w tym sztuczne fale powodziowe (do 40 razy w sezonie). Każda fala zalewa ławice na kilka godzin, co eliminuje lęgi gatunków takich jak rybitwy (*Sterna hirundo*, *Sternula albifrons*) czy sieweczki (*Charadrius dubius*, *C. hiaticula*). Na podstawie analiz 30 lat danych, tylko w 14 sezonach spełniono minimalne warunki dla sukcesu łęgowego (ciągle 35 dni bez zalania). Po 1996 r. sukces łęgowy występuje średnio raz na 3 lata. W odcinku regulowanym Wisły warunki siedliskowe są niewystarczające do utrzymania populacji łęgowych (Habel, 2018). Konstrukcje hydrotechniczne wpływają również na dynamikę ujść rzecznych. Zmiany w amplitudzie pływów, prędkości przepływów oraz dynamiki sedymentacji zaburzają funkcjonowanie mokradeł, takich jak

solniska, namorzyny i łąki traw morskich – kluczowych dla ptaków wodnych i siewkowych.

NOWE TRENDY ZWIĄZANE Z OSTROGAMI

Ostrogi zwiększają opór przepływu i podnoszą poziom wody podczas wezbrań, co może pogłębiać skutki powodzi. Program „Room for the River” w Holandii powstał jako alternatywa dla ciągłego podwyższania wałów przeciwpowodziowych. Jego głównym celem jest zwiększenie przestrzeni dla rzeki, aby obniżyć ryzyko powodzi i poprawić odporność systemu w obliczu zmian klimatu. Jednym z kluczowych działań w tym programie jest zmniejszenie oporu hydraulicznego ostróg. W ramach programu stosuje się obniżanie ostróg (ang. *groyne lowering*) oraz ich profilowanie (ang. *streamlining*), czyli obniżanie skarpy ostrogi, aby dodatkowo ograniczyć straty energii i poprawić przepływ. Te modyfikacje zmniejszają turbulencje i straty energii, co skutkuje obniżeniem poziomu wody w czasie powodzi. Badania pokazują, że pierwsze centymetry obniżenia ostróg dają największy efekt, a spłaszczanie skarpy dodatkowo redukuje opór. Te działania są szczególnie istotne w Niderlandach, gdzie gęsta sieć ostróg w dolinie Renu i jego dopływów wpływa na poziomy wody przy wysokich przepływach bez konieczności dalszego podwyższania wałów (Yildiz i in., 2024).

Zamiast podwyższania wałów i zajmowania nowych terenów, modyfikacja ostróg pozwala zachować naturalne doliny rzeczne. Następuje poprawa warunków dla ekosystemów, gdyż zmniejszenie turbulencji i lokalnych zawirowań sprzyja stabilizacji osadów i tworzeniu siedlisk dla ryb oraz roślin wodnych. Promowane są naturalne procesy renaturyzacji, ponieważ w czasie powodzi osady odkładają się po drugiej stronie ostróg, co dodatkowo profiluje ich kształt i zmniejsza opór w sposób naturalny (Yildiz i in., 2024).

PODSUMOWANIE

Ostrogi regulacyjne stanowią jeden z kluczowych elementów inżynierii hydrotechnicznej, istotnie wpływając na funkcjonowanie systemów rzecznych zarówno w wymiarze technicznym, jak

i ekologicznym. Jak wykazano, odpowiednio zaprojektowane i rozmieszczone układy ostróg, uwzględniające dynamikę przepływu, morfologię koryta oraz charakter dopływów, mogą znacząco wspierać procesy samooczyszczania wód, poprawiać warunki tlenowe oraz sprzyjać ochronie i odbudowie ekosystemów wodnych. Jednocześnie niewłaściwa geometria lub lokalizacja ostróg może prowadzić do efektów niepożądanych, takich jak powstawanie stref stagnacji, akumulacja zanieczyszczeń czy lokalne deficyty tlenowe, co podkreśla konieczność ich starannego projektowania.

Współczesne podejście do regulacji rzek coraz częściej odchodzi od rozwiązań jednofunkcyjnych na rzecz koncepcji zrównoważonych i ekohydratechnicznych. Roślinne ostrogi rzeczne oraz konstrukcje wykorzystujące materiały biologiczne i ekologiczne (np. substraty porośnięte biofilmem) stanowią przykład integracji skuteczności technicznej z troską o środowisko. Tego typu rozwiązania nie tylko stabilizują brzegi i koryto rzeki, lecz także tworzą zróżnicowane siedliska, sprzyjające rozwojowi fauny i flory wodnej, sukcesji roślinności oraz zwiększeniu bioróżnorodności.

Ostrogi pełnią zatem funkcję wieloaspektową: z jednej strony poprawiają warunki żeglugowe, ograniczają erozję i kontrolują transport rumowiska, z drugiej zaś modyfikują lokalne warunki hydrauliczne, tworząc mozaikę stref o zróżnicowanej prędkości przepływu i warunkach ekologicznych. W środowisku zurbanizowanym mogą one dodatkowo pełnić funkcję renaturyzacyjną, przyczyniając się do odbudowy zdegradowanych siedlisk i łagodzenia negatywnych skutków urbanizacji.

Nowoczesne technologie, w szczególności modelowanie numeryczne, umożliwiają precyzyjne prognozowanie oddziaływań ostróg na przepływ, sedymentację oraz warunki tlenowe, co pozwala na optymalizację ich kształtu, rozmieszczenia i trwałości. Integracja wiedzy z zakresu hydrauliki, sedymentologii i ekologii staje się obecnie standardem w projektowaniu rozwiązań hydratechnicznych, zwłaszcza w kontekście wyzwań związanych ze zmianami klimatu, koncepcją „*room for the river*” oraz rosnącą potrzebą renaturyzacji cieków wodnych.

Podsumowując, ostrogi regulacyjne mogą stanowić skuteczne narzędzie zrównoważonego zarządzania rzekami, pod warunkiem uwzględnienia ich funkcji ekologicznych już na etapie projektowania. Przyszłe działania powinny koncentrować się zarówno na adaptacji i modernizacji istniejących konstrukcji, jak i na rozwoju elastycznych, wielofunkcyjnych rozwiązań inżynierskich. Dalsze badania terenowe i modelowe są niezbędne do pełniejszego poznania długoterminowych oddziaływań ostróg na jakość wody i ekosystemy rzeczne oraz do wypracowania rekomendacji dla ich praktycznego zastosowania w XXI wieku.

OŚWIADCZENIE AUTORÓW

Wszyscy autorzy deklarują wkład w powstawanie artykułu, zaakceptowali kolejność autorów i ostateczną wersję artykułu oraz deklarują brak konfliktu interesów.

BIBLIOGRAFIA

- Abraham, D.D., Cowan, M.A., Hendrickson, J.S., Katzenmeyer, W.M., Landwehr, K.J., Pratt, T.C., 2006. Effects of pool drawdown and wing dams, and closure dams, on navigation channel sedimentation processes, upper Mississippi River. US Army Corps of Engineers Report ERDC TR-06-2, 79.
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA447295.pdf>
- Anderson, E.P., Jackson, S., Tharme, R.E., Douglas, M., Flotemersch, J.E., Zwarteveen, M., Lokgariwar, C., 2019. Understanding rivers and their social relations: A critical step to advance environmental water management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6(6), e1381.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1381>
- Azinfar, H., Kells, J.A., 2011. Drag force and associated backwater effect due to an open channel spur dike field. *Journal of Hydraulic Research* 49 (2), 248–256.
<http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2011.552470>
- Babiński, Z., 1997. Procesy erozyjno-akumulacyjne poniżej stopnia wodnego Włocławek, ich konsekwencje i wpływ na morfodynamikę planowanego zbiornika Nieszawa. *Polska Akademia Nauk Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania*. Toruń, ss. 46.

- Backiel, T., & Penczak, T., 1989. The fish and fisheries in the Vistula River and its tributary, the Pilica River. w: *Proceedings of the International Large River Symposium 106*, 488–503. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences.
- Bajkiewicz-Grabowska, E., Mikulski, Z., 2013. *Hydrologia ogólna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Bednarczyk, S., Duszyński, R., 2008. *Hydrauliczne i hydrotechniczne podstawy regulacji i rewitalizacji rzek*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, ss. 224.
- Bischoff, A., Wolter, C., 2001. Groyne-heads as potential summer habitats for juvenile rheophilic fishes in the Lower Oder, Germany. *Limnologica* 31(1), 17–26.
[https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(01\)80043-8](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(01)80043-8)
- Buczyńska, E., Szlauer-Łukaszewska, A., Czachorowski, S., Buczyński, P., 2018. Human impact on large rivers: the influence of groynes of the River Oder on larval assemblages of caddisflies (Trichoptera). *Hydrobiologia* 819, 177–195.
<https://doi.org/10.1007/s10750-018-3636-6>
- Buczyński, P., Szlauer-Łukaszewska, A., Tończyk, G., Buczyńska, E., 2017. Groynes: a factor modifying the occurrence of dragonfly larvae (Odonata) on a large lowland river. *Marine and Freshwater Research* 68(9), 1653–1663.
<https://doi.org/10.1071/MF16217>
- Bukaciński, D., Bukacińska, M., Buczyński, A., 2020. Wetland birds of middle Vistula River during breeding season: the impact of human activities on the distribution, abundance and richness of species. *Studia Ecologiae Et Bioethicae* 18(5), 335–348.
<https://doi.org/10.21697/seb.2020.18.5.30>
- Böhme, M., 2006. Distribution of water quality parameters in two cross-sections of the river Elbe measured with high local, temporal, and analytic resolution. *Acta hydrochimica et hydrobiologica* 34(3), 201–213.
<https://doi.org/10.1002/ahch.200400627>
- Boland, T., 1980. A Classification of the Wing and Closing Dams on the Upper Mississippi River Bordering Iowa.
- Brolsma, J. U., 1988. Six-barge push-tow trials. PIANC, Den Haag.
- Chabokpour, J., 2024. Numerical simulation of optimum groyne arrangement for preventing bank erosion (Case study of Ghezel-Ozan River). Preprint.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4623183/v1>
- Chen, Y.T., Wang, X.L., Li, S.M., Zheng, Y.Z., Dong, G.Y., 2022. Purification efficiency of ecological spur dikes for river pollutants in different geometric arrangements: Experiments and numerical modeling. *Journal of Hydrodynamics* 34(5), 934–947.
<https://doi.org/10.1007/s42241-022-0074-8>
- Czerebiej, Z., Szatten, D., Marciniak, Ż., 2013. Proces eutrofizacji wód powierzchniowych w regionie wodnym Dolnej Wisły na przykładzie obszaru szczególnie narażonego na zanieczyszczenie azotem ze źródeł rolniczych Kotomierzyc. *Journal of Health Sciences* 3(14), 66–74.
- Duan, J.G., 2009. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike. *Journal of Hydraulic Engineering* 135(10), 803–811.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000007](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000007)
- Dutta, D., & Kalita, H.M., 2019. Performances of straight head and T-head groynes as river training structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 491 (1), 012013.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/491/1/012013>
- Dudgeon, D., Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z.I., Knowler, D.J., Lévêque, C., Naiman, R.J., Prieur-Richard, A.H., Soto, D., Stiassny, M.L.J., Sullivan, C.A., 2006. Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 81(2), 163–182.
<https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>
- Eick, D., Thiel, R., 2013. Key environmental variables affecting the ichthyofaunal composition of groyne fields in the middle Elbe River, Germany. *Limnologica* 43(4), 297–307.
<https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.01.001>
- Escaramela, M., 1998. River and channel revetments. *A Des Man*, 20, 245.
- Ferguson, R.I., 2012. River channel slope, flow resistance, and gravel entrainment thresholds. *Water Resources Research*, 48(5).
<https://doi.org/10.1029/2011WR010850>
- Friedrich, H., Melville, B.W., Gasset, R., 2008. Model experiments: Influence of floods on sediment deposits in rivers equipped with groynes, w: *Processing of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Izmir, 1601–1609.
- Gebrekiros, S.T., 2016. Factors affecting stream fish community composition and habitat suitability. *Journal of Aquaculture and Marine Biology* 4(2), 00076.
<https://doi.org/10.15406/jamb.2016.04.00076>

- Gilewski, M., 2011. Zarządzanie zasobami wodnymi w kulturze Majów. Międzywydziałowe Towarzystwo Naukowe Badań i Ochrony Światowego Dziedzictwa Kulturowego "Humanica". Uniwersytet Warszawski
- Glas, M., Glock, K., Tritthart, M., Liedermann, M., & Habersack, H. (2018). Hydrodynamic and morphodynamic sensitivity of a river's main channel to groyne geometry. *Journal of Hydraulic Research*, 56(5), 714–726.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1405369>
- Gu, Z., Cao, X., Gu, Q., Lu, W-Z., 2020. Exploring Proper Spacing Threshold of Non-Submerged Spur Dikes with Ipsilateral Layout. *Water* 12(1), 172.
<https://doi.org/10.3390/w12010172>
- Guo, J., Gao, L., Xu, X., Xia, J., 2023. Development of Reinforced Concrete Piles in the Lower Yellow River, China. *Sustainability*, 15(19), 14500.
<https://doi.org/10.3390/su151914500>
- Gurnell, A.M., Bertoldi, W., 2022. The impact of plants on fine sediment storage within the active channels of gravel-bed rivers: A preliminary assessment. *Hydrological Processes*, 36(7), e14637.
<https://doi.org/10.1002/hyp.14637>
- Grześ, B., 1991. Zatory i powódzie zatorowe na dolnej Wiśle. Mechanizmy i warunki. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk.
- Habel, M., 2018. Effects of flow regulation and river channelization on sandbar bird nesting availability at the Lower Vistula River. *Ecological Questions* 29 (4), 43–53.
<https://doi.org/10.12775/EQ.2018.028>
- Han, X., Parker, G., Lin, P., 2025. High-fidelity numerical study of the effect of wing dam fields on flood stage in rivers. *Water Resources Research* 61(3), e2024WR037852.
<https://doi.org/10.1029/2024WR037852>
- Hasan, M.Z., Toda, Y., 2024. Enhancing riverbank protection along the Jamuna River, Bangladesh: review of previous countermeasures and morphological assessment through groyne-based solutions using numerical modeling. *Water* 16(2), 297.
<https://doi.org/10.3390/w16020297>
- Henning, M., Hentschel, B., 2013. Sedimentation and flow patterns induced by regular and modified groynes on the River Elbe, Germany. *Ecohydrology* 6(4), 598–610.
<https://doi.org/10.1002/eco.1398>
- Heino, J., Melo, A. S., Bini, L.M., 2015. Reconceptualising the beta diversity–environmental heterogeneity relationship in running water systems. *Freshwater Biology* 60, 223–235.
<https://doi.org/10.1111/fwb.12502>
- Hu, J., Wang, G., Wang, P., Yu, T., Chen, H., 2022. Experimental study on the influence of new permeable spur dikes on local scour of navigation channel. *Sustainability*, 15(1), 570.
<https://doi.org/10.3390/su15010570>
- Huang, T., Lu, Y., Liu, H., 2019. Effects of Spur Dikes on Water Flow Diversity and Fish Aggregation. *Water* 11(9), 1822.
<https://doi.org/10.3390/w11091822>
- Igielski, R., 2023. Militarna rola rzek na śląskim obszarze działań wojennych. *Zarys historyczny. Studia Śląskie*, 92, 83–98.
- Iqbal, S., Tanaka, N., 2023. An Experimental Investigation on Dike Stabilization against Floods. *Geosciences* 13(10), 307.
<https://doi.org/10.3390/geosciences13100307>
- Iqbal, S., Siddique, M., Hamza, A., Murtaza, N., Pasha, G.A., 2024. Computational analysis of fluid dynamics in open channel with the vegetated spur dike. *Innovative Infrastructure Solutions* 9(9), 345.
<https://doi.org/10.1007/s41062-024-01636-w>
- Iqbal, S., Haider, R., Pasha, G.A., Zhao, L., Abbas, F.M., Anjum, N., Murtaza, N., Abbas, Z., 2025. Numerical Investigation of Flow Around Partially and Fully Vegetated Submerged Spur Dike. *Water* 17(3), 435.
<https://doi.org/10.3390/w17030435>
- Kaniecki, A., 1976. Próby określenia stopnia samoczyszczania rzek województwa koszalińskiego. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią. Seria A: Geografia Fizyczna*, 29.
- Kędzierska, K., Kaźmierczak, A., 2023. Rola rzeki w ożywianiu miasta. Przykład Poznania na tle europejskich osiągnięć w kształtowaniu waterfrontów. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej* 15, 295–310.
<https://doi.org/10.21008/j.2658-2619.2023.15.16>
- King, H., 2015. The use of groynes for river bank erosion protection and river stabilization: State of art report 2015.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2773.3203>
- King, H., 2009. The use of groynes for riverbank erosion protection. In *Proceeding of river hydraulics, stormwater and flood management conference*. University of Stellenbosch.

- Kiss, T., Fiala, K., & Sipos, G., 2008. Alterations of channel parameters in response to river regulation works since 1840 on the Lower Tisza River (Hungary). *Geomorphology* 98(1–2), 96–110.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.027>
- Lasinger, N., Leutgöb, E., Habersack, H., & Sindelar, C., 2024. Development of innovative groynes to establish fish passability of regulated rivers based on the example of the Wien River, Austria. Part I: Impact of groyne parameters on water depth and velocity. *River Research and Applications* 40(5), 725–734.
<https://doi.org/10.1002/rra.4269>
- Liu, D., Lv, S., Li, C., 2024. Impact of Spur Dike Placement on Flow Dynamics in Curved River Channels: A CFD Study on Pick Angle and River-Width-Narrowing Rate. *Water* 16(16), 2236.
<https://doi.org/10.3390/w16162236>
- Łajczak, A., 2006. Regulacja rzeki a zagrożenie powodziowe, na przykładzie Wisły między Skoczowem i Puławami. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4/1, 197–215.
- Nakagawa, H., Zhang, H., Baba, Y., Kawaike, K., Terauchi, H., 2013. Hydraulic characteristics of typical bank-protection works along the Brahmaputra/Jamuna River, Bangladesh. *Journal of flood risk management* 6(4), 345–359. DOI: 10.1111/jfr3.12021
- Nandhini, D., Murali, K., Harish, S., Schüttrumpf, H., Heins, K., & Gries, T. 2024. A state-of-the-art review of normal and extreme flow interaction with spur dikes and its failure mechanism. *Physics of Fluids*, 36(5).
<https://doi.org/10.1063/5.0202439>
- Ma, B., Dong, F., Peng, W.Q., Liu, X. B., Huang, A.P., Zhang, X.H., & Liu, J.Z., 2020. Evaluation of impact of spur dike designs on enhancement of aquatic habitats in urban streams using 2D habitat numerical simulations. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01288.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01288>
- Maurya, O.P., Nandi, K.K., Dutta, S., 2025. Harnessing Vegetation as a Nature-Based Solution for Integrated River Corridor Management: A Path Towards Harmonized Human–Nature Synergy. *Ecohydrology* 18(5), e70094.
<https://doi.org/10.1002/eco.70094>
- Micheli, E.R., Larsen, E.W., 2011. River channel cutoff dynamics, Sacramento river, California, USA. *River Research and Applications*, 27(3), 328–344.
<https://doi.org/10.1002/rra.1360>
- Minaev, I.V., Maslov, B.S. 2009. History of Land Improvement. W: *Agricultural Land Improvement: Amelioration and Reclamation*, Maslov, B.S., (red.). *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*; Eolss Publ. Co., Ltd.: Oxford, UK, 1, ss. 95–116.
- Mohammad, V., Yaser, S., Shaker, H.S., 2016. Effects of distance between the T-shaped spur dikes on flow and scour patterns in 90 bend using the SSIIM model. *Ain Shams Engineering Journal* 7(1), 31–45.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.008>
- Nycz, E., 2023. Dziejowa i obecna rola rzeki w życiu społeczno-gospodarczym miasta (przykład Kędzierzyna-Koźła). *Studia Śląskie* 92, 99–116.
- O'Briain, R., Corenblit, D., Garófano-Gómez, V., O'Leary, C., 2024. Towards biogeomorphic river restoration: Vegetation as a critical driver of physical habitat. *River Research and Applications* 40(6), 1087–1105.
<https://doi.org/10.1002/rra.4288>
- Pan, B.Z., Wang, Z. Y., Li, Z.W., Lu, Y.J., Yang, W.J., Li, Y.P., 2015. Macroinvertebrate assemblages in relation to environments in the West River, with implications for management of rivers affected by channel regulation projects. *Quaternary International*, 384, 180–185.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.08.012>
- Pandey, M., Ahmad, Z., Sharma, P.K., 2018. Scour around impermeable spur dikes: a review. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 24(1), 25–44.
<https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1342571>
- Pardo, B., Monfils, M. J., Brown, P.W., Inventory, M.N.F., 2008. Effects of hydrologic isolation via dike construction on avian communities using great lakes coastal wetlands. *MNFI Report Number* 2008–16.
- Pasha, G.A., Murtaza, N., Iqbal, S., Ghumman, A.R., Aldrees, A., i in., 2025. Multi-parameter evaluation for optimizing spur dike spacing in river engineering. *Physics of Fluids* 37, 105146.
<https://doi.org/10.1063/5.0286220>
- Prasad, S.K., Indulekha, K.P., Balan, K., 2016. Analysis of groyne placement on minimising river bank erosion. *Procedia Technology*, 24, 47–53.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.008>
- Robakiewicz M., 2006. Rola ostróg w regulacji rzek. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* 4(2), 151–158.
- Quiel, K., Becker, A., Kirchesch, V., Schöl, A., Fischer, H., 2011. Influence of global change on phy-

- toplankton and nutrient cycling in the Elbe River. *Regional Environmental Change* 11(2), 405–421.
<https://doi.org/10.1007/s10113-010-0152-2>
- Samide, G.W., Beckstead, G., 1975. Design considerations for stream groynes.
- Seignemartin, G., Mourier, B., Riquier, J., Winiarski, T., Piégay, H., 2023. Dike fields as drivers and witnesses of twentieth-century hydrosedimentary changes in a highly engineered river (Rhône River, France). *Geomorphology* 431, 108689.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108689>
- Shen, X., Li, D., Cao, L., Wang, K., Yuan, X., i in., 2024. The influence of vortex flow generated by spur dikes on the distribution and mixing of dissolved oxygen at a wide-shallow confluence. *Physics of Fluids* 36, 105106.
<https://doi.org/10.1063/5.0233630>
- Shih, S.S., Lee, H.Y., Chen, C.C., 2008. Model-based evaluations of spur dikes for fish habitat improvement: A case study of endemic species *Varicorhinus barbatulus* (Cyprinidae) and *Hemimyzon formosanus* (Homalopteridae) in Lanyang River, Taiwan. *Ecological engineering* 34(2), 127–136.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.07.016>
- Shynkaruk, L.A., Volk, L.R., Dovbenko, I.E., 2024. Regulation of water flow on the foothills on the Ukrainian Carpathians rivers with the use of flooded groynes. w: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing 1415 (1), 012099.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012099>
- Simon, A., Bennett, S. J., Castro, J.M., 2013. Stream restoration in dynamic fluvial systems: Scientific approaches, analyses, and tools. John Wiley & Sons.
- Suchożębski, J., 2018. Zasoby wodne Polski. *Zarządzanie zasobami wodnymi w Polsce*, 92–96.
- Sueiro, M.C., Bortolus, A., Schwindt, E., 2011. Habitat complexity and community composition: Relationships between different ecosystem engineers and the associated macroinvertebrate assemblages. *Helgoland Marine Research* 65, 467–477.
<https://doi.org/10.1007/s10152-010-0236-x>
- Sukhodolov, A., Uijttewaalt, W.S., Engelhardt, C., 2002. On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(3), 289–305.
<https://doi.org/10.1002/esp.319>
- Sukhodolov, A.N., Sukhodolova, T.A., Krick, J., 2016. Effects of vegetation on turbulent flow structure in groyne fields. *Journal of Hydraulic Research* 55(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1211183>
- Survilé, O., 2017. An Assessment of Self-purification of Regulated and Natural Streams.
<https://doi.org/10.3846/ENVIRO.2017.090>
- Szczerkowska-Majchrzak, E., Grzybkowska, M., 2008. Piętrzenia rzek i energia wodna; za i przeciw. *Kosmos*, 57(3–4), 295–303.
- Tabacchi, E., Lambs, L., Guillo, H., Planty-Tabacchi, A.M., Muller, E., Décamps, H., 2000. Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. *Hydrological Processes*, 14(16–17), 2959–2976.
[https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2959::AID-HYP129>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2959::AID-HYP129>3.0.CO;2-B)
- Ten Brinke, W.B.M., Schulze, F.H., Van der Veer, P., 2004. Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: The impact of navigation versus river flow. *River Research and Applications* 20(8), 899–928.
<https://doi.org/10.1002/rra.809>
- Teraguchi, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., Zhang, H., 2011. Effects of hydraulic structures on river morphological processes. *International Journal of Sediment Research* 26(3), 283–303.
[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60094-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60094-2)
- Tian, Y., Wang Z., Shang H., 2011. Study on the self-purification of Juma River. *Procedia Environmental Sciences* 11, 1328–1333.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.199>
- Török, G.T., Parker, G., 2025. Wing dam effects on water and bed levels in rivers are influenced by bed-load type. *Communications Earth & Environment* 6, 778.
<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02739-7>
- Tseng, C.Y., Tinoco, R.O., 2022. From substrate to surface: A turbulence-based model for gas transfer across sediment-water-air interfaces in vegetated streams. *Water Resources Research*, 58(1), e2021WR030776.
<https://doi.org/10.1029/2021WR030776>
- van der Wal, M., 2020. Bank Protection Structures along the Brahmaputra-Jamuna River, a Study of Flow Slides. *Water*, 12(9), 2588.
<https://doi.org/10.3390/w12092588>
- Wan, Y., Huang, G., Du, H., Yang, S., Yang, W., Li, W., 2023. Effects of waterway regulation structures on

- the planktonic community in the upper Yangtze River. *Ecological Indicators* 155, 111049.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111049>
- Wang, K., Li, X., Shen, X., Peng, Z., Li, D. 2025. Hydrodynamic Effects of Spur Dike on Dissolved Oxygen Transport and Mass Transfer Processes at a Curved Confluence. SSRN.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5203770>
- Watson, C.C., Biedenbarn, D.S., Thorne, C.R., 2013. Analysis of the Impacts of Dikes on Flood Stages in the Middle Mississippi River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(10), 1071–1078.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000786](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000786)
- Wetzel, R.G., Likens, G.E., 2000. *Dissolved Oxygen. w: Limnological Analyses*. Springer, New York, NY.
https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3250-4_6
- Winkler, J., 2024. Mapping potential spawning habitats of brown trout in the river Schwechat.
https://sportfischereiverein-baden.com/wp-content/uploads/2024/02/Mapping-potential-spawning-habitats-of-brown-trout_240209_085332.pdf
- Wołoszyn, J., Czamara, W., Eliasiewicz, R., Krężel, J., 1994. *Regulacja rzek i potoków*. Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2.
- Yildiz, B., Ambagts, L., Yossef, M.F.M., Mosselman, E., 2024. Evaluation of different numerical approaches to modeling flood flows over groynes. *Water Resources Research* 60, e2023WR036895.
<https://doi.org/10.1029/2023WR036895>
- Yossef, M.F., 2002. The effect of groynes on rivers. Literature Review. TUDelft/Library.
<https://resolver.tudelft.nl/f19f9bd8-b3b3-4bf9-81ae-825d7d07e8df>
- Zhou, T., Endreny, T., 2020. The straightening of a river meander leads to extensive losses in flow complexity and ecosystem services. *Water*, 12(6), 1680.
<https://doi.org/10.3390/w12061680>