

# Możliwości zastosowania elastycznych zapór przeciwrumowiskowych

tekst: **dr inż. BERNARD TWARÓG**, Zakład Budownictwa Wodnego i Gospodarki Wodnej, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane metody i rozwiązania ograniczające erozję, zmniejszające transport rumowiska wleczonego oraz poprawiające parametry geomorfologii fluwialnej cieków. Prezentowane rozwiązania są jednymi z częściej stosowanych metod zabezpieczenia koryt cieków. Technologia wykonania jest prosta i szybka, co skutkuje relatywnie niskim kosztem realizacji i eksploatacji. Głównym elementem elastycznych zapór są przyczółki oraz rozpięta pomiędzy nimi specjalna elastyczna siatka o dużych średnicach oczek. Rozwiązania te nie dokonują separacji koryt oraz nie ingerują w stan ekologiczny wód; są proekologiczne, skuteczne oraz równie funkcjonalne, jak stosowane obecnie.

## 1. Wstęp

Współczesne metody ograniczenia wielkości erozji rzek i potoków oraz kontrolowania spływu rumowiska wciąż oparte są na zabudowie poprzecznej koryt. Ponieważ jednak zwiększyła się świadomość w zakresie skutków stosowania takich rozwiązań, to coraz częściej poszukuje się metod proekologicznych, unikając tego typu inwestycji, chociaż ich skuteczność w zakresie ograniczania transportowanego rumowiska jest nadal znacząca. Jednym z zadań budowni przeciwrumowiskowych jest stabilizacja dna koryta cieków oraz ograniczenie wielkości transportowanego rumowiska. Przy czym praca takich obiektów polega nie tylko na ograniczeniu ilości transportowanego rumowiska, lecz również na jego dozowaniu, tak aby zachować równowagę hydrodynamiczną cieków.

Współczesna wiedza w zakresie równowagi hydromorfologicznej koryt opisywana jest teorią geomorfologii fluwialnej, wykorzystywaną na całym świecie do praktycznych zastosowań w zagadnieniach inżynierskich [1]. Wiedza ta pozwala poszukiwać odpowiedzi na pytania związane ze stanem zrównoważonym cieków oraz jego utraty. W skutkach może wiązać się to ze zmianami profilu poprzecznego oraz podłużnego koryta, wielkości przepływu, ilości transportowanego rumowiska wleczonego oraz lokalizacji miejsc depozycji. Teoria ta może także opisać przypadki niestabilnych koryt, kierunki ich ewolucji oraz przewidywany zakres potrzebnych ingerencji inżynierskich. Umiejętność posługiwania się metodami geomorfologii fluwialnej stanowi narzędzie pozwalające sparametryzować „punkt widzenia rzeki” na warunki przepływu oraz na możliwości ułatwienia przebiegu wezbrania przez odpowiednie ukształtowanie przestrzeni w sąsiedztwie jej koryta. Takie podejście nie wymaga od projektanta decyzji o konieczności regulacji (zabudowy czy przebudowy) koryta rzeki, częściej oznacza poszukiwanie oszczędnej ingerencji w koryto lub niewielkiego zabezpieczenia elementów infrastruktury wymagających ochrony na terasach zalewowych, bez systematycznej zabudowy cieków [2].

Rzeki i potoki górskie o znacznym spadku, dużej szorstkości dennej oraz wysokiej dynamice zjawisk związanych z przepływem wód wezbraniowych stanowią wyzwanie dla aktualnych tendencji kształtowanych przez zapisy Ramowej Dyrektywy UE, Prawa wodnego, ustawy o ochronie środowiska oraz innych przepisów prawnych dotyczących działań prowadzących do zapewnienia stabilnych warunków przepływu wód. Ich regulacja i renaturyzacja jest jednym z podstawowych zadań wymagających dogłębnej i kompleksowej analizy parametrów hydrodynamicznych w celu współtworzenia z naturą takiej struktury koryta, która będzie siłą napędową dla zrównoważonego działania, mającego na celu przywrócenie zdegradowanych ekosystemów rzecznych [3].

## 2. Idea elastycznych zapór

W niniejszej pracy prezentowane są typy elastycznych barier (zapór) stosowanych do ochrony przed rumowiskiem do 1000 m<sup>3</sup> w przypadku pojedynczej bariery. Doświadczenie firmy Geobrugg AG uzyskane w trakcie eksploatacji takich obiektów pozwala na kaskadowe stosowanie tych rozwiązań, przez co uzyskuje się znacznie większą retencję, praktycznie o dowolnej objętości, ograniczoną jedynie geometrią koryta. Zapory te są elastycznymi barierami z siatek stalowych, rozpiętymi na przyczółkach kotwionych w brzegach koryt. Technologie te są znane już od co najmniej kilkunastu lat i wykorzystywane głównie w szeroko pojętej inżynierii hydrotechnicznej krajów Europy Środkowej, obu Ameryk oraz Afryki. W ostatnich latach następuje ekspansja tej technologii do krajów sąsiadujących z Polską od wschodu i południa, a także do Azji.

### 2.1. Bariery przeciwrumowiskowe

Zapory przeciwrumowiskowe są elastycznymi barierami pierścieniowymi, wytrzymałymi olbrzymie obciążenia statyczne i dynamiczne dzięki zastosowaniu stali o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie. Osiąga się odpowiednio wysokie wytrzymałości przy relatywnie niewielkiej ilości materiału, co znacznie redukuje nakłady pracy, obniża koszty oraz skraca czas instalacji (zmniejsza

również znacznie koszty późniejszej obsługi). Istnieje możliwość prostego opróżniania barier.

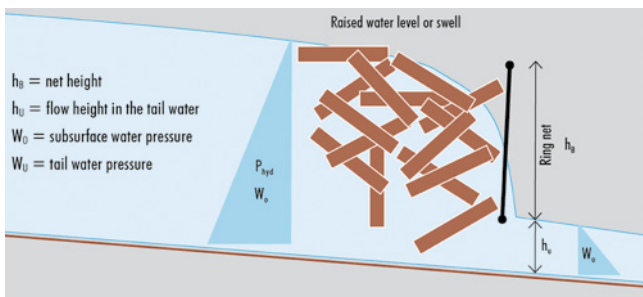
Instalacje barier pierścieniowych charakteryzują się istotnym skróceniem czasu realizacji, oszczędnością od 30 do 50% kosztów w porównaniu z konstrukcjami betonowymi, są rozwiązaniami przyjaznymi dla środowiska i wizualnie komponują się z krajobrazem. Proponowane rozwiązania i konstrukcje testowane są w wymagających warunkach, przy współudziale Szwajcarskiego Instytutu Badawczego ds. Lasów, Śniegu i Krajobrazu (WSL). Ilość zatrzymanego materiału dla pojedynczego rozwiązania wynosi do 1000 m<sup>3</sup>, w przypadku rozwiązań kaskadowych teoretycznie bez ograniczeń.

## 2.2. Komponenty

System elastycznej zapory przeciwrumowiskowej składa się z następujących charakterystycznych elementów, odznaczających się opisanymi poniżej własnościami:

- siatka pierścieniowa ze stali o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, elastyczna, o własnościach sprężysto-plastycznych, pochłaniająca energię oraz zmniejszająca tym samym obciążenie kotew;
- pierścienie hamujące zainstalowane na linach wspomagających i granicznych, aktywowane przy większych obciążeniach, rozpraszające tym samym energię przekazaną z siatki pierścieniowej i niepowodujące uszkodzenia lin;
- specjalne kątowniki grubościennne zabezpieczają górną linię przed abrazyjnym działaniem materiału przesypującego się przez barierę;
- kotwy linowe lub gwoździe samowierzące z głowicami FLEX;
- słupy wykorzystywane do instalowania barier, montowane na płytach gruntowych z połączeniem sworzniowym.

W najprostszej formie – bez pierścieni hamujących – system przeciwrumowiskowy firmy Geobrug może zostać wykorzystany jako bariera zatrzymująca spływające wraz z rumowiskiem skalnym pnie i kawałki drzew. Zostało to potwierdzone przez liczne badania przeprowadzone przez Uniwersytet Techniczny w Monachium w bawarskim Füssen. Testy objęły spływy o objętości od 5 do 30 m<sup>3</sup>/s.



Najprostszy system przeciwrumowiskowy, schemat działania oraz zdjęcie obiektu w eksploatacji, źródło: Geobrug AG

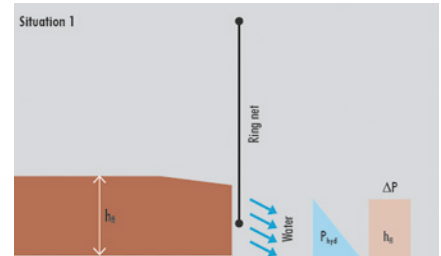
## 3. Etapy pracy elastycznej bariery

Podczas przepływu rumowiska transportowane masy osiągają barierę wykonaną z siatki elastycznej, towarzyszy temu ciśnienie hydrostatyczne oraz dynamiczne obciążenie przenoszone dolną linią nośną, rozłożone wysokością przepływu. Wartość obciążenia zależy od gęstości i typu rumowiska oraz wartości prędkości.

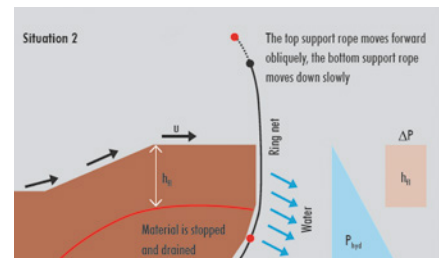
W kolejnym etapie ciśnienie hydrostatyczne działa przy zwiększonej wysokości zatrzymanego rumowiska. Napływające rumowisko przemieszcza się w górę, powodując powstawanie dodatkowego obciążenia.

Całkowita liczba uderzeń napływających fal rumowiska powtarza się do momentu wypełnienia wytworzonej objętości w cofce; zależy to od spadku, szerokości koryta oraz wysokości zainstalowanej siatki. Kolejne uderzenia są podobne do fazy drugiej, jednak charakteryzują się mniejszymi obciążeniami dynamicznymi i zmniejszającym się ciśnieniem hydrostatycznym.

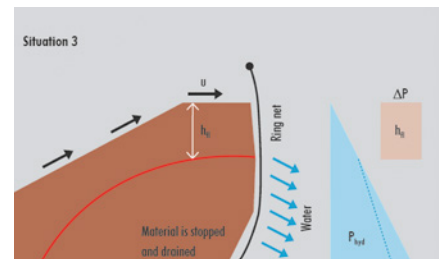
Wzrost osadzanego rumowiska zaczyna przewyższać wysokość elastycznej bariery. Pojawia się siła ścinająca osadzone rumowisko ponad barierą, której przeciwstawia się siła tarcia powstała wskutek nacisku nagromadzonego rumowiska oraz incydentalnie siła wyporu. Przy samoczynnym odwadnianiu osadzonego materiału zmniejsza się ciśnienie hydrostatyczne oraz całość spływu gruzowego ulega samostabilizacji.



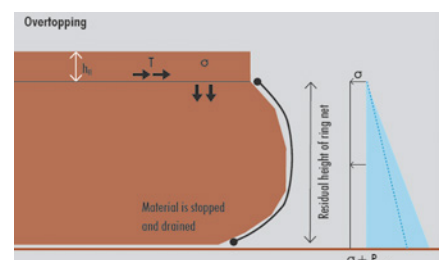
Pierwsze uderzenie fali rumowiska w elastyczną siatkę, źródło: Geobrug AG



Druga fala napięcia elastycznej siatki przepływająca nad pierwszą, zatrzymaną, źródło: Geobrug AG



Kolejne fale wypełniające elastyczną barierę, źródło: Geobrug AG



Kolejna faza pracy – przelewanie napływającego rumowiska, źródło: Geobrug AG

## 4. Przeciwdziałanie zagrożeniom – elastyczne zapory

Wystąpienie gwałtownych opadów powoduje powstawanie spływów powierzchniowych, które transportują wraz z wodą opadową błoto i drobne rumowisko. Spływająca woda w górnych partiach stoków, ze względu na swoją prędkość, jest



Układ barier elastycznych zainstalowanych w korycie potoku, w którym okresowo pojawiają się spływy gruzowe

w stanie zerwać i upłynić warstwy grubszego rumowiska. Ponieważ ciężar właściwy błota jest o wiele większy niż wody, taki spływ może transportować również wielkie gązły. Spływy rumowiska przyjmują różną formę w zależności od transportowanego materiału. W przypadku, gdy jest to frakcja drobna, mówi się o spływie błotnym. Jeśli frakcja jest większa oraz widoczne są kamienie lub gązły, to mamy do czynienia z typowym spływem większego rumowiska – gruzowym. Zdarza się także, że materiałem transportowanym przez wodę są drzewa i gałęzie. Zazwyczaj jednak spływ gruzowy zawiera w sobie wszystkie z wyżej wymienionych elementów.

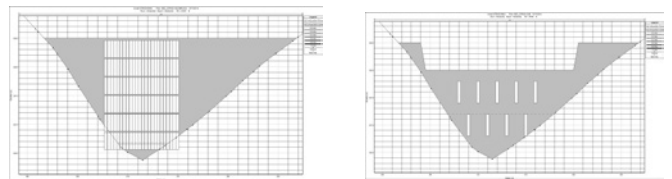
Zjawisko spływu gruzowego samo w sobie jest procesem dynamicznym i bardzo groźnym w skutkach. Materiał transportowany w korycie ciek wodnego porusza się zazwyczaj z prędkością nieprzekraczającą 5 m/s, a spływający materiał, ze względu na abrazyjny charakter zjawiska, zabiera ze sobą następne partie gruntu, drewna i kamieni. Spływy gruzowe są zjawiskami bardzo rozległymi, a ich objętość dochodzi niekiedy do kilku tys. m<sup>3</sup>. Dynamiczne oddziaływanie spływającej masy gruzu jest podstawowym czynnikiem powodującym uszkodzenia i będącym bezpośrednim zagrożeniem dla infrastruktury otaczającej koryto ciek wodnego.

Proponowane bariery elastyczne stanowią skuteczne rozwiązanie ochronne, ponieważ wytrzymują uderzenia fal transportowanego rumowiska oraz statyczne parcie rumowiska na konstrukcję ochronną. Jedną z najskuteczniejszych metod zapobiegania takim zjawiskom jest zmniejszenie prędkości przepływu ciek wodnego oraz rozproszenie energii fali spływającego rumowiska.

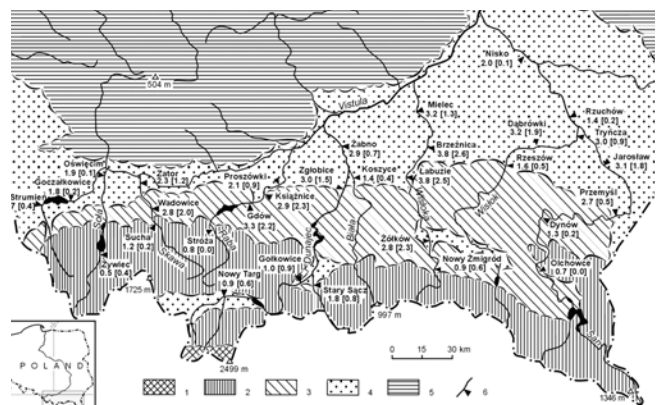
W praktyce charakter destrukcyjnych oddziaływań znacznie ogranicza możliwości stosowanych rozwiązań profilaktycznych i naprawczych. Stosuje się ciężkie, masywne, żelbetowe zapory lub bariery przeciwrumowiskowe oraz lekkie, elastyczne bariery przeciwrumowiskowe, które po całkowitym wypełnieniu również zmniejszają spadek hydrauliczny ciek.

## 5. Przykład obliczeniowy zastosowania elastycznych barier – rzeka Stradomka

Przeprowadzono obliczeniową analizę zmiany hydromorfologicznych parametrów rzeki Stradomki w górnych partiach jej ciek (od km 35 + 000 do km 41 + 000), przy założeniu pracy koryta z zastosowaniem istniejącej zabudowy w postaci zapór przeciwrumowiskowych oraz elastycznych barier przeciwrumowiskowych. Na analizowanym odcinku funkcjonują cztery zapory przeciwrumowiskowe, odpowiednio w km 35 + 300, km 36 + 300, km 39 + 680 oraz km 40 + 679. Do analizy porównawczej w miejsca istniejących zapór przeciwrumowiskowych dokonano teoretycznej podmiany na zapory elastyczne. W analizie wykorzystano dane hydrologiczne z uwzględnieniem wartości przepływów ekstremalnych w 2010 r. Krzywą uziarnienia założono typową dla rzek zlewni Raby.



Konstrukcje zapór przeciwrumowiskowych – betonowe oraz rozwiązania proekologiczne równoważne siatce elastycznej – przykład, model Hec-Ras



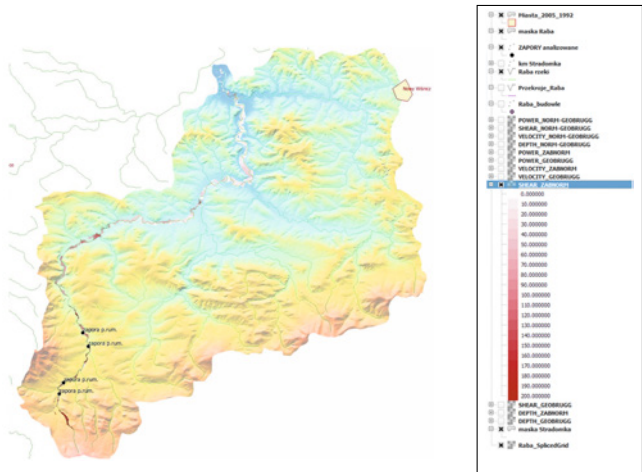
Obniżenie się [m] minimalnych rocznych stanów wody głównych rzek polskich Karpat w ciągu XX w. oraz [w nawiasach] w jego drugiej połowie jako wskaźnik pogłębienia się koryt [16]

Wszystkie ciek, w tym górna Wisła i jej karpackie dopływy, transportują zarówno rumowisko wleczone, jak i unoszone. Wzajemny udział obu typów rumowiska w ciekach o różnym charakterze jest jednak odmienny. W przypadku cieków górskich i podgórskich obserwuje się przewagę transportu rumowiska wleczonego nad unoszonym. Wynika to z dostępności materiału o określonym składzie granulometrycznym. Materiał denny koryt charakteryzują średnice miarodajne takiej wielkości, że prędkość

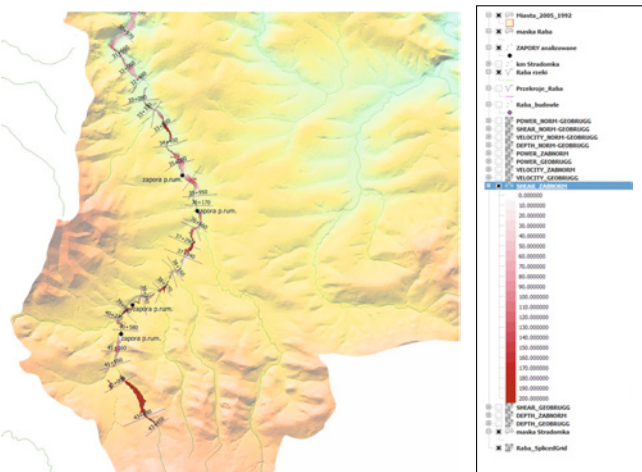
Tab. 1. Zestawienie podstawowych statystyk przepływów

Nazwa ciek	km biegu	Miejscowość	Przepływy charakterystyczne		
			SNQ	SSQ	SWQ
			m <sup>3</sup> /s		
Stradomka	2,6	Stradomka	0,57	3,48	84,35
Stradomka	14,8	Łapanów	0,28	2,15	60,83

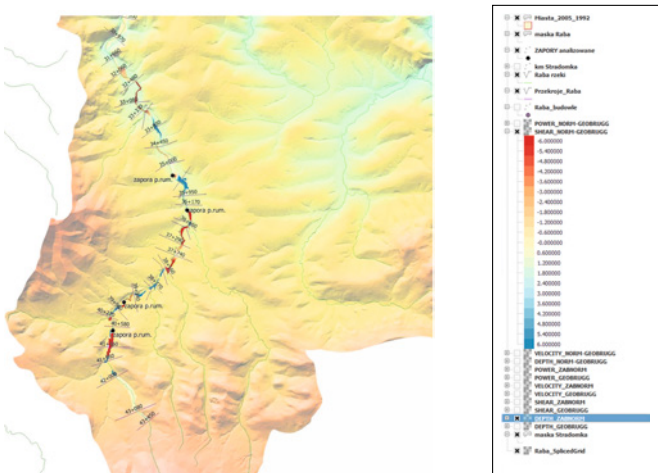




Analiza naprężeń [N/m<sup>2</sup>] – symulacja dla analizowanych zapór przeciwrumowiskowych



Analiza naprężeń [N/m<sup>2</sup>] – symulacja dla analizowanych zapór przeciwrumowiskowych, powiększenie



Analiza różnic naprężeń [N/m<sup>2</sup>] – symulacja dla analizowanych zapór przeciwrumowiskowych w porównaniu z zaparami elastycznymi

dna koryta oraz jego silną erozją. W przypadku Stradomki spadek ten wynosi ok. 1,2%.

Powyżej zaprezentowano wyniki modelowania parametrów hydromorfologicznych systemem Hec-Ras+GISTools oraz przetworzone informacje z wykorzystaniem oprogramowania QGIS. Ze względu na ograniczone miejsce pokazano jedynie wartości

parametrów dla zabudowy istniejącej oraz różnice parametrów dla zabudowy istniejącej i barier elastycznych. Kolejno przedstawiono wartości mocy strumienia, naprężenia styczne. Niniejsze wartości parametrów hydromorfologicznych odpowiadają ekstremalnym wartościom przepływów – 250 m<sup>3</sup>/s.

Na rycinach zaprezentowano wyniki analiz w postaci różnic przestrzennego rozkładu wartości parametrów hydromorfologicznych, obliczonych jako różnica pomiędzy stanem dla zabudowy istniejącej oraz stanem dla zabudowy zaporami elastycznymi. Obszary w kolorze czerwonym świadczą o wyższych wartościach mocy strumienia dla zabudowy elastycznej – wartości do 20 W/m<sup>2</sup>, co stanowi zmianę o 1,33%. Z wcześniejszych analiz wynika, że wartości mocy strumienia dla zabudowy istniejącej sięgają w analizowanym obszarze wartości 1500 W/m<sup>2</sup>.

Graficznie zaprezentowano również różnice przestrzennego rozkładu wartości naprężeń stycznych, obliczonych jako różnica pomiędzy stanem dla zabudowy istniejącej oraz stanem dla zabudowy zaporami elastycznymi. Obszary w kolorze czerwonym świadczą o wyższych wartościach naprężeń dla zabudowy elastycznej – do 6 N/m<sup>2</sup>, co stanowi zmianę o 3,0%. Z wcześniejszych analiz wynika że wartości naprężeń dla zabudowy istniejącej sięgają w analizowanym obszarze wartości 200 N/m<sup>2</sup>.

## 6. Przykłady innych zastosowań z zakresu zabezpieczenia przed erozją

Stosowanie zapór elastycznych umożliwia również rozwiązywanie problemów ze stabilizacją dna. Niniejszy przykład pokazuje praktyczne zastosowanie elastycznych barier zabezpieczających koryto poniżej mostu przed erozją i powstawaniem wyboju. Zawężenie koryta rzeki oraz wielkość wód powodziowych spowodowały nagromadzenie dużej ilości rumowiska na prawym brzegu rzeki Arges. W pierwszym etapie zaproponowano wzmocnienie prawego brzegu przez zastosowanie betonowych umocnień zabezpieczających rozmywanie koryta cieku. Alternatywą dla tak nieekologicznego rozwiązania była propozycja zastosowania dwóch elastycznych barier z siatki o pierścieniowych oczkach, rozpiętej na naciągniętej linii stalowej. W pierwszym okresie pracy takiego obiektu elastyczna zaporę zatrzymała większe bloki skalne, które w efekcie utworzyły zaporę stabilizującą dno koryta, co pozwoliło w późniejszym okresie ekologicznymi metodami spełniać zadania zapory przeciwrumowiskowej. Kompletną instalację z dwiema barierami wykonano w ciągu miesiąca, bez



Przykład stabilizacji koryta w sąsiedztwie mostu – ochrona filarów mostu przez zastosowanie elastycznych barier przeciwrumowiskowych



Widoczna elastyczna bariera stabilizująca dno koryta na odcinku posadowienia mostu

potrzeby etapowania budowy i przekładania koryta. Siatka pierścieniowa została na dnie rzeki, w pełni wkomponowując się w koryto i spełniając założenia obliczeń hydrodynamicznych.

## 7. Podsumowanie

Artykuł prezentuje analizę wykonaną z wykorzystaniem modelowania hydrodynamicznego, uwzględniającą transport rumowiska dla rozwiązań w postaci poprzecznej zabudowy hydrotechnicznej – typowych, betonowych zapór przeciwrumowiskowych oraz proponowanych elastycznych barier siatkowych. Wnioski z przeprowadzonych analiz pozwalają stwierdzić, że na odcinku zlokalizowanych zapór przeciwrumowiskowych elastyczne rozwiązania w mniejszym stopniu ingerują w parametry opisywane teorią geomorfologii fluwialnej, w tym przypadku moc strumienia oraz wartość naprężeń. Zakres wartości ekstremalnych jest mniejszy, a na analizowanych odcinkach nie występują tak duże zmiany tych parametrów. Świadczy to o bardziej proekologicznym charakterze proponowanej formy zabudowy poprzecznej. Rozwiązania te nie dokonują separacji koryt oraz w mniejszym stopniu ingerują w stan ekologiczny wód.

Możliwości użycia barier elastycznych pozwalają stosować profilaktykę lub naprawę skutków w zakresie:

- obniżania się dna, prowadząc do pogłębiania się koryta przemieszczającego się w górę i w dół cieku;
- bocznej niestabilności koryta, będącej efektem nadmiaru energii cieku, która nie jest wydatkowana na transport rumowiska;
- rozwoju obrukowania dna, które może utrudniać tarło ryb litofilnych, lub odsłonięcia skalnego dna cieku, uniemożliwiającego odbicie tarła przez te ryby;
- podmywania mostów, budowli regulacyjnych;
- zmiany przebiegu koryta wywołanej jego przzerwaniem do zwirowni zlokalizowanych na terasach zalewowych.

## Literatura

- [1] Thorne C.R., Hey R.D., Newson M.D.: *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Chichester 1997.
- [2] Jeleński J., Gatkowska-Jeleńska D.: *Wykorzystanie metod geomorfologii fluwialnej do planowania zabezpieczeń komunikacyjnych budowli liniowych przed powodzią w terenach górzystych* (online). Dostępny w Internecie: [http://www.jot-raba.az.pl/pdf/wykorzystanie\\_metod.pdf](http://www.jot-raba.az.pl/pdf/wykorzystanie_metod.pdf) (dostęp 24 czerwca 2014).

- [3] Bartnik W., Michalik A., Bednarczyk T.: *Równanie transportu rumowiska wlezonego dla rzek Podkarpacia*. „Gospodarka Wodna” 1998, nr 7.
- [4] Bartnik W., Książek L.: *Regulacja rzek i potoków górskich w warunkach równowagi hydrodynamicznej*. „Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich” 2007, nr 4.
- [5] Mroziak M., Baraniak P.: *Konstrukcje chroniące przed spływami gruzowymi i spadającymi odłamkami skalnymi – testowanie, wymiarowanie, instalacja, użytkowanie*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, nr 2, s. 42–47.
- [6] Łajczak A.: *Zróżnicowanie transportu zawiesiny w karpackiej części dorzecza Wisły*. „Dokumentacja Geograficzna” 1989, z. 5.
- [7] Bartnik W.: *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego*. Rozprawa habilitacyjna, nr 172, 1992, Akademia Rolnicza w Krakowie.
- [8] Lenar-Matyas A., Ratomski J., Witkowska H.: *Zmiany granulacji w procesie erozji poniżej budowli piętrzącej*. Materiały III Konferencji Naukowej *Współczesne problemy Inżynierii Wodnej*, Wisła 1997, s. 330–335.
- [9] Graf W.H.: *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw-Hill Book Comp., 1971.
- [10] Michalik A.: *Badania intensywności transportu rumowiska wlezonego w rzekach karpackich*. Rozprawa habilitacyjna, nr 38, 1990, Akademia Rolnicza w Krakowie.
- [11] Osuch B.: *Rozkład uziarnienia niespoistego materiału skalnego w przekrojach niektórych odcinków cieków karpackich*. „Czasopismo Techniczne” 1965, nr 10.
- [12] Słota H., Szczęsny J.: *Metodyka poboru reprezentatywnych prób rumowiska dennego w warunkach górskich*. „Gospodarka Wodna” 1974, nr 2.
- [13] Stelczer K.: *Bed-load transport. Theory and practice*. Water Resources Publications, 1981.
- [14] Bartnik W., Michalik A.: *Transport rumowiska wlezonego w fali powodziowej*. XX Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki *Współczesne problemy hydrauliki wód śródlądowych*, Kraków–Ustroń–Jaszowice, wrzesień 2000.
- [15] Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J.: *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*. Warszawa 2005.
- [16] *Stan środowiska rzek południowej Polski i możliwości jego poprawy – wybrane aspekty*. Red. B. Wyżga. Kraków 2008.



**Zobacz FILM**

**GEOBRUGG**  
BRUGG  
Safety is our nature