



Wpływ cofki zbiornika zaporowego na koryto rzeki górskiej – perspektywy badań

The impact of dam-reservoir backwater on mountain river channel – research perspectives

Maciej Liro¹  Kazimierz Krzemień² 

¹Institut Ochrony Przyrody PAN
al. Adama Mickiewicza 33, 31-120 Kraków

²Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
maciej.liro@gmail.com • k.krzemien@geo.uj.edu.pl

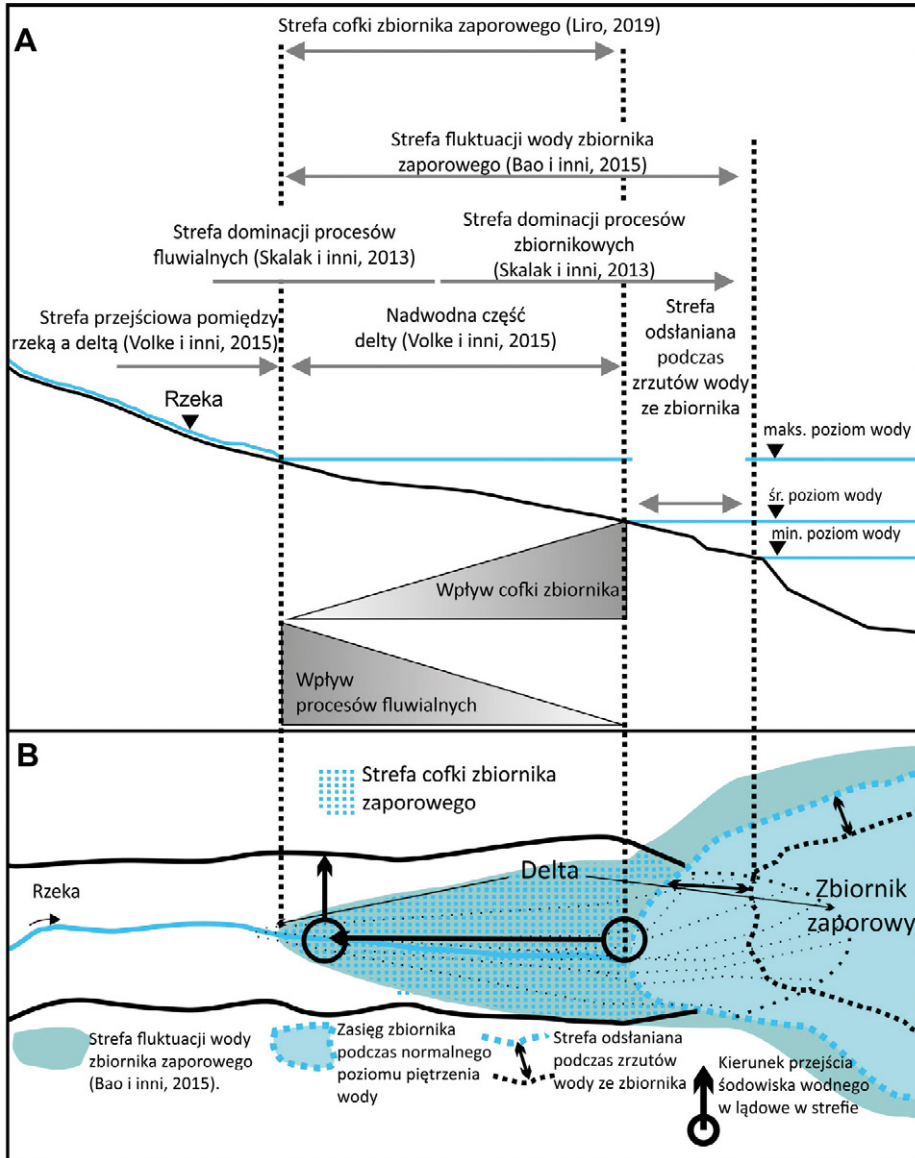
Zarys treści. Strefa cofki zbiornika zaporowego to fragment dna doliny rzeki powyżej zbiornika zaporowego zalewany wodą podczas stanów wyższych niż jego normalny/średni poziom piętrzenia (tzw. zjawisko cofki). Oddziaływanie cofki na procesy fluwialne może wywoływać długookresowe zaburzenia w funkcjonowaniu abiotycznych i biotycznych elementów systemu fluwialnego, ponieważ wielkość i czas trwania zalewów wody związanych z cofką są większe niż te wynikające z naturalnego reżimu rzeki. Dotychczasowe prace pokazują, że oddziaływanie cofki na rzekę żwirową powoduje wymuszoną depozycję rumowiska korytowego i związane z tym zmiany morfologii koryta (faza 1) oraz depozycję drobnoziarnistego rumowiska przyczyniającą się do ekspansji roślinności nadrzecznej na nieporośnięte części koryta i prowadzącą do rozwoju stabilnego bocznie, krętego koryta (faza 2). W cofce może także dochodzić do przekształceń struktury roślinności nadrzecznej (np. eliminacji roślinności nieodpornej na stres wodny), przekształceń struktury siedlisk zwierząt nadrzecznych oraz wymuszonych zmian użytkowania terenu. Zmiany te mogą istotnie wpływać na funkcjonowanie systemu fluwialnego w strefie cofki i stanowią wyzwanie dla zagospodarowania przestrzennego tych stref. Szczególnie interesująca dla przyszłych badań wydaje się ilościowa analiza zmian interakcji hydrodynamika-osady-roślinność, wywołanych przez cofkę w ciekach górskich różnych stref klimatycznych.

Słowa kluczowe: zbiornik zaporowy, antropocen, rzeka górska, roślinność nadrzeczna.

Wstęp

Ingerencja człowieka w działanie systemów rzecznych jest zauważalna już od ponad 4000 lat, a budowa zapór wodnych jest uznawana za jeden z najbardziej spektakularnych przykładów tej ingerencji (Gregory, 2006). Obecnie na świecie funkcjonuje 57 985 dużych zapór wodnych (o wysokość >15 m), z czego aż 8 tys. powstało w ostatniej dekadzie (Poff i Schmidt, 2016; ICOLD, 2019). Pomimo tak dużej liczby tych obiektów i równie dużej liczby badań o ich efektach geomorfologicznych (m.in. Williams i Wolman, 1984; Brandt, 2000; Petts i Gurnell, 2005; Grant, 2012), stosunkowo niewiele wiadomo o zmianach koryt w odcinkach powyżej zbiorników zaporowych w tzw. strefie cofki (ang. *backwater fluctuation*

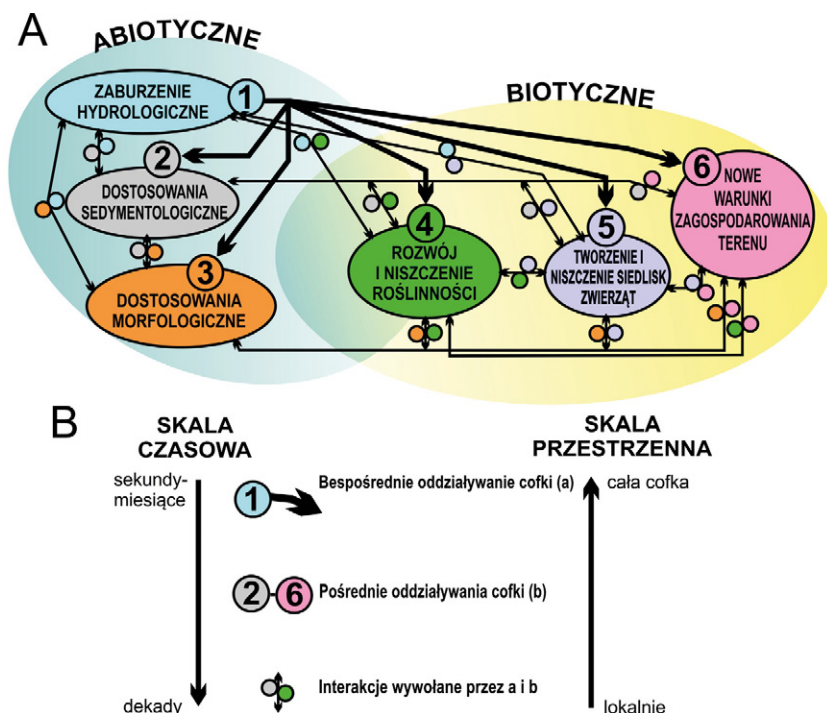
zone) (ryc. 1). W strefie tej może dochodzić do zaburzeń abiotycznych (hydrodynamika, osady, morfologia) i biotycznych (roślinność, siedliska zwierząt, sposób użytkowania terenu) elementów systemu fluwialnego (ryc. 2). Na świecie temat ten był do tej pory badany



Ryc. 1. Schemat zasięgu strefy cofki zbiornika zaporowego (A) w profilu podłużnym rzeki i (B) w otoczeniu zbiornika zaporowego w kontekście najważniejszych stref w otoczeniu zbiorników zaporowych definiowanych wcześniej

A schematic representation of the spatial extent of the backwater zone shown in: (A) the river longitudinal profile and (B) zones defined previously along dam reservoirs

Źródło: Liro (2019); nieznacznie zmienione / Source: Liro (2019); slightly modified.



Ryc. 2. Model konceptualny zmian komponentów systemu fluwalnego wywołanych oddziaływaniem cofki zbiornika zaporowego

A – zmiany abiotycznych i biotycznych komponentów ekosystemu fluwalnego oraz interakcje pomiędzy nimi zainicjowane oddziaływaniem cofki zbiornika zaporowego, B – hierarchia oraz skala czasowa i przestrzenna powyższych zmian i interakcji

Conceptual model of abiotic-biotic interactions in a fluvial system resulting from reservoir backwater influences

A – changes and interactions in abiotic-biotic components of the fluvial ecosystem induced by reservoir backwater influences, B – spatial and temporal pattern to these changes

Źródło/Source: Liro (2019).

głównie w kontekście zmian morfologii koryt rzek zbudowanych z materiału drobnoziarnistego w strefie klimatu umiarkowanego i półsuchego (Leopold i inni, 1964; Maddock, 1966; Leopold i Bull, 1979; Xu, 1990, 2001; Xu i Shi, 1997).

W Polsce większość prac geomorfologicznych dotyczących zbiorników zaporowych koncentrowała się na procesach zamulania oraz przekształcaniach ich stref brzegowych (m.in. Cyberski, 1965; Banach, 1985, 1988; Ziętara, 1992; Rahmonow i inni, 1998; Łajczak, 1995, 1996, 1999; Rzętała, 2003; Banach i inni, 2013; Kaczmarek, 2018). Problem dostosowań morfologicznych koryt w cofkach był sygnalizowany m.in. podczas badań rozwoju delt i koryt powyżej zbiorników zaporowych na rzekach żwirowodnych (Klimek i inni, 1990; Babiński, 1992; Łajczak, 2006; Wiejaczka, 2011; Wiejaczka i inni, 2014) i piaszkodennych (Florek i inni, 2008; Gierszewski i inni, 2018), analiz jakości hydromorfologicznej cieków (Wiejaczka i Kijowska-Strugała, 2015), modelowania depozycji rumowiska dennego (Książek, 2006) oraz w badaniach wpływu zapór przeciwrumowiskowych na dynamikę zmian koryt rzek (Korpak, 2007; Korpak i inni, 2008). Od niedawna dostosowania koryt rzek żwirowodnych w cofkach są przedmiotem osobnych opracowań. Jednak stan wiedzy na ten

temat wciąż pozostaje ograniczony do kilku studiów przypadków (Liro, 2015, 2016, 2017). Dotychczasowe prace sugerują jednak, że strefy cofek zbiorników zaporowych mogą być traktowane jako laboratoria terenowe do dalszych badań biogeomorfologicznych, ponieważ dochodzi w nich do intensywnych i dających się precyzyjnie określić w czasie i przestrzeni zmian komponentów abiotycznych i biotycznych systemu fluwalnego oraz do zainicjowania sprzężeń zwrotnych pomiędzy nimi (Liro, 2019). Celem tego artykułu jest omówienie aktualnego stanu wiedzy o zmianach górskich koryt rzecznych w strefach cofek zbiorników zaporowych oraz wskazanie perspektyw ich dalszych badań.

Definicja strefy cofki

Strefa cofki zbiornika zaporowego definiowana jest jako fragment doliny rzecznej powyżej zbiornika zaporowego, który jest zatapiany wodami podczas wyższego niż normalny/średni poziom jego piętrzenia (ryc. 1) (Liro, 2019).

W dotychczasowej literaturze przedmiotu brak było jednolitej terminologii dotyczącej definicji i zasięgu przestrzennego cofki zbiornika zaporowego (por. Xu, 1990; Alibert i inni, 2011; Azami i inni, 2013; Bao i inni, 2015; Tang i inni, 2014, 2016). Zdefiniowana powyżej strefa cofki położona jest w obrębie różnych stref wyznaczanych w dolinie rzecznej we wcześniejszych pracach (*river-dominated i reservoir-dominated transitional*, Skalak i inni, 2013, 2017; *water-level fluctuation zone*, Bao i inni, 2015; *fluctuating backwater riparian zone*, Wang i inni, 2016; *artificial riparian zone*, Tang i inni, 2014, 2016; *delta topset*, Łajczak 2006; *subaerial delta zone, fluvial-delta transition zone*, Volke i inni, 2015; *delta-backwater unit*, Volke i inni, 2019). Y. Bao i inni (2015) zwracają uwagę na przejściowość procesów w strefach brzegowych zbiorników zaporowych odzwierciedloną w zmianach zasięgu środowiska wodnego i lądowego, wynikającą z cyklicznych inundacji wody. Podkreślają oni także podobieństwo tych sztucznie wytworzonych stref do strefy litoralnej (ang. *litoral zone*, Keddy, 2010), strefy nadrzecznej (*riparian zone*, Hupp i Osterkamp, 1996), czy strefy ekotonu nadrzecznego (*riparian ecotone*, Verry i inni, 2004), które powstają na skutek naturalnych fluktuacji wody rzek i jezior.

Górskie koryta żwirowe w strefach cofek – aktualny stan wiedzy

Dotychczasowe prace sugerują, że przebieg ewolucji koryta żwirowego w cofce zbiornika zaporowego zależy zarówno od czasu oddziaływania cofki na procesy fluwalne, jak i inicjalnej struktury koryta i doliny rzecznej (Liro, 2015, 2016, 2017). Przebieg tych dostosowań w czasie można podzielić na dwie fazy. W każdej z tych faz główne procesy wpływające na przebieg zmian są inne.

W pierwszym etapie dostosowań (do około 20 lat funkcjonowania zbiornika) kluczową rolę odgrywają duże wezbrania (Liro, 2015) oraz zróżnicowanie przestrzenne podatności brzegów koryta na erozję (Liro, 2016). Uwarunkowania te decydują o dostawie rumowiska korytowego z górnej części zlewni oraz z lokalnych źródeł (podcięcia brzegów, dopływy). Wielkość i zróżnicowanie przestrzenne dostawy rumowiska korytowego jest kluczowe dla morfologii koryta żwirowego w strefie cofki, ponieważ ograniczona jest tutaj możliwość jego dalszego transportu. Wymuszona depozycja i ograniczenie możliwości trans-

portu rumowiska dennego prowadzi w cofce do rozwoju dużych niemigrujących łach (fot. 1) oraz do wytworzenia się sprzężeń zwrotnych pomiędzy erozją brzegów a lokalną depozycją (ang. *bar-bank interaction*; Liro, 2016) (interakcja 1↔2 na ryc. 2). Istnienie tej interakcji decydująco wpływa na lokalną morfologię koryta, prowadząc do szybkiego rozwoju meandrów oraz utrzymania dużej powierzchni łach i szerokiego koryta, tworząc specyficzną strefę depozycji (ang. *backwater sediment slug*) (Nicholas i inni, 1995; Liro, 2016) (fot. 1, ryc. 3), która rozwija się w górę rzeki. Rozwój tej strefy jest związany z procesem tzw. retrogradacji (Łajczak, 2006) i stanowi przykład lokalnej bariery w korycie rzeki (Fryirs i inni, 2007; Fryirs, 2013).

Wraz z upływem czasu miąższość drobnoziarnistych osadów na równinie zalewowej i łachach w cofce wzrasta, co prowadzi do zmniejszenia możliwości erozji tych form podczas wezbrań. W dłuższym okresie (>20 lat) dominującym procesem jest wywołane przez ekspansję roślinności nadrzecznej zwężanie koryta, redukcja liczby nurtów i wzrost krętości koryta. Wielkość tych zmian zależy od inicjalnej szerokości koryta i dna doliny (Liro, 2017). W przypadku koryta początkowo jednonurtowego, bez znaczącej powierzchni łach korytowych, w cofce względnie szybko dochodzi do jego lateralnej stabilizacji na skutek ekspansji roślinności (ryc. 3).

Dotychczasowe badania pokazują, że reakcja koryta na wezbranie różni się znacząco pomiędzy początkowym (<20 lat) a późniejszym (>20 lat) okresem dostosowań koryta w cofce. W pierwszym okresie koryto poszerza się podczas wezbrań (Liro, 2015), w drugim natomiast częściej pozostaje stabilne nawet podczas dużych wezbrań w związku z bardziej miąższą pokrywą drobnoziarnistych osadów i gęstą pokrywą roślinną na brzegach (Liro, 2017) (fot. 2).

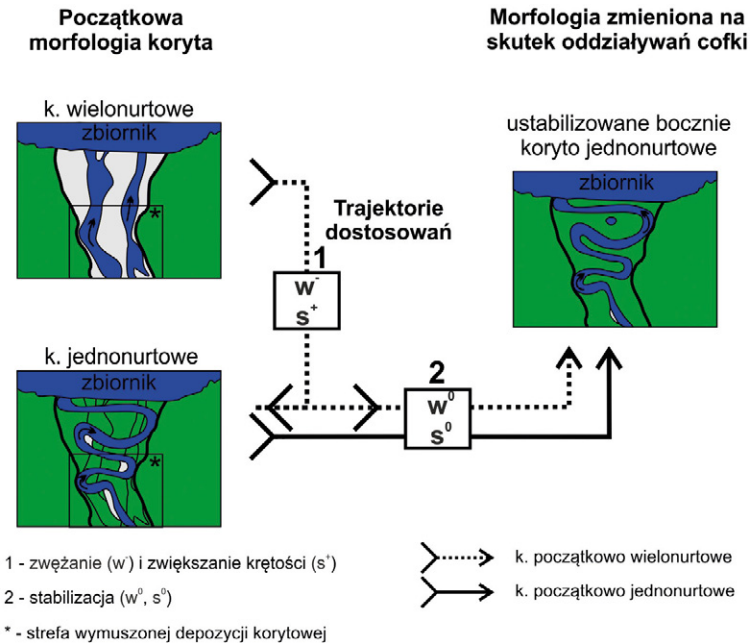


Fot. 1. Wymuszona depozycja osadów korytowych Dunajca w cofce funkcjonującego od 1997 r. Zbiornika Czorsztyńskiego przyczyniła się do wzrostu szerokości koryta w tej strefie (fot. M. Liro)
Forced in-channel sediment deposition of the Dunajec within the backwater zone of the Czorszтын Reservoir (built in 1997) favours local channel-widening



Fot. 2. Kręte koryto potoku Smolnik w strefie cofki Zbiornika Rożnowskiego, funkcjonującego od 1942 r., rozwinęło się na skutek depozycji drobnopłynnych osadów i rozwoju roślinności na wcześniej istniejących łachach żwirowych (fot. M. Liro)

The sinuous channel of the Smolnik Stream in the backwater fluctuation zone of the Rożnów Reservoir (built in 1942). This morphology was developed as the a results of fine fine-sediments deposition and the expansion of vegetation on the previously -existing gravel bars



Ryc. 3. Model długookresowych zmian koryta żwirowego w cofce zbiornika zaporowego
Model of long-term changes to a gravel-bed channel planform in a dam-reservoir backwater zone
 Źródło: Liro (2017); nieznacznie zmienione / Source: Liro (2017); slightly modified.

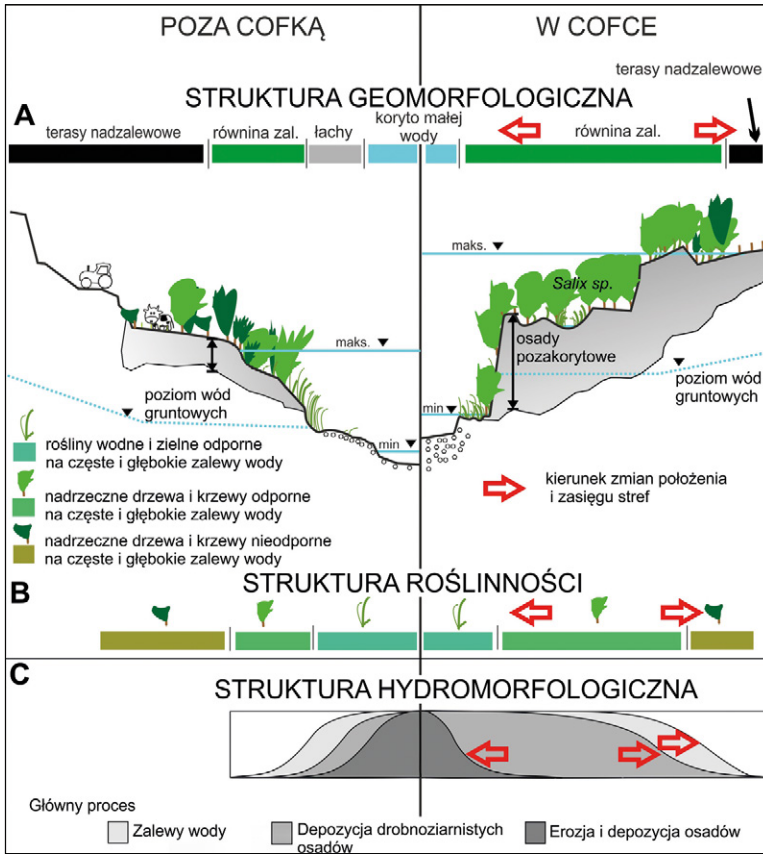
Perspektywy dalszych badań i gospodarowania strefami cofek

Intensywna depozycja rumowiska korytowego obserwowana w pierwszej fazie dostosowań w cofce może istotnie wpływać na częstość, głębokość i zasięg przepływów pozakorytowych podczas wezbrań (nawet bez równoczesnego występowania efektu cofki). Większa częstość i wysokość stanów pozakorytowych może występować także do kilkuset metrów powyżej maksymalnego zasięgu cofki, gdzie nastąpiła intensywna depozycja materiału korytowego i wynikające z niej splotenie koryta. W przypadku koryt rzek nizinnych zmiany poziomu dna i morfologii koryta wywołane depozycją w cofce nie odgrywają tak dużej roli morfologicznej i hydrodynamicznej, jak w przypadku rzek źwirodennych. Dlatego wydaje się, że wyliczenia inżynierskie zasięgu cofki na rzece źwirodennej mogą po kilku latach funkcjonowania zbiornika różnić się od tych wykonanych dla głębokości, szerokości, spadku oraz szorstkości koryta cieku w momencie powstawania zbiornika.

Istotnym tematem przyszłych badań są ilościowe analizy powiązań pomiędzy właściwościami osadów zdeponowanych w cofce (parametry uziarnienia, parametry chemiczne, miąższość) a parametrami oraz dynamiką porastającej je roślinności. Wcześniejsze badania pokazały, że brzegi w obszarze cofek są pokryte bardziej miększą warstwą drobnoziarnistych osadów (Klimek i inni, 1990), a łachy korytowe są w większym stopniu pokryte roślinnością niż poza strefą cofki. W przyszłych badaniach można np. określić, jaki jest wpływ tych zmian sedymentologicznych (Klimek i inni, 1990) oraz pokrycia roślinnego na budowę brzegów i form w obrębie równiny zalewowej (np. wały przykorytowe). Istnieją badania pokazujące, że budowa brzegu jest uwarunkowana procesami sedymentacji na równinie zalewowej oraz typami roślinności porastającej brzeg koryta (Gurnell i inni, 2006). Dlatego uzasadnione wydaje się założenie, że w cofce budowa brzegu koryta oraz równiny zalewowej powinna się znacząco różnić od tej występującej poza cofką.

Oddziaływanie cofki mogą także znacząco modyfikować przebieg cykli sukcesji biogeomorfologicznej (*ang. fluvial biogeomorphic succession*) zaproponowanych przez D. Corenblit'a i innych (2007). Koncepcja ta opisuje zróżnicowany w czasie przebieg dwukierunkowej interakcji pomiędzy rozwojem roślinności a zmianami morfologicznymi koryta. Ostatnie prace sugerują, że w niżej położonych częściach cofki przebieg ww. sukcesji może przebiegać ciągle bez tzw. odmładzania roślinności (Liro, 2019), które w warunkach braku oddziaływania cofki wywołują wezbrania (Corenblit i inni, 2007, 2015; Gurnell i inni, 2012, 2016). Skutkiem może być brak form i formacji roślinnych związanych z pionierską fazą sukcesji (np. inicjalne wyspy korytowe), istotnych dla ekologii cieku oraz zmiany w rozmieszczeniu stref interakcji pomiędzy roślinnością nadrzeczną a procesami geomorfologicznymi (Gurnell i inni, 2016) (ryc. 4).

Ostatnie badania N. Bätza i innych (2016) sugerują, że istnieje relacja pomiędzy poziomem wód gruntowych a ekspansją roślinności na równinie zalewowej rzeki źwirodennej. Wyniki te wskazują, że podniesienie wód gruntowych w cofce może być kolejnym uwarunkowaniem (poza depozycją drobnoziarnistych osadów i częstszymi stanami pozakorytowymi) sprzyjającym ekspansji roślinności.



Ryc. 4. Przewidywane zmiany geomorfologiczne (A), w strukturze roślinności (B) oraz w rozmieszczeniu stref hydromorfologicznych (C) w korycie żwirowym, wywołane oddziaływaniem cofki

Effects of backwater fluctuations on: (A) geomorphic structure, (B) riparian vegetation, and (C) hydromorphological zonation of a gravel-bed river marked in a river cross section

Źródło/Source: Liro (2019).

Wpływ skutków oddziaływania cofki na jakość hydromorfologiczną cieku

Dotychczasowe badania pokazują, że oddziaływanie cofki istotnie modyfikuje hydrodynamikę przepływów w korycie oraz właściwości materiału budującego dno i brzegi. Są to istotne parametry warunkujące istnienie siedlisk ryb i bezkręgowców w tej strefie koryta oraz zwierząt żyjących na równinie zalewowej. Zmiany parametrów morfologicznych koryta w początkowym okresie jego dostosowań w cofce, np. wzrost szerokości koryta czy zwiększenie powierzchni łach, mogą pozytywnie wpływać na jakość hydromorfologiczną cieku w tym okresie (por. Wiejaczka i Kijowska-Strugała, 2015). W przypadku zdegradowanych koryt poddanych wcześniej regulacji można oczekiwać, że w początkowym okresie dostosowań w cofce może wystąpić samoczynna renaturyzacja koryta przy względnie niewielkich nakładach finansowych (por. Górczyca, 2016). Ingerencja człowieka w takim wypadku wymagałaby jedynie uniemożliwienia lub kontrolowania wydobycia ru-

mowiska korytowego i grubego rumoszu drzewnego w takiej strefie oraz odpowiedniego wyznaczenia i ochrony strefy migracji koryta w dnie doliny. Działania takie mogłyby znacząco przyczynić się do poprawy funkcjonowania ekologicznego ekosystemu korytowego w odcinkach cofek. Istnienie takich stref ochrony w cofkach mogłoby w pewnym sensie rekompensować część negatywnych skutków oddziaływania zbiorników zaporowych. Działania takie są obecnie podejmowane w cofkach tworzących się powyżej dopływów na dużych rzekach w USA (Coulter i inni, 2017).

Zasięg przestrzenny i czasowy oddziaływania cofki

Dotychczasowe prace pokazują, że przebieg dostosowań morfologicznych koryta w strefach cofek jest najszybszy w początkowej fazie istnienia zbiornika, kiedy następuje intensywna depozycja osadów i szybki rozwój delt (Łajczak, 1986, 1996; Klimek i inni, 1990). Dlatego po wystąpieniu dostosowań morfologicznych świadczących o długookresowym dostosowaniu koryta w cofce (np. stabilne lateralnie, kręte koryto, zwarta pokrywa roślinna na równinie zalewowej) (Liro, 2014, 2017) dalsze zmiany morfologiczne powinny być niewielkie. Jedynie w przypadku usunięcia lub obniżenia zapory lub wystąpienia katastrofalnego wezbrania przy równoczesnym niskim poziomie wody w zbiorniku (brak efektu cofki), możliwe wydają się zmiany morfologiczne koryta poddanego długookresowemu oddziaływaniu cofki.

Wnioski

Zaburzenie wywołane w korycie żwirodennym przez cofkę zbiornika zaporowego istotnie zmienia strukturę i dynamikę koryta rzecznego. Ostatnie badania wykonane w polskich Karpatach pokazują, że zmiany te różnią się pomiędzy początkowym a późniejszym okresem dostosowań koryta w cofce.

W początkowym okresie dostosowań (<20 lat) koryta żwirodennego powyżej zbiornika zaporowego dominuje wzrost szerokości koryta oraz wzrost powierzchni łąch, które rozwijają się w górę rzeki, aż poza strefę cofki. Zmiany te są związane z przebiegiem depozycji gruboziarnistego rumowiska korytowego, której wielkość zależy głównie od wielkości lokalnej erozji brzegu.

W późniejszym okresie dostosowań (>20 lat) koryta żwirodennego w cofce dominuje zwężanie koryta i wzrost jego krętości. Zmiany te są związane z przebiegiem ekspansji roślinności nadrzecznej w korycie, która jest uwarunkowana wielkością przestrzeni akomodacyjnej (powierzchnia łąch, szerokość koryta), dostępnej w korycie do porostania przez roślinność nadrzeczna.

Dotychczasowe wyniki sugerują, że obszary cofek zbiorników zaporowych w korytach rzek żwirodennych są miejscem istotnych przekształceń komponentów abiotycznych i biotycznych systemu fluwialnego, decydujących o odrębności w funkcjonowaniu tych odcinków rzek. Szczególnie interesująca dla przyszłych badań wydaje się ilościowa analiza zmian interakcji hydrodynamika-osady-roślinność (Liro, 2019), wywołanych przez cofkę w ciekach górskich różnych stref klimatycznych. Wyniki takich prac pozwoliłyby na ocenę

oraz prognozę przekształceń geo- i bioróżnorodności obszarów cofek oraz skuteczniejsze zarządzanie tymi obszarami w przyszłości.

Dziękujemy dwóm recenzentom za uwagi do pierwszej wersji artykułu. Zaprezentowane w artykule wyniki pochodzą z rozprawy doktorskiej Macieja Liro obronionej w 2018 r. w IGiGP UJ w Krakowie oraz wstępnych wyników grantu nr 2015/19/N/ST10/01526 realizowanego w IOP PAN w Krakowie.

Piśmiennictwo

- Alibert M., Assani A.A., Gratton D., Leroux D., Laurencelle M., 2011, *Statistical analysis of the evolution of a semialluvial stream channel upstream from an inversion-type reservoir: the case of the Matawin River (Quebec, Canada)*, *Geomorphology*, 131, s. 28–34.
- Azami K., Fukuyama A., Asaeda T., Takechi Y., Nakazawa S., Tanida K., 2013, *Conditions of establishments for Salix community at lower-than-normal water levels along a dam reservoir shoreline*, *Landscape and Ecological Engineering*, 9, s. 227–238.
- Babiński Z., 1992, *Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły*, *Prace Geograficzne*, 157, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Banach M., 1985, *Osady denne – wskaźnik hydrodynamiki Zbiornika Włocławskiego*, *Przegląd Geograficzny*, 57, 4, s. 487–497.
- Banach M., 1988, *Główne procesy a osady w strefie brzegowej zbiornika Włocławek*, *Przegląd Geograficzny*, 60, s. 267–299.
- Banach M., Kaczmarek H., Tyszkowski S., 2013, *Rozwój osuwisk w strefie brzegowej sztucznych zbiorników wodnych na przykładzie osuwiska centralnego w Dobrzyniu nad Wisłą*, *Zbiornik Włocławski*, *Przegląd Geograficzny*, 85, 3, s. 397–415.
- Bao Y., Gao P., He X., 2015, *The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir a unique geomorphological unit*, *Earth-Science Review*, 150, s. 14–24.
- Bätz N., Colombini P., Cherubini P., Lane S.N., 2016, *Groundwater controls on biogeomorphic succession and river channel morphodynamics*, *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 121, s. 1–21.
- Brandt SA, 2000, *Classification of geomorphological effects downstream of dams*, *Catena*, 40, s. 375–401.
- Corenblit D., Tabacchi E., Steiger J., Gurnell A.M., 2007, *Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: a review of complementary approaches*, *Earth Science Review*, 84, s. 56–86.
- Coulter A.A., Schultz S., Tristano E., Brey M.K., Garvey J.E., 2017, *Restoration versus invasive species: bigheaded carps' use of a rehabilitated backwater*, *River Research and Applications*, 33, s. 662–669.
- Cyberski J., 1965, *Procesy denudacyjne w strefie przybrzeżnej Zbiornika Rożnowskiego*, *Prace Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, 3–4, s. 42–52.
- Florek E., Florek W., Łęczyński L., 2008, *Funkcjonowanie zbiorników zaporowych na Słupi jako czynnik rzeźbotwórczy*, *Landform Analysis*, 7, s. 12–22.
- Fryirs K., 2013, *(Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, s. 30–46.

- Fryirs K., Brierley G. J., Preston N.J., Kasai M., 2007, *Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades*, *Catena*, 70, s. 49–67.
- Gierszewski P.J., Szymańska J., Luc M., 2018, *Zmiany układu koryt Wisły spowodowane funkcjonowaniem stopnia wodnego „Włocławek” na podstawie analizy zdjęć lotniczych*, *Przegląd Geograficzny*, 87, 3, s. 517–533.
- Gorczyca E., 2016, *Rozwój Górskich Źwirodennych Koryt Rzecznych w Warunkach Antropopresji*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Grant G.E., 2012, *The geomorphic response of gravel-bed rivers to dams: Perspectives and prospects*, [w:] M. Church, P.M. Biron, A.G. Roy (red.), *Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, John Wiley & Sons, s. 165–181.
- Gregory K.J., 2006, *The Human Role in Changing River Channels*, *Geomorphology*, 79, s. 172–191.
- Gurnell A., Morrissey I.P., Boitsidis A.J., Bark T., Clifford N.J., 2006, *Initial adjustment within a new river channel: Interactions between fluvial processes, colonizing vegetation, and bank profile development*, *Environmental Management*, 38, s. 580–596.
- Gurnell A.M., Bertoldi W., Corenblit D., 2012, *Changing river channels: the roles of hydrological processes, plant and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel-bed rivers*, *Earth Science Review*, 111, s. 129–141.
- Gurnell A.M., Corenblit D., García de Jalón D., González del Tánagod M., Grabowski R.C., O’Hare M.T., Szweczyk M., 2016, *A conceptual model of vegetation hydrogeomorphology interactions within river corridors*, *River Research and Applications*, 32, s. 142–163.
- Hupp C.R., Osterkamp W.R., 1996, *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphic Processes*, *Geomorphology*, 14, s. 277–295.
- Kaczmarek H., 2018, *Ewolucja strefy brzegowej nizinnych zbiorników zaporowych w wrunkach dużych wahań poziomu wody na przykładzie zbiornika Jeziorsko na Warcie*, *Prace Geograficzne*, 258, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Keddy P.A., 2010, *Wetland Ecology: Principles and Conservation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Klimek K., Łajczak A., Zawilińska L., 1990, *Sedimentary environment of the modern Dunajec Delta in the artificial Rożnów Lake, Carpathian Mts.*, *Quaestiones Geographicae*, 11/12, s. 81–92.
- Korpak J., 2007, *The influence of river training on mountain channel changes (Polish Carpathians Mountains)*, *Geomorphology*, 92, s. 166–181.
- Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A., 2008, *Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpaccich*, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4, seria: Monografia, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN, Kraków.
- Książek L., 2006, *Morfologia koryta rzeki Skawy w zasięgu cofki zbiornika Świnna Poręba*, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4, 1, s. 249–267.
- Leopold L.B., Bull W.B., 1979, *Base level, aggradation, and grade*, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 123, s. 168–202.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P., 1964, *Fluvial Processes in Geomorphology*, Freeman, San Francisco.
- Liro M., 2014, *Conceptual model for assessing the channel changes upstream from dam reservoir*, *Quaestiones Geographicae*, 33, s. 61–74.
- Liro M., 2015, *Gravel-bed channel changes upstream of a reservoir: the case of the Dunajec River upstream of the Czorsztyn Reservoir, southern Poland*, *Geomorphology*, 228, s. 694–702.
- Liro M., 2016, *Development of sediment slug upstream from the Czorsztyn Reservoir (southern Poland) and its interaction with river morphology*, *Geomorphology*, 253, s. 225–238.

- Liro M., 2017, *Dam-induced base-level rise effects on the gravel-bed channel planform*, *Catena*, 153, s. 143–156.
- Liro M., 2019, *Dam reservoir backwater as a field-scale laboratory of human-induced changes in river biogeomorphology: A review focused on gravel-bed rivers*, *Science of the Total Environment*, 651, s. 2899–2912.
- Łajczak A., 1986, *Retencja rumowiska w zbiornikach zaporowych karpackiego dorzecza Wisły*, *Czasopismo Geograficzne*, 1, s. 47–77.
- Łajczak A., 1995, *Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły*, *Monografie Komisji Gospodarki Wodnej PAN*, 8, Kraków.
- Łajczak A., 1996, *Modelling the long-term course of non-flushed reservoir sedimentation and estimating the life of dams*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, s. 1091–1107.
- Łajczak A., 1999, *Współczesny transport i sedymentacja materiału unoszonego w Wiśle i jej dopływach*, *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, 15, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Łajczak A., 2006, *Deltas in dam-retained lakes in the Carpathian part of the Vistula Drainage Basin*, *Prace Geograficzne*, 116, s. 99–109.
- Maddock T. Jr., 1966, *Behaviour of channels upstream from reservoirs*, *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 77, s. 812–823.
- Nicholas A.P., Ashworth M.J., Kirkby M.G., Macklin M.G., Murray T., 1995, *Sediment slugs: Large-scale fluctuations in fluvial sediment transport rates and storage volumes*, *Progress in Physical Geography*, 19, s. 500–519.
- Petts G.E., Gurnell A.M., 2005, *Dams and geomorphology: Research progress and future directions*, *Geomorphology*, 71, s. 27–47.
- Rahmonow O., Rzętała M., Rzętała M.A., 1998, *Zbiornik Dzierżno Duże – rola roślinności w rozwoju procesów brzegowych*, [w:] *Geografia w kształtowaniu i ochronie środowiska oraz transformacji regionu górnośląskiego. Referaty, komunikaty, postery*, II. Oddział Katowicki PTG, Wydział Nauk o Ziemi UŚ, Sosnowiec, s. 107–108.
- Rzętała M., 2003, *Procesy brzegowe i osady denne wybranych zbiorników wodnych w warunkach zróżnicowanej antropopresji (na przykładzie Wyżyny Śląskiej i jej obrzeży)*, *Wydawnictwo UŚ*, Katowice.
- Skalak K.J., Benthem A.J., Schenk E.R., Hupp C.R., Galloway J.M., Nustad A.R., Wiche W.J., 2013, *Large dams and alluvial rivers in the Anthropocene: The impacts of the Garrison and Oahe Dams on the Upper Missouri River*, *Anthropocene*, 2, s. 51–64.
- Skalak K.J., Benthem A.J., Hupp C.R., Schenk E.R., Galloway J.M., Nustad A.R., 2017, *Flood effects provide evidence of an alternate state from dam management on the upper Missouri River*, *River Research and Applications*, 33, s. 889–902.
- Tang Q., Bao Y., He X., Zhou H., Cao Z., Gao P., Zhong R., Hu Y., Zhang X., 2014, *Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China*, *Science of the Total Environment*, 479–480, s. 258–266.
- Tang Q., Bao Y., He X., Fu B., Collins A.L., Zhang X., 2016, *Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China*, *Science of the Total Environment*, 548–549, s. 410–420.
- Verry E.S., Dolloff C.A., Manning M.E., 2004, *Riparian ecotone: A functional definition and delineation for resource assessment*, *Water Air Soil Pollutions Focus*, 4, s. 67–94.
- Volke M.A., Scott M.L., Johnson W.C., Dixon M.D., 2015, *The ecological significance of emerging deltas in regulated rivers*, *Bioscience*, 20, s. 1–14.

- Volke M.A., Johnson W.C., Dixon M.D., Scott M.L., 2019, *Emerging reservoir delta-backwaters: biophysical dynamics and riparian biodiversity*, Ecological Monographs, e01363, <https://doi.org/10.1002/ecm.1363> (01.10.2019).
- Wang B., Yan D., Wen A., Chen J., 2016, *Influencing factors of sediment depositon and their spatial variability in riparian one of the Three Gorges Reservoir*, Journal of Mountain Science, 13, s. 1387–1396.
- Wiejaczka Ł., 2011, *Wpływ zbiornika wodnego Klimkówka na abiotyczne elementy środowiska przyrodniczego w dolinie Ropy*, Prace Geograficzne, 229, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Wiejaczka Ł., Kijowska-Strugała M., 2015, *Assessment of the hydromorphological state of Carpathian rivers above and below reservoirs*, Water and Environment Journal, 29, s. 277–287.
- Wiejaczka Ł., Kiszka K., Bochenek W., 2014, *Changes of the morphology of the Ropa River – upstream and downstream of the Klimkówka Water Reservoir*, Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 48, s. 61–76.
- Williams G.P., Wolman M.G., 1984, *Downstream effects of dams on alluvial rivers*, Geological Survey Professional Paper, 1286.
- Xu J., 1990, *Complex response in adjustment of Weihe channel to the construction of the Sanmenxia Reservoir*, Zeitschrift für Geomorphologie, 34, s. 233–245.
- Xu J., 2001, *Adjustment of mainstream — tributary relation upstream from a reservoir: an example from the Laohahe River, China*, Zeitschrift für Geomorphologie, 45, s. 359–372.
- Xu J., Shi C., 1997, *The river channel pattern change as influenced by the floodplain geocosystem: An example from the Hongshan Reservoir*, Zeitschrift für Geomorphologie, 41, s. 97–113.
- Ziętara T., 1992, *Wstępne wyniki badań i prognozy dotyczące przebiegu niszczenia brzegów zbiornika w Dobczycach*, Rocznik Naukowo-Dydaktyczny WSP, 151, Prace Geograficzne, 14, Kraków, s. 95–107.

Summary

Dam reservoir construction is one of the most important factors shaping river-valley morphology in the Anthropocene. While a large number (>58,000) of these constructions are in operation all over the world, we remain quite ignorant of what happens upstream of them (in so called backwater zone), especially for the case of gravel-bed rivers.

Existing studies have shown that adjustments of the gravel-bed river in the backwater zone differ between the initial and long-term adjustments. The initial adjustments (occurring \approx <20 years following dam construction) are controlled by large floods and in-channel deposition which trigger bi-directional bar↔bank interactions (bank erosion causing bar growth and vice versa) resulting in channel-widening. The long-term adjustments (\approx >20 years following dam construction) are characterized by river sinuosity increasing and channel planform stabilization resulted from deposition of fine sediment and associated vegetation expansion. The long-term adjustments are controlled by the initial river morphology, which creates accommodation space for the deposition of fine sediment and for the associated expansion of vegetation on channel bars. The multi-thread river in backwater zone is significantly narrowed, its sinuosity increase (phase 1) and the planform is stabilized (phase 2). Whereas, in the case of initially single-thread river only planform stabilization occur (phase 2).

This article summarizes recent findings on the backwater effects on gravel-bed channel morphodynamics, suggesting that backwater zones may be treated as hot-spots of human-induced changes in river geomorphology and biogeomorphology.

