

Rozdział 14

Gruby rumosz drzewny w potokach i rzekach górskich

Bartłomiej Wyżga, Paweł Mikuś, Joanna Zawiejska

Wstęp

Rola nadrzecznej roślinności i powalonych do cieków drzew i krzewów była długo pomijana w badaniach procesów fluwialnych. Taki stan rzeczy przynajmniej częściowo wynikał ze znacznego wylesienia w okresie historycznym zlewni i den dolin w Europie, w tym także w obszarach górskich (np. Wyżga i in. 2016), a w rezultacie niewielkiej dostawy powalonych drzew do koryt cieków. Odmienna sytuacja utrzymała się aż do drugiej połowy XX w. w zachodniej części Ameryki Północnej, gdzie w końcu lat 70. rozpoczęto badania nad środowiskowym znaczeniem drzew powalonych do koryt cieków, a publikacja Sedella i współautorów (1988) stała się zaczynem późniejszej eksplozji badań nad wpływem grubego rumoszu drzewnego na procesy fluwialne. W Polsce pionierskie badania z tej tematyki zostały przeprowadzone w latach 90. przez Kaczkę (1999), a szerszy obraz badań nad wpływem rumoszu drzewnego na procesy fluwialne i funkcjonowanie ekosystemów rzecznych przedstawili Wyżga i in. (2003). Początkowo prym w badaniach grubego rumoszu drzewnego wiedli naukowcy amerykańscy, ale postępująca w XX w. ekspansja nadrzecznych lasów w Europie (np. Wyżga i in. 2016) spowodowała, że w ostatnich 20–25 latach liczne badania z tej tematyki wykonano w Europie, w tym w Polsce. Obecnie wiadomo, że powalone do cieków drzewa i krzewy stanowią, obok ładunku mineralnego, integralny element systemów rzecznych, w istotny sposób wpływając na przebieg procesów fluwialnych (Gurnell i in. 2002) oraz stan ekosystemów rzecznych i nadrzecznych (Pawlaczyk 2017). Znajomość tego wpływu jest więc podstawą prawidłowego utrzymania potoków i rzek górskich.

Gruby rumosz drzewny i formy jego występowania

Gruby rumosz drzewny (*large woody debris, large wood*) to zdeponowane w ciekach drzewa i krzewy oraz ich fragmenty o długości większej od 1 m i średniej średnicy większej od 10 cm, lub o całkowitej masie większej od 4 kg, a także ich agregaty (Wyżga i in. 2003). Część powalonych do cieków drzew i krzewów liściastych może nie obumierać, lecz podlegać wegetatywnej regeneracji (Gurnell i in. 2000), dlatego też termin „gruby rumosz drzewny” nie może być uważany za synonim terminu „martwe drewno” (*dead wood, Totholz*).

Gruby rumosz drzewny może tworzyć 3 rodzaje form depozycyjnych (Thévenet i in. 2008):

- kłody – pojedyncze pnie lub fragmenty pni, konarów i korzeni o długości > 1 m i średniej średnicy $> 0,1$ m;
- krzewy i całe drzewa – zdeponowane w ciekach krzewy lub drzewa, które ze względu na wysoki stosunek objętości gałęzi do pnia tworzą przestrzenną strukturę;
- zwały – różnorodne mieszaniny całych drzew i krzewów, kłód, gałęzi i korzeni wraz z drobniejszą materią organiczną i materiałem mineralnym.

W ciekach niejednokrotnie występują fragmenty drzew znacznie przekraczające jedynie jeden z wymiarów podanych dla kłód, których masa jest większa od masy kłód o granicznych wymiarach 1 m długości i 10 cm średnicy, tj. 4 kg (np. karpy). Przedstawiona powyżej definicja pozwala na zaliczenie takich fragmentów do grubego rumoszu drzewnego, jeśli ich masa przekracza graniczną wielkość 4 kg.

Właściwe oszacowanie masy form depozycyjnych grubego rumoszu drzewnego wymaga uwzględnienia udziału w nich drewna. Objętość kłód wylicza się jako iloczyn ich długości i średnicy zmierzonej w połowie długości. W przypadku zwałów oraz krzewów i całych drzew ich objętość określa się jako iloczyn długości, szerokości i wysokości obiektu, a do obliczenia masy drewna stosuje się empirycznie określone współczynniki (Thévenet i in. 2008).

Mechanizmy dostawy grubego rumoszu drzewnego do koryt cieków górskich

W zalesionych górskich zlewniach gruby rumosz drzewny jest dostarczany do koryt cieków w wyniku szeregu naturalnych procesów: erozji brzegów koryta, osuwisk, spływów rumoszowych, lawin, powalenia przez wiatr, pożaru lasu, obciążenia drzew śniegiem i lodem oraz naturalnej śmiertelności drzew (Keller, Swanson 1979). Poza źródłkowymi odcinkami potoków powszechnym i z reguły dominującym procesem jest erozja brzegów koryt (Zielonka i in. 2009), która szczególnie intensywnie zachodzi wzdłuż wklęsłych brzegów cieku i krawędzi kęp. W górskich zlewniach osuwiska zboczowe oraz powały drzew przez wiatr dostarczają gruby rumosz drzewny do koryt z ich bliskiego sąsiedztwa

(Seo i in. 2010), zaś lawiny śnieżne i spływy gruzowe mogą dostarczać drewno ze stoków nieraz znacznie oddalonych od cieku (Keller, Swanson 1979). Badania przeprowadzone w stanach Oregon i Waszyngton w USA pokazały, że 85% drewna w korytach zostało dostarczone z odległości do 30 m od koryta (McDade i in. 1990).

Wiek nadrzecznego lasu istotnie wpływa na wielkość i częstość dostawy drewna do koryt cieków (Warren i in. 2009). W nadrzecznych lasach z reguły wycinane są najstarsze i największe drzewa, co powoduje odmładzanie drzewostanu i warunkuje mniejsze rozmiary grubego rumoszu drzewnego niż w przypadku cieków płynących przez lasy, w których nie prowadzi się gospodarki leśnej (Mikuś i in. 2013). W czasie powodzi do cieków może również zostać dostarczone drewno antropogenicznego pochodzenia – ścięte drzewa składowane na brzegach koryt, elementy kaszycowych umocnień brzegów czy mostów (Krejčí, Máčka 2012).

Obecnie w coraz większym stopniu zaznacza się ścinanie i powalanie do cieków nadrzecznych drzew, zwłaszcza liściastych, przez bobry (Gurnell 1998) będące efektem ich udanej reintrodukcji w południowej Polsce (Gorczyca i in. 2018). W ostatnich latach rozległe połacie karpackich borów świerkowych podlegają gradacji kornika drukarza, a zamierające nadrzeczne świerki łatwo ulegają powaleniu lub połamaniu przez wiatr.

Zmiany warunków i intensywności dostawy rumoszu drzewnego do koryt cieków karpackich w XX w.

Możliwości dostawy rumoszu drzewnego do rzek i jej intensywność pozostają w bezpośrednim związku z zagospodarowaniem den dolin i modyfikacjami koryt wprowadzanymi przez człowieka. W XIX w. doliny większych rzek polskich Karpat były całkowicie pozbawione nadrzecznego lasu lub występował on jedynie w szczątkowej formie (Wyźga i in. 2012, 2016). W XX w., a zwłaszcza w jego drugiej połowie nastąpiła stopniowa odbudowa nadrzecznych lasów i rozwój lasu w obrębie strefy aktywnej rzek, prowadzący do przekształcania łańcuchów śródkorytowych w kępy (Wyźga 2007, Wyźga i in. 2012). Zmiany te były wynikiem zmniejszenia dynamiki przepływu wody i transportu rumowiska w rzekach (zmniejszającego tempo bocznej migracji koryt), uwarunkowanego ekonomicznie zaprzestania rolniczego i pasterskiego użytkowania obszarów nadrzecznych oraz zwężenia koryt w trakcie ich regulacji, pozostawiającego rozległe zwirowe partie wcześniej istniejących, szerokich koryt dla spontanicznego rozwoju lasu łęgowego (Wyźga i in. 2012, Hajdukiewicz, Wyźga 2019). Efektem rozwoju nadrzecznych lasów było powstanie obfitego źródła rumoszu drzewnego, który może być dostarczany do koryt rzecznych w wyniku erozji brzegów, powalów przez wiatr czy działalności bobrów.

Efektem powszechnej regulacji rzek i potoków karpackich w XX w. było m.in. umocnienie ich brzegów budowlami regulacyjnymi na znacznej długości cieków (Bojarski i in. 2005). W XX w. doszło także do znacznego wcięcia się cieków karpackich, niekiedy

nawet w podłoże skalne (Hajdukiewicz i in. 2019), a łącznym efektem zabudowy regulacyjnej brzegów koryt oraz wcięcia się cieków jest znaczne ograniczenie możliwości bocznej migracji koryt i erozji ich brzegów. Zniszczenie umocnień brzegów lub zaniechanie systematycznego utrzymania koryt regulacyjnych umożliwia jednak obecnie intensywną dostawę rumoszu drzewnego do cieków w wyniku erozji ich brzegów w czasie wezbrań.

Występowanie i mobilność grubego rumoszu drzewnego w ciekach górskich różnej wielkości

Występowanie grubego rumoszu drzewnego w korytach cieków górskich jest związane ze strukturą lokalnych drzewostanów, natężeniem procesów korytowych oraz możliwością dostawy, transportu i retencji drewna w cieku (Swanson 2003). Dynamika drewna w ciekach może być większa niż osadu mineralnego wraz z formami korytowymi (Gurnell i in. 2002). Dominujące rodzaje form depozycyjnych rumoszu drzewnego zmieniają się z biegiem cieku, przy czym wraz z wielkością cieku mobilność rumoszu drzewnego wzrasta, a czas retencji drewna w korycie maleje (Wyżga i in. 2003).

W celu określenia mobilności drewna w ciekach wykorzystuje się szereg metod badawczych: monitoring dostawy i mobilności drewna (np. Mikuś i in. 2016b), inwentaryzację drewna w cieku (Wyżga, Zawiejska 2005, 2010), metody znacznikowe (np. Wyżga i in. 2017), teoretyczne obliczenia z wykorzystaniem formuł matematyczno-fizycznych (np. Wilcox, Wohl 2006), doświadczenia w korytach eksperymentalnych (np. Welber i in. 2013) oraz modelowanie numeryczne (np. Ruiz-Villanueva i in. 2016b). Kryteriami wyboru metody są: wielkość cieku, kosztocłonność oraz limit czasowy obserwacji.

Drewno w ciekach górskich jest transportowane niemal wyłącznie w czasie wezbrań. Duże wezbrania powodują przenoszenie zalegającego w korycie drewna oraz erozję brzegów, prowadzącą do dostawy nowych drzew i krzewów. Najważniejszymi czynnikami warunkującymi zdolność grubego rumoszu drzewnego do przemieszczania się w dół cieku są rozmiar i kształt danej formy depozycyjnej drewna oraz sposób jej zalegania w korycie (Bocchiola i in. 2006). Natężenie transportu drewna statystycznie rośnie wraz ze wzrostem przepływu i szerokości koryta (Lassette, Harris 2001).

Wielkość wezbrania – determinująca głębokość zatopienia form korytowych oraz obszaru zalewowego i określająca wysokość depozycji rumoszu drzewnego w obrębie cieku lub równi zalewowej – oraz morfologia koryta są najważniejszymi czynnikami determinującymi miejsca akumulacji rumoszu drzewnego w ciekach (Ruiz-Villanueva i in. 2016a). W zależności od rzędu cieku według klasyfikacji Strahlera stwierdza się następujący charakter mobilności rumoszu drzewnego:

- w ciekach pierwszego i drugiego rzędu, o małej szerokości koryta w stosunku do długości powalonych drzew, gruby rumosz drzewny w zasadzie nie jest transportowany

i występuje przeważnie w formie przewieszonych ponad korytem całych drzew lub ich fragmentów (Nakamura, Swanson 1993);

- w ciekach trzeciego i czwartego rzędu, o szerokości koryta nieco mniejszej lub zbliżonej do długości powalonych nadbrzeżnych drzew, gruby rumosz drzewny jest transportowany podczas większych wezbrań, pod warunkiem, że jego długość jest mniejsza od szerokości koryta (Gurnell i in. 2000);
- cieki piątego i wyższego rzędu, których koryta są szersze od wysokości nadbrzeżnych drzew i przenoszą duże przepływy wezbraniowe, wykazują zdolność do transportu całego dostarczanego do nich rumoszu drzewnego (Piégay, Gurnell 1997).

W ciekach od pierwszego do czwartego rzędu przegradzające koryto drzewa lub ich nagromadzenia tworzą tamy drzewne (ryc. 1) stanowiące przeszkodę dla przepływu wody i transportu rumowiska (Gregory i in. 1985). W potokach karpackich ich wysokość może dochodzić do 1,5 m, a czas istnienia sięgać kilkudziesięciu lat (Kaczka 2003, 2009). Koryta cieków od pierwszego do czwartego rzędu cechują się dość równomiernym rozmieszczeniem całkowitych ładunków drewna (czyli ilości drewna zdeponowanego na jednostkowej długości ciek), natomiast jednostkowe ładunki drewna (tj. ilość drewna zdeponowanego na jednostkowej powierzchni koryta) maleją w nich nieliniowo wraz ze wzrostem szerokości koryta (Wyźga i in. 2015). Jeśli w ciekach tych dojdzie do transportu rumoszu



Ryc. 1. Naturalna tama drzewna utworzona przez kłodę świerkową w potoku Kamienica. U podnóża tamy widoczne przegłębienie – kocioł eworsyjny. Energia wody spadającej z progu jest rozpraszana wskutek turbulencji w stacjonarnym wirze poziomym u podnóża progu; fot. B. Wyźga

drzewnego, to najczęstszymi miejscami jego ponownej depozycji są przewężenia koryta i przeszkody takie, jak głazy, ławice skalne lub tamy drzewne.

W rzekach górskich, będących ciekami piątego i wyższych rzędów, obserwuje się odmienne rozmieszczenie depozycji drewna (Wyżga, Zawiejska 2005, 2010, Wyżga i in. 2015). W wąskich, wciętych lub uregulowanych odcinkach, gdzie rzeki płyną korytem jednonurtowym, formy depozycyjne drewna są nieliczne i mają niewielkie rozmiary. Duża jednostkowa moc strumienia i brak dogodnych miejsc do depozycji drewna powoduje, że w czasie wezbrań obserwuje się tu daleki transport drewna i znikomą jego depozycję (Mikuś i in. 2016b, Wyżga i in. 2017). Szerokie, wielonurtowe odcinki rzek górskich wykazują natomiast znikomy potencjał do przenoszenia drewna do niżej położonych odcinków i znaczny potencjał do jego zatrzymywania (Mikuś i in. 2016b, Wyżga i in. 2017). W rezultacie, w takich odcinkach występują liczne formy depozycyjne drewna o stosunkowo dużych rozmiarach. Występujący na początku takich odcinków szybki wzrost szerokości przepływów wezbraniowych, połączony z nagłym zmniejszeniem się jednostkowej mocy strumienia i głębokości wody skutkuje depozycją znacznych ilości drewna przynieszonego z wyższych odcinków na krótkim dystansie (ryc. 2A) (Wyżga, Zawiejska 2005). Deponowany tu rumosz drzewny cechuje zazwyczaj znaczny stopień mechanicznego zniszczenia (fragmentacja, abrazja) w czasie transportu i agregacja w zwały (ryc. 2A). Z kolei drzewa i krzewy powalone do rzeki w obrębie szerokiego odcinka podlegają z reguły niewielkiemu transportowi, mając niepołamane korony oraz zachowaną korę i liście (ryc. 2B) (Wyżga, Zawiejska 2005, Mikuś i in. 2016b). Zachodząca w odcinkach wielonurtowych, zwłaszcza z udziałem kęp, preferencyjna depozycja drewna zapobiega jego dalszemu przenoszeniu w wodach wezbraniowych do zabudowanych odcinków dolin rzecznych, zwiększając bezpieczeństwo powodziowe tych odcinków (Wyżga, Zawiejska 2010, Mikuś i in. 2016b).

Najmniej sprzyjająca depozycji rumoszu drzewnego sytuacja zachodzi wtedy, gdy szerokość koryta jest mniej więcej równa wysokości nadrzecznych drzew (Wyżga i in. 2015). Przewrócone do koryta drzewa są tam zbyt krótkie, by utworzyć tamy lub pozostać przewieszone nad korytem, a wysokie wartości jednostkowej mocy strumienia i stosunkowo duże głębokości przepływów wezbraniowych ułatwiają ich wynoszenie do niższych odcinków. W rezultacie, powalone drzewa mogą tam być deponowane równolegle do brzegów koryta, jednak łatwo ulegają ponownemu uruchomieniu i transportowi.



Ryc. 2. Gruby rumosz drzewny zdeponowany w szerokim, wielonurtowym odcinku Czarne Dunajca bezpośrednio poniżej wąskiego, uregulowanego odcinka (A) i w dalszej odległości od niego (B). Drewno zdeponowane bezpośrednio poniżej wąskiego odcinka rzeki cechuje znaczny stopień fragmentacji i agregacja w zwały, natomiast dalej od tego odcinka deponowane są krzewy i całe drzewa o dobrym stanie zachowania; fot. B. Wyżga

Środowiskowe aspekty obecności grubego rumoszu drzewnego w ciekach

Wpływ grubego rumoszu drzewnego w ciekach górskich na procesy fluwialne

Deponowany w ciekach górskich gruby rumosz drzewny wywiera wpływ na ich morfologię, hydraulikę przepływu – w tym zwłaszcza przepływów wezbraniowych – oraz na zdolność cieków do akumulacji materiału dennego, a w rezultacie na natężenie jego transportu i charakter dna cieków. Przegradzanie potoków tamami drzewnymi prowadzi do powstania schodowego profilu podłużnego koryt, w którym progom utworzonym na tamach towarzyszą uformowane u ich podnóża kotły eworsyjne (ryc. 1) (Keller i in. 1995, Kaczka 2003, Wyżga i in. 2003). Obecność grubego rumoszu drzewnego w potokach wywiera także znaczący wpływ na formowanie się przegłębień w ich korytach. W górskich ciekach Kalifornii wszystkie przegłębienia w ich źródłiskowych odcinkach były wynikiem oddziaływania rumoszu drzewnego, a w odcinkach 3–4 rzędu mniej więcej połowa przegłębień była związana z obecnością drewna w korytach. W potokach z dużą ilością drewna w korycie przegłębienia są gęściej rozmieszczone wzdłuż koryta niż w ciekach bez rumoszu drzewnego (Montgomery i in. 1995). W tych pierwszych progom uformowanym na tamach drzewnych towarzyszą bowiem nie tylko kotły eworsyjne po ich zaprądowej stronie, lecz często również przegłębienia powstałe w wyniku spiętrzenia wody przez tamę (Wyżga i in. 2003).

W rzekach górskich drzewa powalone do koryta oraz uformowane przy jednym z brzegów zwały mogą odchyłać nurt w stronę przeciwnego brzegu i powodować jego erozję (Nakamura, Swanson 1993, Abbe, Montgomery 2003), przyczyniając się do wzrostu krętości rzeki (ryc. 3A). Depozycja drzew i dużych zwałów w obrębie koryta, bez kontaktu z brzegiem, prowadzi natomiast do uformowania się wokół nich łachy żwirowej i rozdzielania się nurtu (Abbe, Montgomery 1996), co sprzyja erozji brzegów rzeki i zwiększaniu szerokości koryta.

Przegradzające koryta potoków tamy drzewne i uformowane na nich progi umożliwiają efektywne rozpraszanie energii płynącej wody w wyniku turbulencji w stacjonarnym wirze formującym się u podnóża progów (ryc. 1). Powyżej progów zmniejszony spadek koryta powoduje natomiast wolniejszy przepływ wody niż w korycie o jednostajnym spadku. Rumosz drzewny w korytach potoków i rzek umożliwia efektywne rozpraszanie energii wód wezbraniowych nawet, gdy jego obecność nie wywołuje bezpośrednich skutków morfologicznych. Przykładowo, kłody pokrywające mniej niż 2% powierzchni dna jednej z rzek Oregonu były odpowiedzialne za około połowę całkowitych oporów przepływu (Manga, Kirchner 2000). Opory przepływu zwiększa dodatkowo wzrost krętości lub dzielenie się nurtu spowodowane oddziaływaniem grubego rumoszu drzewnego w rzekach.

Te zwiększone opory przepływu powodują, że cieki z grubym rumoszem drzewnym mogą wydatkować na uruchomienie i transport materiału dennego mniejszą część



Ryc. 3. Przykłady środowiskowych efektów grubego rumoszu drzewnego w szerokim, wielonurto-
wym odcinku Czarnego Dunajca: (A) Zmiana kierunku przepływu wymuszona przez powalone
drzewo, zwiększająca krętość nurtu; (B) Zróżnicowanie warunków siedliskowych (głębokości
wody i uziarnienia materiału dennego) spowodowane przegrodzeniem koryta małej wody przez
powalone drzewa; (C) Zatrzymywanie w korycie liści opadłych z drzew spowodowane lokalnym
zmniejszeniem prędkości przepływu przez powalone drzewa; (D) Inicjalna kępa powstała w wyni-
ku wegetatywnej regeneracji krzewu wierzby zdeponowanego na łasze żwirowej; fot. B. Wyźga

całkowitej energii wód wezbraniowych, a uruchomienie ziaren materiału dennego o okre-
śłonej wielkości zachodzi przy wyższych przepływach niż w ciekach bez drewna. Efektem
tego jest bardziej drobnosiarnisty materiał denny w korytach cieków z dużą ilością drewna
(Buffington, Montgomery 1999). Po doprądowej stronie tam drzewnych następuje akumu-
lacja znacznych ilości materiału dennego. W górskich potokach Kalifornii płynących przez
obszary porośnięte starodrzewem objętość osadu zakumulowanego powyżej tam odpo-
wiała 100–150-krotnej wielkości rocznego ładunku rumowiska wleczonego (Keller i in.
1995). Z kolei, w górnym biegu Kamienicy w Gorcach objętość osadu powyżej tam kilku-
nastokrotnie przewyższała objętość osadu wyerodowanego z dna potoku przy formowaniu
kotłów eworsyjnych (Wyźga i in. 2003).

Eksperymentalnie stwierdzono, że usunięcie grubego rumoszu drzewnego z koryta pro-
wadziło do kilkakrotnego wzrostu natężenia transportu materiału dennego przy określo-
nym przepływie w porównaniu do sytuacji, gdy rumosz drzewny był obecny w korycie

(Smith i in. 1993). Długookresowym efektem tej zwiększonej dynamiki transportu dennego w korytach, z których usunięto drewno lub zahamowano jego dostawę poprzez umocnienie brzegów, jest przekształcanie koryt ze żwirowym dnem w koryta skalne (Hajdukiewicz i in. 2019).

Wpływ grubego rumoszu drzewnego na funkcjonowanie ekosystemów cieków górskich

Wiadomo, iż ciekі zawierające znaczne ilości rumoszu drzewnego cechują się większą różnorodnością, liczebnością oraz biomasą bezkręgowców, ryb i płazów niż ciekі bez drewna (Harmon i in. 1986, Gurnell i in. 2005). Jest to odzwierciedleniem korzystnego wpływu, jaki gruby rumosz drzewny wywiera na szereg aspektów funkcjonowania ekosystemów wodnych w ciekach górskich (Gurnell i in. 1995, Gregory i in. 2003). Po pierwsze, obecność grubego rumoszu drzewnego wpływa na wzrost różnorodności siedlisk w ciekach. Obecność rumoszu drzewnego powoduje bowiem wzrost zróżnicowania głębokości i prędkości wody oraz uziarnienia materiału dennego (ryc. 3B) wzdłuż i w przekroju koryta, co umożliwia zasiedlanie różnych partii ciekі przez organizmy lub ich stadia wiekowe o różnych preferencjach siedliskowych. Obecność drewna sprzyja także tworzeniu się większych, liczniejszych i bardziej stabilnych przegłębień w ciekach, które w okresach niżówek lub długotrwałych mrozów stanowią refugia umożliwiające rybom przetrwanie niekorzystnych warunków.

Powalone do cieków drzewa i krzewy same stanowią siedliska zasiedlane przez bezkręgowce denne i umożliwiają powstawanie miejsc żerowania i odpoczynku dla ryb, tworząc dla nich osłonę przed drapieżnikami. Nagromadzenia drewna są także wykorzystywane jako miejsca bytowania przez bobry i wydry.

Wiele grup organizmów wykorzystuje drewno drzew i krzewów powalonych do cieków jako pokarm, przy czym skład tych organizmów zmienia się w miarę postępującego rozkładu drewna. Chociaż drewno cechuje się stosunkowo niską wartością odżywczą, w porównaniu np. z liśćmi drzew, stanowi ono jednak stabilne i długotrwałe źródło pożywienia w ciekach. Poza sezonem wegetacyjnym, gdy brak świeżej roślinności zielonej, bobry zjadają korę, miazgę i młode pędy z przygotowanych wcześniej fragmentów ściętych drzew.

Obecność w korytach tam drzewnych, zwałów i licznych przegłębień utworzonych w wyniku hydraulicznego oddziaływania grubego rumoszu drzewnego ułatwia efektywne zatrzymywanie w ciekach drobnej materii organicznej (ryc. 3C) – liści, szpilek drzew i detrytus organicznego (Bilby, Likens 1980), które stanowią pokarm wielu grup organizmów wodnych. Znaczenie tej drobnej materii organicznej jako podstawy łańcucha pokarmowego jest szczególnie istotne w ciekach górskich, najczęściej będących ciekami oligotroficznymi.

Gruby rumosz drzewny a funkcjonowanie ekosystemów nadrzecznych cieków górskich

Preferencyjna depozycja przenoszonego przez wody wezbraniowe grubego rumoszu drzewnego w obszarach o niewielkiej głębokości wody (Ruiz-Villanueva i in. 2016a) – na łachach korytowych i w obszarze zalewowym – powoduje, że wywiera on istotny wpływ na formowanie się lądowych ekosystemów związanych z ciekami górskimi. Zdeponowane na wilgotnym podłożu nieobumarłe wierzby i topole, a w mniejszym stopniu także olchy mogą się ukorzeniać i wypuszczać pędy, formując inicjalne stadia kęp (ryc. 3D) (Gurnell i in. 2001, Mikuś i in. 2013). Wzrost młodych drzew rozwijających się w wyniku wegetatywnej regeneracji napławionego drewna przebiega kilkakrotnie szybciej od wzrostu siewek tych gatunków drzew (Gurnell i in. 2001, Wyźga 2007). Depozycja drewna wierzb lub topoli na czole kęp i jego późniejsza regeneracja prowadzą do dominującego rozwoju kęp w kierunku doprądowym (Mikuś i in. 2013). Zdeponowany na łachach żwirowych gruby rumosz drzewny umożliwia także rozwój inicjalnych kęp, osłaniając rozwijające się siewki drzew i roślin zielnych przed niszczącym działaniem wód wezbraniowych i ułatwiając depozycję drobnoziarnistych osadów w jego cieniu hydraulicznym (Fetherston i in. 1995, Gurnell i in. 2001, Mikuś i in. 2013). Konsekwencją tego ułatwionego rozwoju roślinności osłanianej przez gruby rumosz drzewny jest stwierdzona w rzece górskiej zależność liczby gatunków roślin zasiedlających łachy żwirowe od ilości zdeponowanego na łachach drewna (Malanson, Butler 1990) i bardzo szybki przyrost liczby gatunków roślin zasiedlających kępy w pierwszych latach ich rozwoju (Mikuś i in. 2013).

Gruby rumosz drzewny jako czynnik zagrożenia powodziowego w ciekach górskich

Gruby rumosz drzewny może zwiększać zagrożenie powodziowe w ciekach górskich poprzez: (i) podwyższanie stanów wezbraniowych wskutek zwiększonych oporów przepływu w odcinkach cieków z dużą ilością zdeponowanego drewna, (ii) lokalne piętrzenie wody przez zatory utworzone z napławionego drewna, zwłaszcza w przekrojach mostowych, oraz (iii) zagrożenie stateczności mostów wskutek podmywania ich filarów lub przyczółków przez silny prąd wody skierowany w ich stronę przez zatory drzewne blokujące część przekroju mostowego.

Duże opory przepływu w odcinkach rzek z dużą ilością grubego rumoszu drzewnego zdeponowanego w czasie wezbrań rzeczywiście mogą skutkować wyższymi stanami wezbraniowymi niż w przypadku braku zdeponowanego drewna (Radecki-Pawlik i in. 2016). Depozycja dużych ilości drewna zachodzi w szerokich, wielonurtowych odcinkach rzek (Wyźga, Zawiejska 2005, 2010, Wyźga 2007), gdzie ułatwia ją stosunkowo mała głębokość wody i niewielka jednostkowa moc strumienia przepływów wezbraniowych

(Ruiz-Villanueva i in. 2016a, Wyżga i in. 2017). Taka morfologia rzek górskich w Polsce zachowała się jednak w ich nieuregulowanych odcinkach, gdzie wskutek braku istotnego zagospodarowania obszarów nadrzecznych wzrost zagrożenia powodziowego nie pociąga za sobą znacznego wzrostu ryzyka powodziowego.

Lokalne piętrzenie wód wezbraniowych wskutek zmniejszenia przepustowości krytycznych przekrojów rzecznych przez zatory z napławionego drewna i jego wpływ na możliwość powstania szkód powodziowych analizowano zarówno po takich zdarzeniach, jak i w kontekście ich możliwego wystąpienia w przyszłości. Do formowania się zatorów z napławionego drewna dochodzi zazwyczaj w trakcie dużych lub błyskawicznych powodzi (Ruiz-Villanueva i in. 2013, Hajdukiewicz i in. 2016), w czasie których z erodowanych brzegów dostają się do cieków liczne powalone drzewa i krzewy. W potokach zablokowaniu drewnem ulegają z reguły przepusty pod drogami lub wąskie i niskie mosty, a w rzekach mosty o rozstawie filarów mniejszym od wysokości nadrzecznych drzew. Zablokowanie części przekroju mostowego zatorami z napławionego drewna powoduje spiętrzenie wód powodziowych do stanu, który przy niezakłóconym przepływie mógłby zostać osiągnięty przy znacznie większym, rzadziej występującym przepływie (Ruiz-Villanueva i in. 2013). W czasie powodzi w maju 2010 r. na Białej Tarnowskiej zablokowanie ok. 40% światła jednego z mostów (ryc. 4A) spowodowało, że znaczna część wód powodziowych płynęła zamieszkałym dnem doliny, powodując zalanie parterów domów i rozmycie lokalnej drogi (Hajdukiewicz i in. 2016). Ruiz-Villanueva i in. (2017) zastosowali dwuwymiarowe modelowanie numeryczne do symulacji formowania się zatorów drzewnych w przekroju szczególnie wąskiego mostu na Czarnym Dunajcu z filarem w środku koryta. Wykazali oni, że prawdopodobieństwo blokowania przekroju mostowego wzrasta wraz z wielkością przepływu wezbraniowego i długością kłód dopływających do tego przekroju, a spowodowany zablokowaniem około połowy światła mostu wzrost stanu wody (a więc zagrożenia powodziowego dla nadrzecznych obszarów) jest największy w przypadku przepływów pełnokorytowych powyżej mostu.

Zatory drzewne blokujące część przekroju mostowego mogą także powodować rozmycie podłoża filarów lub przyczółków mostu zagrażające stateczności jego konstrukcji (Diehl 1997). Ich obecność zwiększa bowiem prędkość wody przepływającej przez niezablokowaną część światła mostu i wywierane przez nią naprężenia, prowadząc do rozmycia w dnie koryta poniżej mostu, a także może kierować silny prąd wody w stronę podłoża elementów konstrukcyjnych podpierających most. To zagrożenie jest szczególnie duże tam, gdzie rzeka wcześniej znacznie się wcięła, odsłaniając fundamenty filarów mostu.



Ryc. 4. (A) Zablockowanie znacznej części przekroju mostu na Białej w Jankowej przez zatory z drewna napławionego w czasie dużej powodzi w maju 2010 r. było przyczyną szkód powodziowych w sąsiadującym obszarze dna doliny. (B) Przebudowany most w Jankowej umożliwia niezakłócone przepuszczenie rumoszu drzewnego przez przekrój mostowy w czasie wezbrań; ryc. 4A wg Hajdukiewicz i in. 2016, przedrukowano za zgodą Elseviera; ryc. 4B – fot. B. Wyżga

Zapobieganie zagrożeniom wynikającym z obecności grubego rumoszu drzewnego w ciekach

Przy rozpatrywaniu zagrożeń wynikających z depozycji grubego rumoszu drzewnego w krytycznych przekrojach (np. mostowych) lub odcinkach (np. miejskich) cieków górskich należy wziąć pod uwagę mobilność rumoszu drzewnego w ich wyższym odcinku. Niewielka mobilność rumoszu drzewnego w potokach o szerokości koryta mniejszej od wysokości nadbrzeżnych drzew – rzadko przekraczająca kilkaset metrów w czasie pojedynczej powodzi (Mikuś i in. 2016b, Wyżga i in. 2017) – powoduje, że do krytycznych przekrojów może być dostarczane drewno ze stosunkowo niewielkiej odległości. W rzekach górskich o szerokości koryta większej od wysokości nadbrzeżnych drzew mobilność grubego rumoszu drzewnego jest uzależniona od morfologii i szerokości koryta. Niewielka mobilność rumoszu drzewnego w wielonurtowych odcinkach rzek z szerokim, płytkim korytem powoduje, że odcinki te stanowią miejsce depozycji drewna dostarczanego z wyższego biegu rzeki (Wyżga, Zawiejska 2005, 2010, Wyżga i in. 2017), co przeciwdziała jego dalszemu transportowi do krytycznych przekrojów/odcinków rzeki. Ponadto, znaczna część zdeponowanych na łachach korytowych wierzb i topoli może tu podlegać wegetatywnej regeneracji, co przeciwdziała ich uruchomieniu w czasie kolejnego wezbrania (Mikuś i in. 2016b). Natomiast w wąskich, uregulowanych i wciętych odcinkach rzek górskich rumosz drzewny może być transportowany na duże odległości, sięgające kilkunastu kilometrów w czasie jednej powodzi (Wyżga i in. 2017). W rezultacie, zapobieganie dostawie powalonych drzew do rzeki bezpośrednio powyżej krytycznych przekrojów (np. poprzez umocnienie brzegów lub wycinkę nadrzecznych drzew) nie eliminuje możliwości dostarczenia znacznych ilości grubego rumoszu drzewnego do tych przekrojów z odległych miejsc w wyższym biegu rzeki (Mikuś i in. 2016b).

Dotychczas w ramach utrzymania rzek gruby rumosz drzewny usuwano z koryt w celu eliminacji stwarzanych przez niego zagrożeń. Takie działania nie są jednak właściwe i powinny ulec istotnej modyfikacji (Wyżga 2007). Likwidują one bowiem korzystne skutki, jakie gruby rumosz drzewny wywiera na kształtowanie fizycznych cech cieków – w tym utrzymywanie ich równowagi dynamicznej i aluwialnego dna – oraz funkcjonowanie ekosystemów rzecznych, pomimo tego, że w długich okresach pomiędzy dużymi wezbrańiami rumosz ten jest stabilny lub ulega przemieszczaniu jedynie na niewielkie odległości. Przemieszczanie drewna na znaczne odległości i możliwość jego dostawy do krytycznych przekrojów/odcinków cieków mają natomiast miejsce w czasie dużych wezbrań (Comiti i in. 2012), gdy do cieków i tak dostarczane są liczne powalone drzewa i krzewy w wyniku erozji brzegów, osuwisk zboczowych, a w obszarach górskich o dużych deniwelacjach i stromych stokach także spływów gruzowych (Comiti i in. 2012, Ruiz-Villanueva i in. 2014). Działania ograniczające zagrożenie powodziowe powodowane przez rumosz drzewny powinny zatem polegać na takim kształtowaniu przekrojów mostowych,

które umożliwi bezproblemowe przepuszczenie przez nie drewna w czasie wezbrań (ryc. 4B) oraz na zatrzymywaniu drewna powyżej krytycznych przekrojów czy odcinków rzeki (Wyźga 2007).

Znaczną część mostów na potokach i rzekach górskich w Polsce zbudowano wiele dziesięcioleci temu, gdy dostawa powalonych drzew do koryt cieków, warunkująca formowanie się zatorów, była znacznie mniejsza. Takie mosty powinny zostać zastąpione konstrukcjami podpartymi poza korytem, umożliwiającymi swobodne przenoszenie rumoszu drzewnego przez przekrój mostowy bez powstawania zatorów (ryc. 4B) (Wyźga 2007). Jeśli wybudowanie mostu bez podparcia filarem(ami) posadowionym w korycie rzeki jest niemożliwe, wówczas rozstaw filarów powinien wynosić co najmniej 15–20 m, tak aby nie było możliwe zakotwiczenie się długich kłód na sąsiadujących filarach lub filarze i przyczółku mostu.

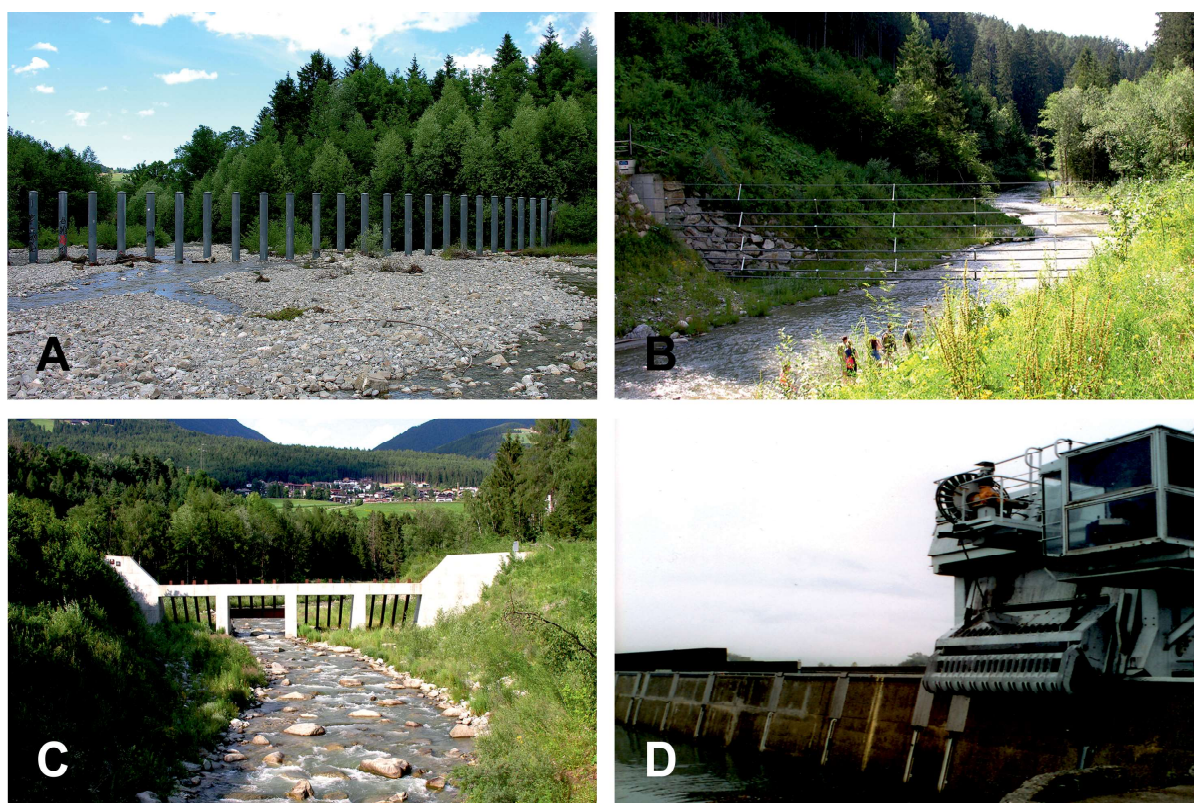
Z uwagi na wysoką zdolność odcinków rzek z szerokim, wielonurtowym korytem do zatrzymywania grubego rumoszu drzewnego konieczne jest zachowanie takich odcinków i zaniechanie w nich regulacji koryta (Mikuś i in. 2016a), a także umożliwienie samoistnego odtwarzania takiej morfologii rzek w korytarzach swobodnej migracji koryta (Wyźga i in. 2016). W tych odcinkach szczególną rolę powinny pełnić powalone do koryta duże drzewa (ryc. 5), lub duże zwały drewna, które dotychczas były z nich usuwane albo pod pretekstem działań przeciwpowodziowych, albo w celu pozyskania drewna na opał. Te duże



Ryc. 5. Duża wierzba powalona do koryta Czarnego Dunajca. W czasie wezbrań znaczna część korony drzewa nie jest zatopiona i nie podlega wyporowi hydrostatycznemu, co uniemożliwia przenoszenie drzewa przez wody wezbraniowe we flotacji; fot. B. Wyźga

formy depozycyjne drewna, nie ulegając przemieszczaniu przez wody wezbraniowe, mogą zatrzymywać na sobie drobniejszy, bardziej mobilny rumosz drzewny. Celowe jest także wykorzystanie niezagospodarowanych terenów nadrzecznych do przechwytywania rumoszu drzewnego przenoszonego w wodach wezbraniowych. Przenoszenie drewna we flotacji powoduje, że miejscami preferencyjnej depozycji rumoszu drzewnego są te obszary zalewowe, w których głębokość wód powodziowych w strefie brzegowej umożliwia wnoszenie do nich drewna, natomiast dalej jest niewystarczająca do jego transportu (Ruiz-Villanueva i in. 2016a). Miejscami szczególnie sprzyjającymi wychwytywaniu grubego rumoszu drzewnego z wód powodziowych są polany w obrębie nadrzeczного lasu usytuowane na wklęsłych brzegach rzek, gdzie otaczający polanę las wymusza depozycję drewna, „odfiltrując” je z wód powodziowych (Wyźga 2007).

W krajach alpejskich w potokach i rzekach płynących wąskim, jednonurtowym korytem buduje się specjalne konstrukcje służące zatrzymywaniu drewna przenoszonego przez wody wezbraniowe (np. D’Agostino i in. 2000, Comiti i in. 2012). Mogą one mieć postać stalowych pali wbitych w dno koryta lub obszar zalewowy, ażurowych zapór przeciwrumowiskowych



Ryc. 6. (A-C) Przykłady konstrukcji służących zatrzymaniu grubego rumoszu drzewnego przenoszonego przez górskie cieki w czasie wezbrań: (A) Stalowe pale wbite w dno koryta; (B); Konstrukcja z lin stalowych rozciągniętych w poprzek koryta; (C) Ażurowa zapora do przechwytywania materiału transportowanego we flotacji. (D) Czyszczarka krat do usuwania drewna dopływającego do zapory zbiornika retencyjnego. Wszystkie przykłady pochodzą z rzek alpejskich; fot. B. Wyźga

lub konstrukcji linowych przegradzających koryto (ryc. 6A-C). W przypadku budowli usytuowanych w korycie, ich konstrukcja powinna umożliwiać swobodne przemieszczanie rumoska wlezonego, a zatrzymywać jedynie rumosz drzewny przenoszony we flotacji.

W rzekach przegrodzonych zbiornikami zaporowymi rumosz drzewny wnoszony do zbiorników przez wody powodziowe dopływa do ich zapór (Moulin, Piégay 2004), gromadząc się w pobliżu pracujących urządzeń upustowych (np. na kratkach na wlotach do turbin elektrowni wodnej). Utrzymanie prawidłowego funkcjonowania urządzeń upustowych wymaga usuwania rumoszu drzewnego za pomocą urządzeń zwanych czyszczarkami krat (ryc. 6D), przenoszących wyciągnięte z wody drewno na składowisko (Wyźga 2007).

Wykorzystanie drewna do rewitalizacji i utrzymania cieków górskich

Rozpoznanie korzystnego wpływu rumoszu drzewnego na kształtowanie się fizycznych cech cieków i biocenozy rzeczne spowodowało, że od 25 lat w niektórych krajach, zwłaszcza w USA, Niemczech i Australii prowadzi się rewitalizację cieków z wykorzystaniem drewna (np. Gerhard, Reich 2000, Brookes i in. 2006). Początkowo działania te polegały na umieszczaniu w niewielkich ciekach sztucznie zamocowanych kłód, później natomiast zaznaczyła się tendencja do wykorzystania w działaniach rewitalizacyjnych specjalnie konstruowanych zwałów drewna (*ang.* engineered log jams) o samoistnej stabilności (Abbe i in. 2003) i zapewnienia naturalnej dostawy powalonych drzew do koryt (Bisson i in. 2003). Analiza wykonanych w tych krajach projektów rewitalizacyjnych z wykorzystaniem drewna pokazała, że ich niewątpliwym wynikiem była poprawa warunków siedliskowych w ciekach i wzrost liczebności ryb łososiowatych (Roni i in. 2015). W Polsce na możliwość wykorzystania naturalnie powalonych lub sztucznie umieszczanych w ciekach drzew w działaniach rewitalizacyjnych wskazywali Bojarski i in. (2005), Wyźga (2007) oraz Pawlaczyk (2017).

Duża stabilność drzew powalonych do potoków powoduje, że naturalnie lub sztucznie formowane w nich tamy drzewne (ryc. 1) mogą odegrać istotną rolę w rewitalizacji takich cieków. Efektem obecności takich tam będzie: (i) ułatwiona akumulacja materiału dennego, a w rezultacie utrzymanie lub odtworzenie aluwialnego dna koryt, (ii) zmniejszenie pojemności wciętych koryt sprzyjające przywracaniu retencji wód wezbraniowych w obszarze zalewowym, (iii) rozpraszanie energii i spowolnienie spływu wody, oraz (iv) wzrost zróżnicowania głębokości wody i prędkości przepływu zwiększający zróżnicowanie siedlisk organizmów wodnych (Wyźga 2007). Bojarski i in. (2005) podali szczegółowe wskazówki, jak należy sztucznie formować tamy drzewne z jednej lub dwu kłód, aby osiągnąć powyższe efekty środowiskowe i zachować możliwość migracji ryb wzdłuż biegu potoku.

W rzekach górskich gruby rumosz drzewny cechuje znacznie większa mobilność niż w potokach i preferencyjna depozycja w szerokich, zwłaszcza wielonurtowych odcinkach.

W zachowanych odcinkach o takiej morfologii gruby rumosz drzewny przyczynia się do zachowania morfologicznego i hydraulicznego zróżnicowania rzeki, tworzenia struktur siedliskowych dla organizmów wodnych i wegetatywnej regeneracji lasu łęgowego (Wyżga 2007, Wyżga, Zawiejska 2010). W nowo powstałych odcinkach z szerokim korytem depozycja rumoszu drzewnego umożliwia ponadto rozwój kęp (Mikuś i in. 2019), które mogą być istotnym czynnikiem wzrostu bioróżnorodności korytarza rzeczno (Mikuś i in. 2013). Warunkiem korzystnego wpływu grubego rumoszu drzewnego na stan ekosystemów rzecznych i nadrzecznych w szerokich odcinkach rzek górskich jest jednak możliwość erozji brzegów i dostawy powalonych drzew i krzewów do koryt.

Znikomy potencjał do zatrzymywania grubego rumoszu drzewnego w wąskich, wciętych lub uregulowanych odcinkach rzek górskich powoduje natomiast, że nie ma tam możliwości trwałej poprawy warunków hydromorfologicznych i stanu rzecznej biocenozy z wykorzystaniem naturalnie dostarczanego rumoszu drzewnego (Wyżga 2007, Wyżga, Zawiejska 2010). W takich odcinkach możliwe jest jednak zapoczątkowanie erozji brzegów, prowadzącej do wzrostu szerokości i krętości koryta, poprzez umieszczanie w nich sztucznie umocowanych kłód lub zwałów drewna kierujących nurt w stronę przeciwnego brzegu.

Ścięte lub naturalnie powalone drzewa mogą być także wykorzystane w działaniach utrzymania rzek i potoków mających na celu zabezpieczenie brzegów koryta przed erozją przy zachowaniu jego zróżnicowania mikrosiedliskowego (Pawlaczyk 2017). Może temu służyć umacnianie brzegów ułożonymi równolegle do nich kłódami lub za pomocą kaszykowych konstrukcji, a także formowanie deflektorów z kłód lub całych drzew ułożonych skośnie do brzegu i odchylających nurt od niego.

Podsumowanie

W XX w. w dolinach rzek polskich Karpat doszło do odtworzenia występowania nadrzecznych lasów i w rezultacie obecnie do koryt cieków górskich mogą być dostarczane, zwłaszcza w czasie wezbrań, znaczne ilości grubego rumoszu drzewnego. W potokach mobilność grubego rumoszu drzewnego jest niewielka, natomiast rzeki górskie cechuje duży potencjał do zatrzymywania rumoszu drzewnego w szerokich, wielonurtowych odcinkach oraz do przenoszenia drewna w czasie wezbrań na znaczne odległości w wąskich, jednonurtowych odcinkach. Obecność grubego rumoszu drzewnego korzystnie wpływa na kształtowanie się fizycznych cech cieków górskich oraz funkcjonowanie rzecznych i nadrzecznych ekosystemów tych cieków. Wzorem innych krajów wskazane jest zatem wykorzystanie drewna do rewitalizacji cieków górskich – zwłaszcza potoków i szerokich odcinków rzek górskich – wspomagającej przywracanie ich zaburzonej równowagi dynamicznej oraz poprawę stanu ekologicznego. Znaczne ilości rumoszu drzewnego zdeponowanego w ciekach górskich mogą istotnie zwiększać zagrożenie powodziowe, ale duża intensywność jego dostawy do koryt w czasie wezbrań i możliwość przenoszenia drewna na znaczne

odległości w wąskich, jednonurtowych odcinkach rzek powodują, że usuwanie drewna z koryt w okresach międzywezbraniowych nie eliminuje we właściwy sposób zagrożenia powodziowego stwarzanego przez rumosz drzewny. Zmniejszenie tego zagrożenia można natomiast osiągnąć poprzez przebudowę mostów podpartych filarami tkwiącymi w korycie na konstrukcje podparte poza korytem, zachowanie szerokich, wielonurtowych odcinków rzek będących miejscami naturalnego zatrzymywania drewna oraz budowę w jednonurtowych odcinkach rzek specjalnych konstrukcji służących przechwytywaniu rumoszu drzewnego w czasie wezbrań.

Bibliografia:

- Abbe T.B., Brooks A.P., Montgomery D.R., 2003, Wood in river rehabilitation and management. [in:] S.V. Gregory, K.L. Boyer, A.M. Gurnell (eds.), *Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Am. Fisher. Soc. Symp. 37, Bethesda, 367–389.
- Abbe T.B., Montgomery D.R., 1996, Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regul. Rivers Res. Mgmt* 12, 201–221.
- Abbe T.B., Montgomery D.R., 2003, Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology* 51, 81–107.
- Bilby R.E., Likens G.E., 1980, Importance of organic debris dams in the structure and function of stream ecosystems. *Ecology* 61, 1107–1113.
- Bisson P.A., Wondzell S.M., Reeves G.H., Gregory S.V., 2003, Trends in using wood to restore aquatic habitats and fish communities in western North American rivers. [in:] S.V. Gregory, K.L. Boyer, A.M. Gurnell (eds.), *Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Am. Fisher. Soc. Symp. 37, Bethesda 391–406.
- Bocchiola D., Rulli M.C., Rosso R., 2006, Transport of large woody debris in the presence of obstacles. *Geomorphology* 76, 166–178.
- Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., 2005, *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- Brookes A.P., Howell T., Abbe T.B., Arthington A.H., 2006, Confronting hysteresis: Wood based river rehabilitation in highly altered riverine landscapes of south-eastern Australia. *Geomorphology* 79, 395–422.
- Buffington J.M., Montgomery D.R., 1999, Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resour. Res.* 35, 3507–3521.
- Comiti F., D'Agostino V., Moser M., Lenzi M.A., Bettella F., Dell'Agnese A., Rigon E., Mazzorana B., 2012, Preventing wood-related hazards in mountain basins: from wood load estimation to designing retention structures. [in:] 12th Congress Interpraevent 2012 – Grenoble/France, Conference Proceedings, 651–662.
- D'Agostino V., Degetto M., Righetti M., 2000, Experimental investigation on open check dam for coarse woody debris control. *Quad. Idron. Mont.* 20, 201–212.

- Diehl T.H., 1997, Potential drift accumulation at bridges. US Department of Transportation, Federal Highway Administration Research and Development, USA.
- Fetherston K.L., Najman R.J., Bilby R.E., 1995, Large woody debris, physical process, and riparian forest development in montane river networks of the Pacific Northwest. *Geomorphology* 13, 133–143.
- Gerhard M., Reich M., 2000, Restoration of streams with large wood: Effects of accumulated and built-in wood on channel morphology, habitat diversity and aquatic fauna. *Int. Rev. Hydrobiol.* 85, 123–137.
- Gorczyca E., Krzemień K., Sobucki M., Jarzyna K., 2018, Can beaver impact promote river renaturation? The example of the Raba River, southern Poland. *Sci Total Environ.* 615, 1048–1060.
- Gregory K.J., Gurnell A.M., Hill C.T., 1985, The permanence of debris dams related to river channel processes. *Hydrol. Sci. J.* 30, 371–381.
- Gregory S.V., Gurnell A.M., Boyer K., 2003, *Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Am. Fisher. Soc. Symp. 37, Bethesda.
- Gurnell A.M., 1998, The hydrogeomorphological effects of beaver dam-building activity. *Prog. Phys. Geogr.* 22, 167–189.
- Gurnell A.M., Gregory K.J., Petts G.E., 1995, The role of coarse woody debris in forest aquatic habitats: implications for management. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 5, 143–166.
- Gurnell A.M., Petts G.E., Hannah D.M., Smith B.P.G., Edwards P.J., Kollmann J., Ward J. V., Tockner K., 2000, Wood storage within the active zone of a large European gravel-bed river. *Geomorphology* 34, 55–72.
- Gurnell A.M., Petts G.E., Hannah D.M., Smith B.P.G., Edwards P.J., Kollmann J., Ward J.V., Tockner K., 2001, Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surf. Proc. Landforms* 26, 31–62.
- Gurnell A.M., Piégay H., Swanson F.J., Gregory S.V., 2002, Large wood and fluvial processes. *Freshw. Biol.* 47, 601–619.
- Gurnell A., Tockner K., Edwards P., Petts G., 2005, Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Front. Ecol. Environ.* 3, 377–382.
- Hajdukiewicz H., Wyżga B., Mikuś P., Zawiejska J., Radecki-Pawlik A., 2016, Impact of a large flood on mountain river habitats, channel morphology, and valley infrastructure. *Geomorphology* 272, 55–67.
- Hajdukiewicz H., Wyżga B., 2019, Aerial photo-based analysis of the hydromorphological changes of a mountain river over the last six decades: The Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Sci. Total Environ.* 648, 1598–1613.
- Hajdukiewicz H., Wyżga B., Zawiejska J., 2019, Twentieth-century hydromorphological degradation of Polish Carpathian rivers. *Quat. Int.* 504, 181–194.
- Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack K., Cummins K.W., 1986, Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Adv. Ecol. Res.* 15, 133–302.
- Kaczka R.J., 1999, The role of coarse woody debris in fluvial processes during the flood of July 1997, Kamienica Łącka valley, Beskidy Mountains, Poland. *Stud. Geomorph. Carp.-Balcan.* 33, 117–130.

- Kaczka R.J., 2003, The coarse woody debris dams in mountain streams of Central Europe, structure and distribution. *Stud. Geomorph. Carp.-Balcan.* 37, 111–127.
- Kaczka R.J., 2009, Dynamics of large woody debris and wood dams in mountain Kamienica Stream, Polish Carpathians. [in:] R.J. Kaczka, I. Malik, P. Owczarek, H. Gärtner, G. Helle, I. Heinrich (eds.), *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology 7. Assoc. Tree Ring Res., Potsdam, Germany*, 171–175.
- Keller E.A., MacDonald A., Tally T., Merritt N.J., 1995, Effects of large organic debris on channel morphology and sediment storage in selected tributaries of Redwood Creek, northwestern California, U.S. *Geol. Surv. Prof. Paper*, 1454-P, 1–29.
- Keller E.A., Swanson F.J., 1979, Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth Surf. Proc.* 4, 361–380.
- Krejčí L., Máčka Z., 2012, Anthropogenic controls on large wood input, removal and mobility: examples from rivers in the Czech Republic. *Area* 44, 226–236.
- Lassettre N.S., Harris R.R., 2001, The geographic and ecological influence of large woody debris in streams and rivers. [w:] *Proceedings of the International Conference on Wood in World Rivers. Oregon State University, Corvallis, Oregon*, 67–69.
- Malanson G.P., Butler D.R., 1990, Woody debris, sediment, and riparian vegetation of a subalpine river, Montana, U.S.A. *Arctic Alp. Res.*, 22, 183–194.
- Manga M., Kirchner J.W., 2000, Stress partitioning in streams by large woody debris. *Water Resour. Res.* 36, 2373–2379.
- McDade M.H., Swanson F.J., McKee W.A., Franklin J.F., Van Sickle J., 1990, Source distances for coarse woody debris entering small streams in western Oregon and Washington. *Can. J. For. Res.* 20, 326–330.
- Mikuś P., Wyżga B., Kaczka R.J., Walusiak E., Zawiejska J., 2013, Islands in a European mountain river: linkages with large wood deposition, flood flows and plant diversity. *Geomorphology* 202, 115–127.
- Mikuś P., Wyżga B., Radecki-Pawlik A., Zawiejska J., Amirowicz A., Oglęcki P., 2016a, Environment-friendly reduction of flood risk and infrastructure damage in a mountain river: Case study of the Czarny Dunajec. *Geomorphology* 272, 43–54.
- Mikuś P., Wyżga B., Ruiz-Villanueva V., Zawiejska J., Kaczka R.J., Stoffel M., 2016b, Methods to assess large wood dynamics and the associated flood hazard in Polish Carpathian watercourses of different size. [w:] Z.W. Kundzewicz, M. Stoffel, T. Niedźwiedź, B. Wyżga (red.), *Flood risk in the Upper Vistula Basin*, Springer, Cham, 77–101.
- Mikuś P., Wyżga B., Walusiak E., Radecki-Pawlik A., Liro M., Hajdukiewicz H., Zawiejska J., 2019, Island development in a mountain river subjected to passive restoration: The Raba River, Polish Carpathians. *Sci. Total Environ.* 660, 406–420.
- Montgomery D.R., Buffington J.M., Smith R.D., Schmidt K.M., Pess G., 1995, Pool spacing in forest channels. *Water Resour. Res.*, 31, 1097–1105.
- Moulin B., Piégay H., 2004, Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the River Rhone: implications for river basin management. *River Res. Applic.* 20, 79–97.

- Nakamura F., Swanson F.J., 1993, Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surf. Proc. Landforms* 18, 43–61.
- Pawlaczyk P., 2017, Martwe drewno jako element ekosystemu rzecznoego. *Przegl. Przyr.* 28(4), 62–92.
- Piégay H., Gurnell A.M., 1997, Large woody debris and river geomorphological pattern: examples from S.E. France and S. England. *Geomorphology* 19, 99–116.
- Radecki-Pawlik A., Wyżga B., Czech W., Mikuś P., Zawiejska J., Ruiz-Villanueva V., 2016, Modelling hydraulic parameters of flood flows for a Polish Carpathian river subjected to variable human impacts. [in:] Z.W. Kundzewicz, M. Stoffel, T. Niedźwiedź, B. Wyżga (eds.), *Flood risk in the Upper Vistula Basin*, Springer, Cham, 127–151.
- Roni P., Beechie T., Pess G., Hanson K., 2015, Wood placement in river restoration: fact, fiction, and future. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 72, 466–478.
- Ruiz-Villanueva V., Bodoque J.M., Díez-Herrero A., Eguibar M., Pardo-Igúzquiza E., 2013. Reconstruction of a flash flood with large wood transport and its influence on hazard patterns in an ungauged mountain basin. *Hydrol. Proc.* 27, 3424–3437.
- Ruiz-Villanueva V., Díez-Herrero A., Ballesteros J.A., Bodoque J.M., 2014, Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: A quantitative estimation approach. *River Res. Applic.* 30, 81–97.
- Ruiz-Villanueva V., Wyżga B., Hajdukiewicz H., Stoffel M., 2016a, Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations. *Earth Surf. Proc. Landforms* 41, 446–459.
- Ruiz-Villanueva V., Wyżga B., Zawiejska J., Hajdukiewicz M., Stoffel M., 2016b, Factors controlling large-wood transport in a mountain river. *Geomorphology* 272, 21–31.
- Ruiz-Villanueva V., Wyżga B., Mikuś P., Hajdukiewicz M., Stoffel M., 2017, Large wood clogging during floods in a gravel-bed river: the Długopole bridge in the Czarny Dunajec River, Poland. *Earth Surf. Proc. Landforms* 42, 516–530.
- Sedell J.R., Bisson P.A., Swanson F.J., Gregory S.V., 1988, What we know about large trees that fall into streams and rivers. [in:] C. Maser, R.F. Tarrant, J.M. Trappe, J.F. Franklin (eds.), *From the forest to the sea: A story of fallen trees*. USDA Forest Serv. Gen. Techn. Rep. 229, Portland, 47–81.
- Seo J.I., Nakamura F., Chun K.W., 2010, Dynamics of large wood at the watershed scale: a perspective on current research limits and future directions. *Landsc. Ecol. Eng.* 6, 271–287.
- Smith R.D., Sidle R.C., Porter P.E., Noel J.R., 1993, Effects on bedload transport of experimental removal of woody debris from a forest gravel-bed stream. *Earth Surf. Proc. Landforms* 18, 455–468.
- Swanson F.J., 2003, Wood in rivers: a landscape perspectives. [in:] S.V. Gregory, K.L. Boyer, A.M. Gurnell (eds.), *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Am. Fisher. Soc. Symp. 37, Bethesda, 299–313.
- Thévenet A., Citterio A., Piégay H., 1998, A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers). *Regul. Rivers Res Mgmt*, 14, 467–483.
- Warren D.R., Kraft C.E., Keeton W.S., Nunnery J.S., Likens G.E., 2009, Dynamics of wood recruitment in streams of the northeastern US. *For. Ecol. Manage.* 258, 804–813.

- Welber M., Bertoldi W., Tubino M., 2013, Wood dispersal in braided streams: Results from physical modeling. *Water Resour. Res.* 49, 7388–7400.
- Wilcox A.C., Wohl E., 2006, Flow resistance dynamics in step-pool stream channels: 1. Large woody debris and controls on total resistance. *Water Resour. Res.* 42, W05418.
- Wyźga B., 2007, Gruby rumosz drzewny: depozycja w rzece górskiej, postrzeganie i wykorzystanie do rewitalizacji cieków górskich. *Inst. Ochr. Przyrody PAN, Kraków*.
- Wyźga B., Kaczka R.J., Zawiejska J., 2003, Gruby rumosz drzewny w ciekach górskich – formy występowania, warunki depozycji i znaczenie środowiskowe. *Folia Geogr., Ser. Geogr.-Phys.* 33-34, 117–138.
- Wyźga B., Mikuś P., Zawiejska J., Ruiz-Villanueva V., Kaczka R.J., Czech W., 2017, Log transport and deposition in incised, channelized and multithread reaches of a wide mountain river: Tracking experiment during a 20-year flood. *Geomorphology* 279, 98–111.
- Wyźga B., Zawiejska J., 2005, Wood storage in a wide mountain river: case study of the Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Earth Surf. Proc. Landforms* 30, 1475–1494.
- Wyźga B., Zawiejska J., 2010, Large wood storage in channelized and unmanaged sections of the Czarny Dunajec River, Polish Carpathians: implications for the restoration of mountain rivers. *Folia Geogr., Ser. Geogr.-Phys.* 41, 5–34.
- Wyźga B., Zawiejska J., Hajdukiewicz H., 2016, Multi-thread rivers in the Polish Carpathians: Occurrence, decline, and possibilities of restoration. *Quat. Int.* 415, 344–356.
- Wyźga B., Zawiejska J., Mikuś P., Kaczka R.J., 2015, Contrasting patterns of wood storage in mountain watercourses narrower and wider than the height of riparian trees. *Geomorphology* 228, 275–285.
- Wyźga B., Zawiejska J., Radecki-Pawlik, A., Hajdukiewicz H., 2012, Environmental change, hydro-morphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surf. Proc. Landforms* 37, 1213–1226.
- Zielonka T., Ciapała S., Malina T., Piątek G., 2009, Coarse woody debris in mountain streams and their influence on geomorphology of channels in the Tatra Mts. *Landform Analysis* 10, 134–139.

Bartłomiej Wyźga, Paweł Mikuś
Polska Akademia Nauk
Instytut Ochrony Przyrody

Joanna Zawiejska
Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie
Instytut Geografii
Katedra Geografii Fizycznej

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie

Procesy fluwialne a utrzymanie rzek i potoków górskich

Redaktorzy

Elżbieta Gorczyca, Artur Radecki-Pawlik, Kazimierz Krzemień



Kraków 2021

Publikacja wydana ze środków:

Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego,
Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej,
PBW INŻYNIERIA Sp. z o.o.

Recenzenci:

prof. dr hab. Zofia Rączkowska
dr hab. inż. Roman Rolbiecki, prof. UT-P
dr hab. inż. Natalia Walczak

Redaktorzy:

dr hab. Elżbieta Gorczyca, prof. UJ
prof. dr. hab. inż. Artur Radecki-Pawlik
prof. dr hab. Kazimierz Krzemień

Adiustacja i redakcja językowa: Jolanta Balon

Komputerowy skład tekstu i przygotowanie do druku:

Alicja Marciniak-Nowak – Pracownia Wydawnicza IGiGP UJ

Projekt okładki: Iga Judyta Jarzyna

© Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ
Kraków 2021, Wydanie I

ISBN 978-83-64089-68-8

Wydawca:

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, Polska
tel. +48 12 664 52 50, faks +48 12 664 53 85
www.geo.uj.edu.pl

Druk:

Poligrafia Salezjańska
ul. Bałuckiego 8, 30-306, Polska
tel. +48 12 266 40 00
<http://poligrafia.salezjanska.netw>