

## **Zastosowanie równań równowagi cieków żwirowodnych dla zachowania naturalnego otoczenia dróg**

### **1. WPROWADZENIE**

Bardzo często drogi trasowane są w dnach dolin wzdłuż potoków i rzek, gdzie przecinają liczne dopływy a często także główny ciek. Wprowadzają w ten sposób sztuczne konstrukcje w postaci przepustów i mostów w system rzeczny, który uprzednio nie był skrzepowany. Tam, gdzie spadki koryt są bardzo niewielkie, a w związku z tym cieki posiadają niewielką jednostkową moc strumienia (co odzwierciedlone jest obecnością piaszczystego lub mulistego dna cieków, patrz Załącznik 1), zabudowa koryt lub przekształcanie istniejących koryt w planie nie musi prowadzić do zaburzenia równowagi cieków. Natomiast tam, gdzie występują potoki o skalnym, kamienistym i żwirowym dnie, a doliny bywają wąskie i ciasno zabudowane istnieje tendencja aby uprościć i ustabilizować przebieg koryt cieków w sposób dostosowany do przebiegu drogi. W procesie projektowania drogowego liczne są więc przypadki żądania przez inwestora lub projektantów uregulowania rzek i potoków dla uniknięcia lub uproszczenia przejść drogowo-mostowych. Z drugiej strony istnieją naciski wymuszające regulowanie cieków w sąsiedztwie dróg, mostów i przepustów ze strony zarządów wodnych i zarządów melioracji. Argumentem jest wtedy konieczność tradycyjnego zabezpieczenia przeciwpowodziowego i przeciwoerozyjnego drogi i jej sąsiedztwa.

Projekty regulacyjne polegają na zmianie profilu i przekroju cieków na uproszczony stały profil i przekrój kanału regulacyjnego o zazwyczaj skróconej trasie. Ich realizacja nie tylko całkowicie niszczy otoczenie przyrodnicze rzeki, ale ponadto zmniejsza odporność na erozję denną w okresie budowy oraz wprowadza nierównowagę w dynamice transportu rumowiska wleczonego w okresie późniejszym poprzez likwidację naturalnego opancerzenia dna. W konsekwencji zwiększonej erozji dennej przy umocnionych brzegach koryta, rzeka wcina się w dno doliny osuszając warstwę wodonośną w aluwiach doliny. Ponadto koryto przenosi wtedy przepływy o większej energii niż uprzednie przekroje rzeki nieuregulowanej i większe niż stosowane przez projektanta do obliczenia kanału regulacyjnego. Powoduje to konieczność stałych remontów, a także skłonność do stosowania przez projektantów nadmiernie trwałych umocnień nie tylko brzegów, ale także dna tego kanału. Zarówno nadmierna erozja denna jak i zbędna zabudowa dna i brzegów trwałymi budowlami betonowymi, murowanymi czy gabionami pogłębia nieprzydatność cieków do bytowania organizmów roślinnych i zwierzęcych. Wyłącza to znaczne obszary wód z procesów przyrodniczych i powoduje brak łączności wód wzdłuż cieków oraz pomiędzy ciekami a terenami nadbrzeżnymi (Mokwa, Wiśniewolski 2008), Rys. 1.

---

<sup>1</sup> Mgr inż. Józef Jeleński, Ove Arup & Partners Ltd, Oddział w Polsce, jot.myslenice@interia.pl

<sup>2</sup> Mgr inż. Dorota Gatkowska – Jeleńska, WS Atkins Polska, Sp. z o.o., dorgat@interia.pl



*Rys. 1. Zanik przepływu dopływu Raby w osiatkowanym dnie rowu przydrożnego, do którego dopływ ten został skierowany bez wyraźnej potrzeby*

Nie brakuje przykładów zarówno dobrych jak i niekorzystnych rozwiązań sąsiedztwa drogi i ciek. Można powiedzieć, że **najlepszym sposobem ochrony naturalności cieków równoległego do drogi jest oddalenie ich od siebie na odpowiednią odległość** (Jeleński 2004). Przy przekraczaniu cieków przepust i most powinien mieścić nie tylko koryto ciek, ale także jak najszersze pasy nadbrzeżne dla zachowania komunikacji ludzi oraz zwierząt wodnych i lądowych<sup>3</sup>. W wielu jednak przypadkach powstaje wątpliwość, co należy uznać za „odpowiednią” odległość cieków od drogi, zarówno w aspekcie ochrony środowiska jak i w aspekcie ewentualnego zagrożenia budowli drogowej wezbraniem tego ciek. Z braku innych wskazówek można dla górskich potoków i rzek stosować regułę 3x20:

- minimum 20m roślinnego pasa nadbrzeżnego,
- temperatura wody maksimum 20°C, co oznacza minimum 50% zacienienia lustra wody w letnie południe,
- ilość zawiesiny ogólnej maksimum 20 mg/l, co można uzyskać poprzez konsekwentną nieingerencję w ciek i pasy nadbrzeżne).

Uważa się też, że dla zachowania naturalnego meandrowania cieków konieczny jest pas terenu szerokości 3 do 5-krotnie przekraczającej szerokość koryta rozpatrywanego ciek (Petts, Calow 1996). Dla uzasadnienia braku ingerencji w naturalny przebieg cieków lub dla właściwego jego przekształcenia konieczne jest posłużenie się odpowiednią metodologią, która pozwoli na parametryczne udowodnienie inwestorowi i władzom wodnym poprawność przyjętych rozwiązań. Taką możliwość dają równania równowagi cieków.

## 2. DYNAMICZNA RÓWNOWAGA CIEKU

Jak dowodzi porównanie historycznych map, wiele koryt rzek i potoków nie przemieszcza się poza określony pas terenu mimo okresowej zmiany swego przebiegu w planie i profilu. Proste i meandrujące koryta zwirowe mogą być trwałe w inżynierskiej perspektywie czasowej (kilkudziesięciu lat) dzięki trwającym od tysiącleci procesom korytowym w dolinach. Naturalne koryta pozostawione bez inżynierskiej ingerencji potrafią być trwałe dzięki równowadze określonej przez stabilny profil, przekrój i plan, które są zależne od zazwyczaj ustalonego rozkładu zmienności przepływów i transportu rumowiska, materiału dna i brzegów, zasięgu zarośli i lasów nadbrzeżnych oraz spadku dna doliny. Ta równowaga objawia się dostosowywaniem się naturalnego koryta do chwilowych i długoterminowych zmian dostawy rumowiska lub do zmian rozkładu przepływów poprzez dostosowanie parametrów koryta do zmienionych warunków. Jaskrawym przykładem dostosowywania się koryt do zmniejszonej dostawy rumowiska jest opancerzenie dna cieków żwirem i kamieniami o średnim uziarnieniu grubszym niż osady w dnie doliny. Zmniejszenie częstości występowania przepływów powodziowych spotykane czasem poniżej zbiorników zaporowych objawia się zarastaniem koryta i zwężeniem jego przekroju. Te procesy dostosowawcze w naturalnych korytach nie są gwałtowne, choć w dłuższych okresach zmieniają parametry geometryczne koryt.

**Równowaga cieków może być łatwo naruszona ingerencją inżynierską poprzez usunięcie lasów i zarośli nadbrzeżnych, wyprostowanie i skrócenie koryta, umocnienie brzegu materiałem skalnym, przekształcenie przekroju poprzecznego lub zniszczenie opancerzenia dna cieków.** W efekcie naruszenia równowagi objawy niepożądane mogą być obserwowane już po pierwszym wezbraniu nie tylko na przekształconym odcinku cieków, ale

---

<sup>3</sup> Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. (Dz. U. nr 63 z dnia 3 sierpnia 2000 r.)



także na odcinkach daleko sięgających w górę i w dół cieku. Każde kolejne wezbranie większe od poprzedniego będzie przekształcało koryto aż do czasu, kiedy kilkakrotne przejście wody brzegowej ustali nowe warunki równowagi w korycie. Staje się ono zazwyczaj bardziej pojemne niż poprzednio. Obecnie takim najczęściej obserwowanym długoterminowym skutkiem regulacji rzek i potoków górskich jest przekształcenie dawnych rozplecionych koryt aluwialnych (żwirowych) w jednonurtowe koryta skalne lub kaskadowe, w których obecność w dnie cieku kamieni i żwiru bywa stabilizowana seriami betonowych i kamiennych stopni (Wyżga 2001). Zwiększona erozja wgłębna cieku głównego powoduje ponadto występowanie przeszkód w łączności wód nie tylko poprzez jego przegradzanie stopniami, ale także poprzez obniżenie podstawy erozyjnej dopływów. Powoduje to, że przepusty drogowe wszystkich dopływów stają się przeszkodami nie do przebycia dla organizmów wodnych.

### 3. RÓWNANIA RÓWNOWAGI CIEKU ŻWIROWEGO

Spośród równań określających stan równowagi dynamicznej koryt żwirowych tylko równania Hey'a – Thorne'a uwzględniają ilość wleczonego rumowiska i meandrujący kształt koryta oraz pozwalają na określenie zróżnicowania wymiarów przekrojów strefy bystrzy i plos. Równania te powstały jako seria korelacji dotyczących parametrów koryt rzek i potoków żwirowych z całego świata. Powszechnie przyjmowanym założeniem jest, że stabilne koryto żwirowe jest kształtowane przez przepływ brzegowy. W jednostkowych zastosowaniach praktycznych powinno się przyjmować do równań przepływ brzegowy taki, jak w sąsiadujących z rozpatrywanym odcinkiem przekrojach.

Załącznik 2 podaje dane wejściowe do równań oraz same równania. Pozwalają one na obliczenie parametrów koryta naturalnego wystarczające do opisu jego zmienności w planie (szerokość lustra wody brzegowej, odległość między bystrzami, krętość koryta) oraz w profilu (spadek wody brzegowej, średnie głębokości bystrza i plosa). Ponadto podają maksymalne głębokości bystrza i plosa oraz zróżnicowanie szerokości wody brzegowej bystrza i plosa.

**Takie parametry można bezpośrednio skonfrontować z wymiarami naturalnego przekroju bez konieczności jego przekształcania.** Tak sparametryzowany przekrój nie ma więc nic wspólnego z „przekrojem regulacyjnym” czy „typowym” stosowanym w projektowaniu kanałów regulacyjnych. Typowy projekt kanału lub rowu składa się z profilu istniejącego i projektowanego dna, założonego przekroju o przyjętej szerokości poziomego dna i ustalonym nachyleniu skarp. Plan kanału i rowu jest zazwyczaj uproszczony, bo składa się z prostych i łuków podyktowanych pożądanym kierunkiem odwodnienia lub dopasowaniem do innych budowli. W następstwie takiego projektowania realizowany jest najczęściej trapezowy (czasem złożony – dwudzielny) przekrój o płaskim dnie, jednakowej szerokości i jednolitym spadku. Nie ma to nic wspólnego z kształtem naturalnego cieku. Ciek taki charakteryzuje się sinusoidalnym planem, w którym pomiędzy skręcającymi naprzemiennie w prawo i w lewo zakolami głębszych plos występują w punktach przegięcia płytsze i szersze bystrza. Szerokości koryta i długości fal meandrów zależą od stopnia zarośnięcia brzegów drzewami i krzakami. Łatwo sobie wyobrazić, co stanie się po dokonaniu wycinki drzew i krzewów koniecznej dla wykonania ujednoczonego przekroju „autostrady dla potoku”, zanim nawet przystąpi się do realizacji tradycyjnego projektu regulacji. Tak wykonany kanał na zawsze będzie skazany na wykonywanie prac utrzymaniowych, których celem będzie ciągłe przeciwdziałanie naturalnym procesom korytowym.

Tymczasem zastosowanie równań Hey'a – Thorne'a daje wiele możliwości, które można podsumować następująco:

- Po obliczeniu parametrów koryta w równowadze, można porównać te parametry z pomierzonymi w terenie i wyciągnąć odpowiednie wnioski. Może się okazać, że koryto jest w równowadze, a istniejąca terasa zalewowa jest wystarczająca dla przeniesienia wód powodziowych i wtedy nie jest konieczna żadna ingerencja inżynierska w sąsiadujący z drogą potok. W taki też sposób można dokładnie wyznaczyć odcinki potoku, które ingerencji inżynierskiej wymagają.
- Najczęściej nie ma danych dotyczących ilości wlezonego rumowiska koniecznych do zastosowania równań, ale można dopasować ten parametr do rzeczywistego spadku cieku na zasadzie prób i błędów i w ten sposób dokonać oszacowania tej wielkości.
- Jednym z objawów nierównowagi koryta jest jego większa pojemność niż wielka woda półtoraroczna czy dwuletnia. Jeśli uziarnienie dna potoku nie wytrzyma energii zwiększonych przepływów pełnokorytowych, to konieczne staje się obniżenie terasy zalewowej dla zmniejszenia przekroju koryta. Alternatywnie, jest też możliwe w tym przypadku podwyższenie koron bystrzy poprzez nasyp żwiru i kamieni o odpowiednim (obliczonym) uziarnieniu.
- Jeśli istniejące proste koryto ma spadek większy niż obliczony wzorami równowagi, to dla ustalenia równowagi najczęściej nie ma innego wyjścia, jak wyznaczyć nowy, sinusoidalny przebieg koryta dla zwiększenia jego krętości i zastosowania sekwencji bystrze – plosy. Materiał, z którego będzie się wykonywało koryto nie może pochodzić z wykopu w korycie, gdyż uziarnienie miejscowych żwirów jest zawsze drobniejsze niż opancerzenie dna wzięte do obliczeń. Miejscowy materiał należy zatem doziarnić grubszym dowiezionym materiałem lub ewentualnie dowieźć z zewnątrz całość potrzebnego materiału do wykonania korekty przebiegu koryta.
- Analizując koryta wcześniej uregulowane łatwo określić za pomocą równań Hey'a – Thorne'a deformacje pozostałe po ingerencji inżynierskiej, takie jak: przekroczenie maksymalnej głębokości bystrza, brak dostaw rumowiska wlezonego, zbyt mała lub zbyt duża pojemność koryta, konieczność obsadzenia koryta drzewami itp.
- Jeśli konieczne jest przełożenie koryta na pewnym odcinku, to można tego dokonać stosując uziarnienie materiału dna i parametry koryta takie, jakie wynikają z równań Hey'a – Thorne'a w sekwencji naprzemiennie występujących plos i bystrzy, co włączy nowy odcinek od samego początku w procesy korytowe adekwatne dla całości cieku.

Zastosowanie wzorów jest ograniczone do spadków doliny poniżej 2,2%. Dalszym ograniczeniem stosowania wzorów Hey'a – Thorne'a jest dolna granica przepływów pełnokorytowych ( $3,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), co oznacza, że nie jest możliwa parametryczna ocena niewielkich strumieni o dużych spadkach i zlewni mniejszej niż około  $5 \text{ km}^2$ . W przypadku konieczności analizy mniejszych cieków warto jednak wziąć pod uwagę koryta o parametrach podobnych do występujących w sąsiedztwie, identyczne uziarnienie materiału dna i odpowiednio szerokie terasy zalewowe.

Zależność odległości pomiędzy bystrzami  $z$  od szerokości lustra wody brzegowej  $W$  jest zasadą generalną, a według wielu pozycji literatury:

$$z = \alpha W$$

gdzie  $\alpha = 5$  do  $7$  dla cieków naturalnych i  $5$  do  $9$  dla cieków uregulowanych. Szerokość koniecznej terasy zalewowej można oszacować poprzez zastosowanie podejścia takiego jak w przypadku projektowania regulacyjnych przekroji dwudzielnych, przyjmując głębokość i prędkość rozlanej wody tak, by nie niszczyła zagospodarowania zalanego terenu.

Z podanego powyżej opisu wynika, że **obliczenie równań Hey'a – Thorne'a powinno być wstępem do jakichkolwiek analiz środowiskowych żwirowodnych potoków i**

rzek przepływających w sąsiedztwie dróg, jak również do ustalenia zakresu i sposobu ich przekształceń inżynierskich.

#### 4. PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIE ANALIZY: ŚCIEŻKA ROWEROWA WZDŁUŻ POTOKU KRZYWICZANKA

Nadmiar ziemi z wykopów przy budowie drogi krajowej „zakopianki” odłożono wzdłuż drogi powiatowej Stróża – Pcim z myślą o zrobieniu tam w przyszłości chodników i ścieżki rowerowej w miejsce wyciętych drzew przydrożnych. Ponieważ teren pomiędzy tą drogą a rzeką Rabą należy do obszaru „Natura 2000” (tzw. shadow list), konieczna stała się analiza wpływu zajęcia części terenów zalewanych wodą 100-letnią Raby oraz bliskiego sąsiedztwa potoku Krzywiczanka na zamierzoną inwestycję. Inwestor skłonny jest dokonać regulacji potoku przebiegającego wzdłuż drogi „na wszelki wypadek”, ale regulacja potoku jest niemożliwa ze względu na konieczność utrzymania wód w dobrym stanie ekologicznym wymaganym Ramową Dyrektywą Wodną podpisaną przez Polskę podczas przystąpienia do Unii Europejskiej. Użytkownik rybacki i Wojewódzki Konserwator Przyrody zwracają uwagę na wysoką wartość przyrodniczą terenu. Budowa ścieżki rowerowej może ułatwić dostępność tego terenu, konieczne jednak jest zachowanie walorów przyrodniczych potoku Krzywiczanka, doliny rzeki Raby i nadbrzeżnych lasów łęgowych.



Rys. 2. Porównanie historycznych map z początku i końca XX wieku ukazujące przekształcenie dawnego koryta Raby w obecny przyujściowy odcinek potoku Krzywiczanka

Na rozpatrywanym odcinku obecny przebieg potoku idzie śladem odciętego koryta rzeki Raby wzdłuż powiatowej drogi wybudowanej na skraju doliny (zobacz porównanie map



historycznych z początku i końca XX wieku), Rys. 2. Powyżej biegnie on skalnym korytem od zapory przeciwrumowiskowej w przysiółku Mizerówka, następnie korytem regulacyjnym wykonanym w latach 70-tych (częściowo ukrytym pod obfitą roślinnością) aż do drewnianego mostu drogi powiatowej. Od tego mostu do ujścia potoku droga jest obecnie poszerzona niekontrolowanym nasypem, na którym ma powstać ścieżka rowerowa. **Wartość przyrodnicza potoku wynika z faktu, że zimna i stosunkowo czysta woda wartkiego górskiego strumienia trafia do rozległych pól dawnego koryta Raby, w których może rozwijać się roślinność wodna, nadbrzeżna i lęgowa.** Głębokie płoza o prawie stojącej wodzie przypominają żyzne stawy o mulistym dnie, a kamieniste i żwirowe bystrza stanowią o przydatności tego potoku dla ryb prądolubnych. Wszędzie występuje dostatek grubego rumoszu drzewnego, istotnego dla prawidłowego kształtowania koryta potoku (Wyźga 2007). Przyujściowy odcinek potoku nawadnia warstwy aluwiów w dolinie Raby przyczyniając się do zwiększenia retencji dolinowej i korytowej oraz do zachowania niskiej temperatury wody w rzece Rabe. Podobne starorzecza zasilane wodą dopływów zostały całkowicie wyeliminowane w dolinie Raby. Miejsca ostatnich takich starorzeczy zostały wykorzystane pod budowę dróg w rejonie Lubnia (2006-2008), Stróży (2004-2006) i Myślenic (2002-2004).

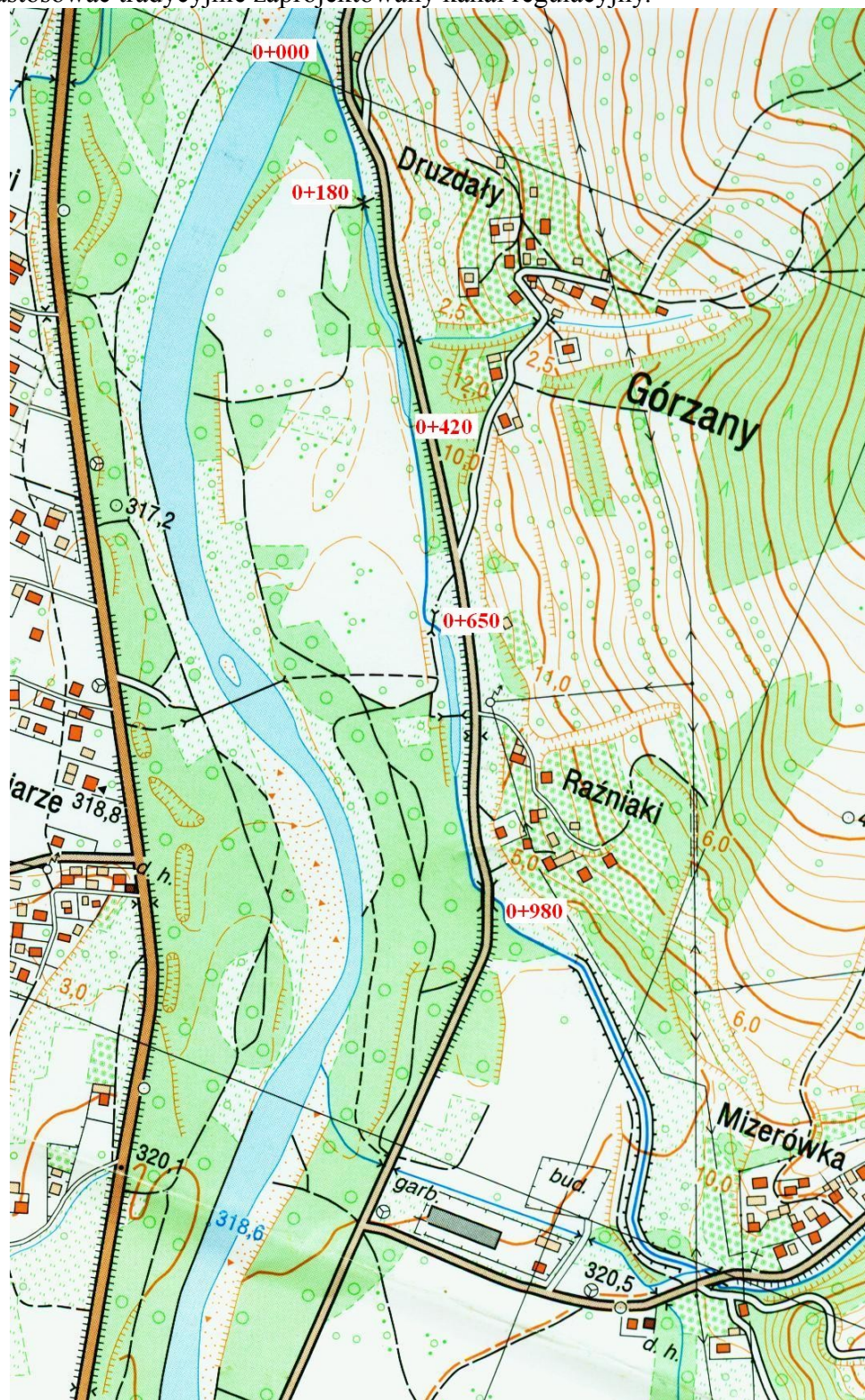


Rys. 3. Skupiska włosienicznika wodnego (*Batrachium aquatilis*) w potoku Krzywiczanka

Potok Krzywiczanka jest ostatnim miejscem obfitującym w roślinność podwodną, skąd może się ona przenosić do koryta uregulowanej Raby. Występują tu dwa gatunki prawnie chronionych roślin (włosienicznik wodny i rzeczny), Rys. 3, oraz 10 gatunków prawnie chronionych zwierząt (minóg strumieniowy, głowacz przegopletwy, śliz, piekielnica, rzęsorek rzeczek, jeż, wydra, bóbr, zimorodek, czapla siwa). Nigdzie indziej szuwar jeżogłówkowy nie występuje tak obficie jak tutaj, z mocnymi skupiskami roślin ziemnowodnych będących siedliskiem kielży (potocznik wąskolistny, przetacznik bobowniczek i mech zdrojek), które znalazły tutaj wyłączone siedlisko w zasięgu obwodu rybackiego nr 2 rzeki Raby. Strefy



bystrzy są stałym miejscem tarła ryb reofilnych z Raby, w tym specyficznej rasy myślenickiej pstrąga potokowego (*Salmo trutta dorothea*), dla której jest to jedyne tarlisko dostępne z koryta Raby. Taka różnorodność przyrodnicza uległaby zagładzie podczas prac regulacyjnych, gdyby zastosować tradycyjnie zaprojektowany kanał regulacyjny.



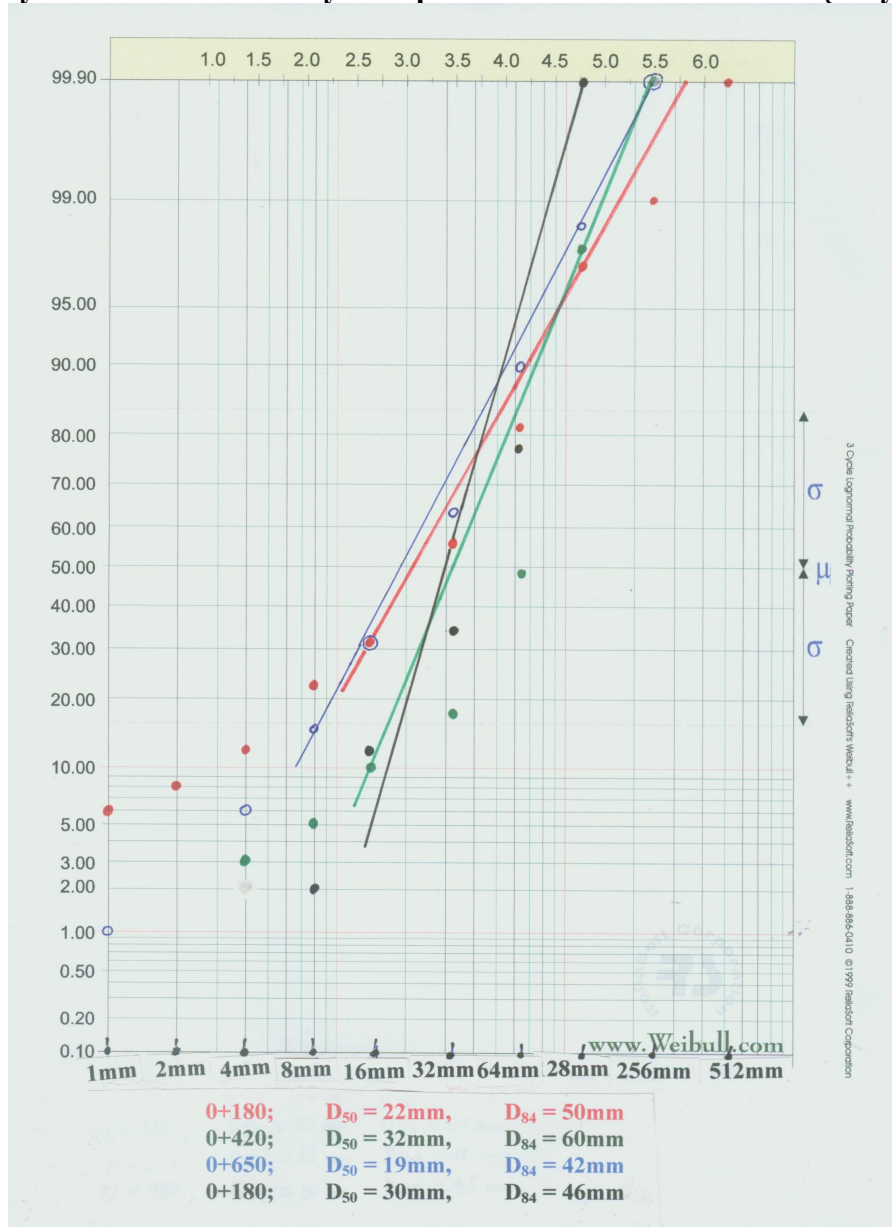
Rys. 4. Lokalizacja odcinka i wybranych przekrojów potoku Krzywiczanka

## 5. PARAMETRY KORYTA ŻWIROWEGO POTOKU KRZYWICZANKA

Na rozpatrywanym odcinku (od drewnianego mostu na drodze Stróża – Pcim w dół potoku) spadek koryta potoku nie jest jednorodny. Dwa odcinki potoku biegnące przez długie



płosa dawnego koryta Raby nie są podobne do jego dwóch prostych lub lekko meandrujących odcinków (Rys. 4). Jeden z tych drugich odcinków występuje pomiędzy podobnymi do wydłużonych stawów starorzeczami, a drugi odwadnia najniższe starorzecze ujściem do rzeki Raby. Spadek doliny Raby określony na tym odcinku jako 0,0045 nie jest więc właściwy dla spadku doliny potoku, dla którego cała różnica wysokości jest skonsumowana na dwóch bystrych odcinkach żwirowych o spadkach około dwukrotnie większych.



Rys. 5. Dystrybuanty uziarnienia opancerzenia dna potoku Krzywiczanka

Dla obliczenia parametrów koryta potoku Krzywiczanka posłużono się danymi z badań terenowych (uziarnienie żwiru dna potoku) oraz danymi z map (powierzchnia zlewni, wysokości, spadki) według metodyki opisanej w Załączniku 2. Następnie skonfrontowano obliczenia z pomiarami terenowymi, które obejmowały wykonanie kilku przekrojów poprzecznych umieszczonych na istniejących koronach bystrzy oraz na pomierzeniu odległości pomiędzy nimi. Pierwszy rozpatrywany przekrój wyznaczono powyżej mostu drogowego, ponieważ na odcinku pod mostem drogowym jest tylko jedno bystrze zaczynające się powyżej mostu i kończące poniżej niego w dawnym płosie rzeki Raby.

Określono jednostkową moc strumienia  $\omega$  w tych przekrojach oraz przepływy pełnokorytowe (na podstawie wzorów empirycznych Chezy'ego – Manninga, Załącznik 4). Okazało się, że nie odpowiadają one zazwyczaj zakładanym przepływowi  $Q_{67\%}$ , lecz są większe od wody dwuletniej  $Q_{50\%}$  i trzykrotnie mniejsze od wody dziesięcioletniej  $Q_{10\%}$  obliczonych wzorem Punzeta (Załącznik 3). Obliczenia powtórzono więc dla uśrednionego przepływu pełnokorytowego i takie umieszczono w poniższej tabeli. W jednym z przekrojów (0+420) powstała wątpliwość co należy uznać za przekrój pełnokorytowy: czy koryta oryginalnego (naturalnego potoku), czy przekroju przekształconego przez jednostronne zasypianie terasy zalewowej nasypem ścieżki rowerowej. Obliczenia dokonano dla obydwu przypadków, ale dla ustalenia średniego przepływu pełnokorytowego wzięto pod uwagę tylko przekrój oryginalny.

Pomierzone uziarnienie warstwy opancerzenia dna na bystrzach także uśredniono dla celów analizy. Empiryczne i teoretyczne rozkłady uziarnienia w poszczególnych przekrojach wrysowane są na siatce lognormalnej Weibulla na Rys. 5.

Obliczeń dokonano zakładając typ III pokrycia otoczenia koryta drzewami i krzakami, czyli zarośla na 5 do 50% długości jego brzegów oraz najmniejszą ilość wlezonego rumowiska  $Q_s = 0,001 \text{ kg s}^{-1}$ , gdyż dostawa rumowiska ze zlewni jest odcięta zapora przeciwrumowiskową. Odbywa się też systematyczne usuwanie żwiru z odcinka przy moście w przysiółku Mizerówka w ramach tak zwanego „odżwirowania potoku” wchodzącego w skład prac utrzymaniowych RZGW. Oprócz danych i wyników obliczeń równaniami Hey'a – Thorne'a w tabeli umieszczono wyniki obliczeń wielkości przepływu brzegowego, prędkości średniej wody brzegowej i jednostkowej mocy strumienia dla zebranych danych terenowych.

Dane do obliczeń i wymiary przekroju na bystrzu:	Zastosowane dane i wyniki obliczeń równań Hey – Thorne'a		Dane terenowe i wyniki obliczeń przepływu, prędkości i jednostkowej mocy strumienia brzegowego dla przekroi:				
			0+980 Nad mostem drewnianym	0+650 Bród przy skrzyżowaniu na Górzany	0+420 Ostanie bystrze w Górzanach		0+180 Pierwsze bystrze w Drużdzałach
					Oryginalne	Zawężone	
Przepływ brzegowy $Q$ [m <sup>3</sup> /sek]	5,70		5,45	5,97	5,91	16,00	5,47
Mediana rozkładu uziarnienia w warstwie opancerzenia dna $D_{50}$ [m]	0,026		0,030	0,019	0,032		0,022
84 percentyl rozkładu uziarnienia w warstwie opancerzenia dna $D_{84}$ [m]	0,050		0,046	0,042	0,060		0,050
Szerokość wody brzegowej $RW$		6,74	6,00	8,50	6,10	8,90	6,50
Głębokość średnia bystrza $Rd$		0,58	0,68	0,58	0,73	1,06	0,64
Głębokość maksymalna $Rd_m$		0,92	0,90	0,70	1,00	1,70	0,95
Spadek $S$		0,0092	0,0085	0,0080	0,0080		0,0085
Odległość koron bystrzy $z$ [m]		41,1	(Jedno bystrze od 0+980 do 0+930)	Na odcinku 0+650 do 0+420: 37, 42, 50, 51, 50,			0+000 do 0+180: 40, 34, 40, 36, 30
Prędkość średnia wody brzegowej $V$ [m s <sup>-1</sup> ]		-	1,34	1,21	1,32	1,70	1,32
Jednostkowa moc strumienia $\omega$ $W$ [m <sup>2</sup> ]		76	76	55	76	141	70

## 6. WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z ANALIZY



Przepływ pełnokorytowy potoku Krzywiczanka jest większy od przepływu  $Q_{50\%}$  obliczonego wzorami Punzeta, co można być może tłumaczyć niedoszacowaniem wynikającym z zastosowania tego wzoru. Może też wynikać z faktu, że korytło potoku tworzyło się tu poprzez zarastanie znacznie szerszej odciętej odnogi koryta rzeki Raby i proces ten ciągle jeszcze ma miejsce. Uziarnienie dna na bystrzach pozwalające na większy spadek doliny i wody brzegowej może także wynikać z faktu, że potok płynie starym korytem Raby. Stwierdzenie tego „przewymiarowania” i „nadmiernego opancerzenia” naturalnego koryta stanowi zabezpieczenie przed destrukcyjnym działaniem nieprzewidzianie większych przepływów mogących płynąć tym korytem w przyszłości. **Oprócz wód potoku pochodzących z uwzględnionej w niniejszym opracowaniu zlewni mogło się w przeszłości zdarzać, że do wydzielonej części jego doliny przedostawały się rozlewające się w terasie zalewowej rzeki Raby wody większych wezbrań kształtując korytło bardziej pojemne i bardziej opancerzone.** Jeśli tak rzeczywiście było, to zachowanie istniejącego naturalnego koryta realizuje cel adekwatności do istniejących uwarunkowań ponad aspekt wycinkowej realizacji inżynierskich oszacowań.

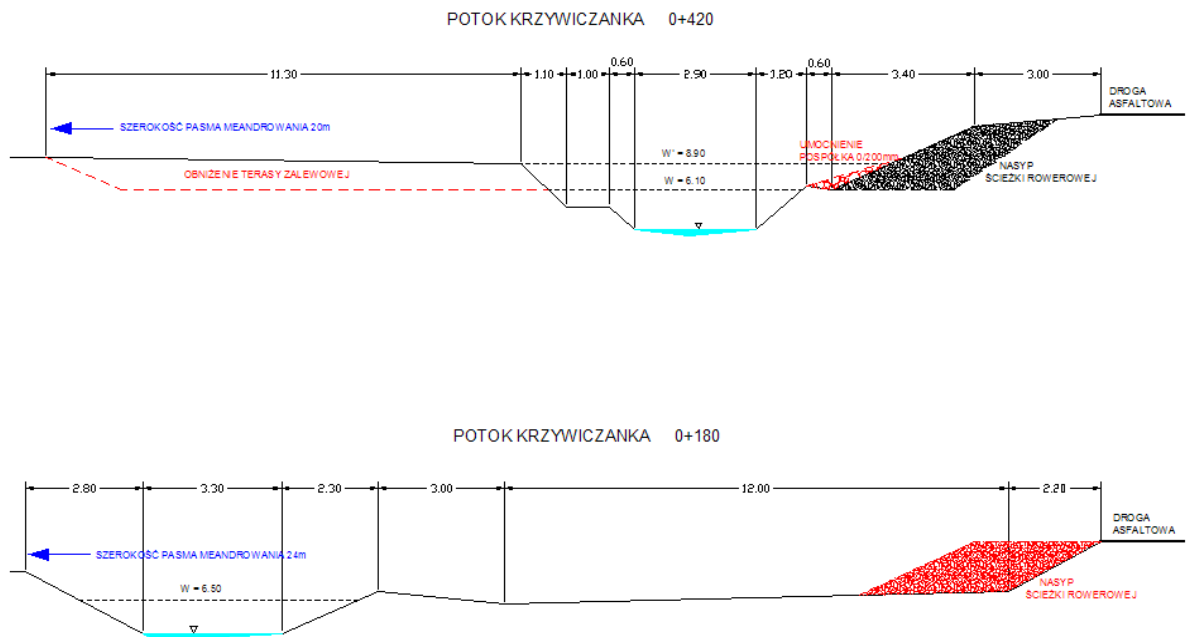
Dane terenowe odpowiadają dość ściśle obliczonym parametrom koryta i są zgodne pomiędzy sobą. Jest to być może wynikiem celowego wyboru przekrojów na koronach bystrzy sugerowanego w literaturze (Bojarski i in. 2005) oraz wydzielenia z analizy strefy starorzeczy o charakterze rozległych i wydłużonych stawów.

Z analizy wynika, że zawężony nasypem drogowym przekrój (0+420) będzie w stanie przeprowadzić dziesięcioletnią wodę potoku poniżej niwelety drogi, ale wtedy jednostkowa moc strumienia będzie w nim dwukrotnie większa niż w sąsiadujących przekrojach. Także średnia prędkość przepływu brzegowego będzie wtedy wyższa niż w sąsiednich przekrojach. Może to w przypadku dużych wezbrań potoku prowadzić do erozji nasypu ścieżki rowerowej. Fakt, że obliczona głębokość i głębokość maksymalna wody brzegowej na bystrzu są mniejsze od pomierzonych w tym przekroju dowodzi, że proces wcinania się koryta spowodowany jego zawężeniem ma już teraz miejsce, a więc rejon ten wymagać będzie ingerencji inżynierskiej. W pozostałych przekrojach takiej potrzeby nie widać.

Potok należy sklasyfikować na podstawie jednostkowej mocy strumienia wody brzegowej (55 do 76 W m<sup>-2</sup>) jako „*ciek żwirowy o dużej energii strumienia, zachowujący równowagę w przypadku ograniczonej dostawy rumowiska i o adekwatnym uziarnieniu bystrzy i plos*” (Załącznik 1). Przy pomierzonym uziarnieniu dna potoku pozwalającym na większe spadki koryta niż spotykane w rzeczywistości jest to podstawa do potwierdzenia stanu równowagi koryta ciek. Jest też celowe zachowanie podobnej wielkości mocy strumienia przy rozpatrywaniu innych zabiegów inżynierskich na tym odcinku. Można też wnioskować na podstawie stosunkowo grubego opancerzenia dna, że w przyszłości nie należy usuwać żwiru z potoku, a nawet uzupełniać jego ilości dla zachowania procesów korytowych.

## **7. ZALECENIA DOTYCZĄCE ZAKRESU INGERENCJI INŻYNIERSKIEJ**

Zawężony przekrój w km 0+420 prawdopodobnie był taki w pewnym stopniu także przed uformowaniem niekontrolowanego nasypu ścieżki rowerowej. **Poprowadzenie w przeszłości drogi wzdłuż nieregularnie ukształtowanego skraju doliny zmniejszyło terasę zalewową w tym miejscu do około dwóch szerokości koryta potoku.** Ostatnie roboty zajęły jednostronnie całość terasy przy nasypie drogowym. W ten sposób głębokość przekroju brzegowego potoku zwiększyła się o około 0,6m, co wynika z różnicy poziomów lewej i prawej terasy zalewowej (Rys. 6). Można rozważyć pięć wariantów ingerencji inżynierskiej w tym miejscu:



Rys. 6. Szkic przykładowych przekrojów drogi i potoku Krzywiczanka z zaznaczeniem koniecznych modyfikacji zachowujących szerokość pasma meandrowania potoku o trzy- do czterokrotnej szerokości wody brzegowej

- Umocnienie skarpy nasypu materiałem żwirowym o uziarnieniu odpowiadającym opancerzeniu dna potoku,
- Obniżenie przeciwległej terasy zalewowej o 0,6 m w pasie o szerokości około 20 m wzdłuż brzegu potoku,
- Lokalne poszerzenie koryta potoku o około 50% , dla zmniejszenia mocy strumienia w przekroju,
- Lokalne obniżenie ścieżki rowerowej do poziomu dawnej terasy zalewowej,
- Odsunięcie koryta potoku od ścieżki rowerowej na odległość do 20 m i urządzenie terasy zalewowej pomiędzy potokiem a ścieżką.

Najbardziej efektywne pod względem ekonomicznym i najmniej uciążliwe pod względem środowiskowym byłoby łączne zastosowanie częściowe dwóch pierwszych wariantów, czyli obniżenie terasy zalewowej na szerokości około 10 m i umocnienie skarp nasypu ścieżki rowerowej. Zabieg ten będzie potrzebny na długości około 60 m.

Ponadto może się okazać, że będą potrzebne korekty przebiegu trasy potoku w rejonie remontowanego mostu drogowego. Takie korekty powinny być dokonane poprzez uformowanie koryta i uzupełnienie żwiru dna i skarp nowego koryta materiałem o uziarnieniu odpowiadającym uziarnieniu opancerzenia dna potoku. Tradycyjna regulacja potoku w tym rejonie nie powinna mieć miejsca. Rozpiętość przęsła mostu (16 m) pozwala na przeprowadzenie przez światło mostu koryta potoku i dwóch brzegowych półek terenowych o wystarczającej szerokości.



## 8. WNIOSKI

Jak widać z omawianego przykładu, zamiast regulacji potoku na długości około kilometra można nieznaczными robotami ziemnymi na długości nie przekraczającej około 100m przy użyciu odpowiednich materiałów uzyskać zapewnienie nieuciążliwego sąsiedztwa potoku i drogi. Taka nieznaczna ingerencja łatwa jest do rekultywacji w przypadku niewielkiego zniszczenia pokrycia roślinnego. Pozostała część potoku (Rys. 7) może być zachowana wraz z całym otoczeniem, a dzięki dokonaniu analizy na podstawie równań równowagi Hey – Thorne’a można udokumentować adekwatność istniejącego ukształtowania doliny dla przeprowadzenia wezbranych wód potoku.

**Za pomocą równań Hey’a – Thorne’a projektant jest w stanie przeanalizować przebieg naturalnych lub regulowanych rzek żwirowatych takich jak Raba, Skawa czy Dunajec, ich dopływów wielkości Rogoźnika, Piekelnika czy Kamienicy oraz mniejszych potoków, o zlewni powyżej około 5 km<sup>2</sup> i o spadku doliny poniżej 2,2%. **Dopasowując rozwiązania drogowo-mostowe do naturalnego przebiegu rzek i potoków można nie tylko zachować wartość środowiska przyrodniczego dolin rzecznych, ale także zmniejszyć ryzyko powodzi i zaoszczędzić kosztu zbędnych zabezpieczeń przeciwerozynnych.****



*Rys. 7. Potok Krzywiczanka – przejście z plosa w bystrze powyżej mostu drogowego*

## ZAŁĄCZNIK 1

### Klasyfikacja cieków na podstawie jednostkowej mocy strumienia (Bojarski i in. 2005)

Stosunkowo łatwym do ustalenia parametrem określającym tempo wydatkowania energii cieków na jednostkowej powierzchni dna przy określonym przepływie jest jednostkowa moc strumienia (unit stream power), obliczana następującym wzorem:

$$\omega = (\gamma_w g Q S)/w \quad [\text{W m}^{-2}], \text{ czyli}$$

$$\omega = (9810 Q S)/w \quad [\text{W m}^{-2}]$$

gdzie:

- $\omega$  – jednostkowa moc strumienia w Watach na metr kwadratowy,
- $\gamma_w$  – gęstość wody w  $\text{kg m}^{-3}$ ,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie w  $\text{m s}^{-2}$ ,
- $Q$  – przepływ wody w  $\text{m}^3 \text{sek}^{-1}$ ,
- $S$  – spadek cieków w liczbach bezwzględnych,
- $w$  – szerokość cieków w m przy napełnieniu przepływem  $Q$ .

Przy wzrastającym napełnieniu przekroju zwiększającym się przepływem  $Q$  jednostkowa moc strumienia  $\omega$  wzrasta. Funkcja ta dobrze opisuje sytuację, kiedy od momentu zatopienia brzegów cieków dalszy wzrost przepływu powoduje stosunkowo niewielki przyrost jednostkowej mocy strumienia w strefie korytowej o małym wpływie na kształtowanie koryta. Analiza stabilnych w pionie rzek naturalnych z różnych obszarów świata wskazała, że dla zdecydowanej większości z nich prawdopodobieństwo wystąpienia przepływu pełnokorytowego mieściło się w przedziale  $50\% < p < 80\%$ , z wartością modalną  $p=67\%$  (woda półtoraroczna). Koryta o skalnym lub silnie umocnionym dnie mogą mieć pojemność odbiegającą od tych wartości.

Biorąc powyższe pod uwagę można łatwo przyjąć, obliczyć i pomierzyć parametry mogące służyć ocenie koryt naturalnych i uregulowanych - na przykład w przekrojach kontrolnych umiejscowionych na koronach bystrzy. W poniższej tabeli zestawiono przedziały jednostkowej mocy strumienia przepływu pełnokorytowego, charakterystyczne dla różnych rodzajów cieków:

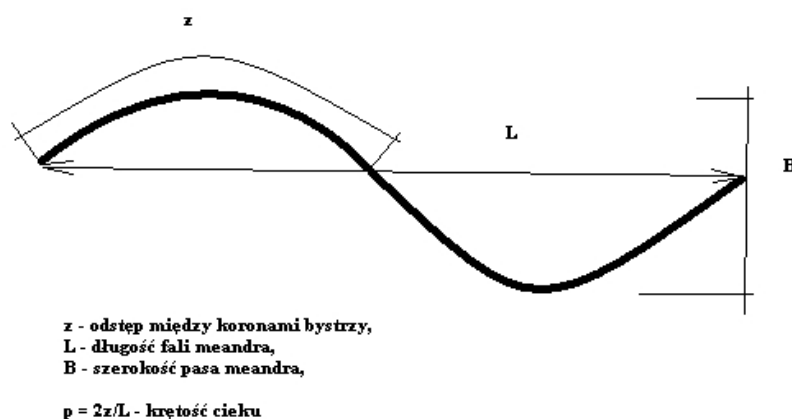
Jednostkowa moc strumienia przy przepływie pełnokorytowym (dla cieków naturalnych najczęściej przepływ $Q_{67\%}$ )	Charakter cieków
$\leq 10 \text{ W m}^{-2}$	Ciek piaszczysty o małej mocy strumienia
$10 \div 35 \text{ W m}^{-2}$	Ciek żwirowy, niskoenergetyczny, stabilny. Wykazuje tendencję do formowania koryta o małym zróżnicowaniu morfologii oraz siedlisk organizmów
$35 \div 100 \text{ W m}^{-2}$	Ciek żwirowy o dużej energii strumienia, zachowujący równowagę w przypadku ograniczonej dostawy rumowiska i adekwatnym uziarnieniu bystrzy i pios
$100 \div 300 \text{ W m}^{-2}$	Ciek żwirowy lub kamienisty o bardzo dużej energii strumienia i korycie stabilnym tylko w przypadku niezaburzonej dostawy rumowiska z brzegów lub dopływów
$\geq 300 \text{ W m}^{-2}$	Ciek kamienisty, przy zewnętrznych ograniczeniach koryta i doliny niestabilny i wykazujący tendencję do transformacji w koryto skalne



## ZAŁĄCZNIK 2

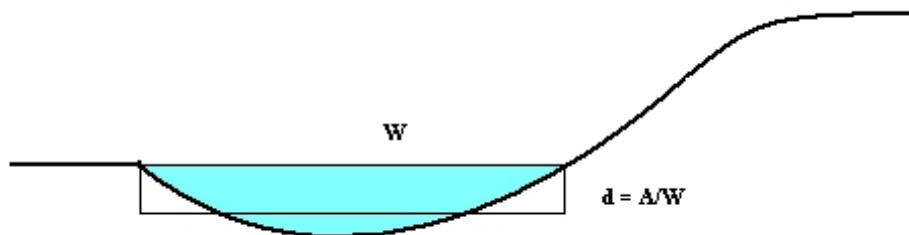
### Równania Hey & Thorne równowagi stabilnych naturalnych koryt żwirowych (Thorne i in. 1997)

Rzeki żwirowe posiadają dziewięć stopni swobody, jako że potrafią dostosować swe średnie szerokości zwierciadła wody brzegowej (**W**), głębokości (**d**), maksymalnej głębokości (**d<sub>m</sub>**), wysokości ( $\Delta$ ) i długości fali ( $\lambda$ ) form korytowych, spadku (**S**), prędkości (**V**), krętości (**p**) i długości łuku meandra (odległość pomiędzy koronami bystrzy) (**z**) poprzez erozję i depozycję. Dla odcinków rzek, które nie ulegają systematycznym zmianom przez okres kilku lat wielkości te mogą być uważane za zmienne zależne. Ponadto rumowisko dostarczane z dorzecza jest przenoszone wtedy w rozpatrywanym odcinku bez przeważającej erozji czy depozycji.



Zmienne niezależne odpowiedzialne za stałe wielkości wymiarów rzeki to przepływ (**Q**), ilość wlezonego rumowiska (**Q<sub>s</sub>**), rozmiar (uziarnienie) wlezonego rumowiska (**D**), materiał brzegu rzeki, zarośla i zadrzewienia brzegów oraz spadek doliny (**S<sub>v</sub>**). Zmiana któregośkolwiek z powyższych zewnętrznych czynników będzie skutkowałą zmianą geometrii koryta rzeki, która w końcu ukształtuje się w równowadze z tym zmienionym czynnikiem. Jeśli zmienne niezależne pozostaną po zasadniczej zmianie ponownie ustalone, to nowy kształt koryta rzeki będzie zdefiniowany przez ten nowy zestaw zmiennych niezależnych.

W warunkach równowagi zmienne niezależne są stałe. Wyjątkiem są funkcje opisujące przepływ i ilość wlezonego rumowiska, które są znacząco zmienne w czasie. Istnieje powszechne przekonanie poparte wielką ilością przykładów i dowodów, że przepływ pełnokorytowy (brzegowy) jest w znacznej mierze odpowiedzialny za transport rumowiska wlezonego, a więc za uformowanie koryta. W równaniach równowagi mierzy się szerokość koryta jako szerokość lustra wody brzegowej (**W**), a średnią głębokość koryta (**d**) jako iloraz powierzchni przekroju koryta (**A**) przez szerokość lustra wody (patrz szkic poniżej).



Spośród wielu zależności opisujących parametry stabilnych koryt żwirowych tylko równania Hey & Thorne pozwalają na uwzględnienie różnych wielkości transportu rumowiska. Jakkolwiek wielkość ta ma znikomy wpływ na wymiary geometryczne koryta, to jednak z zależności pomiędzy wielkością transportu rumowiska a uziarnieniem dna koryta można wyciągnąć wiele istotnych wniosków.

W równaniach tych średnia głębokość, maksymalna głębokość i średnia szerokość mierzone są w czterech charakterystycznych przekrojach (bystrze – płoś – bystrze – płoś) na całej długości meandru.

W poniższej tabeli podano zestaw danych do równań z zakresem ich stosowalności:

Parametr:	Symbol:	Zakres stosowalności:	Jednostka:
Przepływ pełnokorytowy	<b>Q</b> (zazwyczaj $Q_{67\%}$ )	3,9 ÷ 424	$m^3 s^{-1}$
Całkowita ilość wlezonego rumowiska przy przepływie pełnokorytowym <sup>4</sup>	<b>Q<sub>s</sub></b>	0,001 ÷ 14,14	$kg s^{-1}$
Mediana rozkładu uziarnienia materiału dna	<b>D<sub>50</sub></b>	0,014 ÷ 0,176	m
Materiał brzegu	złożony, drobny piasek pylasty, pył i glina ponad warstwą żwiru		
Formy korytowe	płaskie		
Zarośla brzegowe:	Typ I – 0% drzew i krzewów, Typ II – 1 ÷ 5% drzew i krzewów, Typ III – 5 ÷ 50% drzew i krzewów, Typ IV > 50% drzew i krzewów.		
Spadek doliny	<b>S<sub>v</sub></b>	0,00166 ÷ 0,0219	
Kształt koryta	prosty lub meandrujący		
Kształt profilu dna	bystrza i płoś		

Określenia przepływu pełnokorytowego można dokonać w dwojaki sposób:

- poprzez obliczenie rzeczywistego przepływu przez przekrój brzegowy zlokalizowany na koronie bystrza przyjmując spadek wody brzegowej **S** i szorstkość dna odpowiadającą uziarnieniu dna koryta, patrz Załącznik 4,
- poprzez określenie przepływu o prawdopodobieństwie występowania 67% (woda półtoraroczna) na podstawie danych z IMGW lub na podstawie obliczeń z wzorów empirycznych opartych o powierzchnię zlewni, jej właściwości i rozkłady opadów.

Określenie z góry danych wejściowych dotyczących wielkości transportu rumowiska może być dokonane tylko w przypadku posiadania takowych z literatury lub

<sup>4</sup> Tak jak zdefiniowane w publikacji: Parker G., Klingeman P.C. i McClean D.G. 1982. Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, **108**(HY4), 544-571.



wydedukowanych z okoliczności dotyczących rozpatrywanego cieku. Na przykład wartości minimalne mogą być przyjmowane dla odcinków rzek poniżej i w pobliżu zapór. Jest jednak możliwe oszacowanie wielkości transportu rumowiska poprzez wyliczenie tej wielkości w równaniu równowagi spadku wody brzegowej dla zadanych pozostałych wartości, głównie średnic materiału dna  $D_{50}$  i  $D_{84}$ . Ogólnie, malejąca dostawa rumowiska prowadzi do zwiększenia średnicy  $D_{84}$  w równaniu dla zachowania danego spadku, co może stanowić wskazówkę w inżynierskich zastosowaniach równań.

Dla określenia mediany rozkładu uziarnienia obrukowania dna należy określić rozkład lognormalny średnic ziarn żwiru i kamieni na podstawie próbki zbieranej systematycznie według normy ISO 9195:1992(E) jak dla próbki zbieranej ilościowej (grid by number sample). Praktycznie wykonuje się to w następujący sposób:

1. w terenie ustanawia się siatkę kwadratów o boku od 0,1 do 1,0m, na przykład poprzez ułożenie taśmy mierniczej kilkakrotnie na równoległych liniach odległych od siebie o wielkość przyjętego modułu starając się, aby mierzony materiał odpowiadał materiałowi dna koryta (przybrzeżne plaże kamieniste przy niskich stanach wód),
2. dla ziarn lub kamieni znajdujących się bezpośrednio pod węzłami siatki określa się średnicę poprzez pomiarzenie linijką lub przymiarem metrowym wymiaru „b” (a = długość, b = szerokość, c = wysokość ziarna lub kamienia),
3. pomierzone średnice (w ilości około 100 i więcej) grupuje się w ciąg rosnący i notuje jako procentową ilość pomiarów mniejszych niż 0,001, 0,002, 0,004, 0,008, 0,016, 0,032, 0,064, 0,132, 0,264, 0,528m itp., a następnie nanosi na papier lognormalny Weibull'a (dostępny pod adresem <http://www.weibull.com>). Pomiędzy punkty wkreśla się najbardziej do nich dopasowaną prostą, reprezentującą teoretyczną dystrybuantę średnic, dla której można odczytać medianę rozkładu uziarnienia warstwy obrukowania dna  $D_{50}$  dla prawdopodobieństwa 50% oraz 84 percentyl rozkładu uziarnienia  $D_{84}$  dla prawdopodobieństwa 84%.

Równania opisujące wymiary koryta zestawiono w poniższej tabeli:

Wymiar koryta:	Równanie:		Jednostka:
Szerokość lustra wody brzegowej (średnio na odcinku):	$W = 4,33Q^{0,5}$	Typ I	m
	$W = 3,33Q^{0,5}$	Typ II	m
	$W = 2,73Q^{0,5}$	Typ III	m
	$W = 2,34Q^{0,5}$	Typ IV	m
Głębokość pełnokorytowa (średnio na odcinku):	$d = 0,22Q^{0,37}D_{50}^{-0,11}$		m
Spadek wody brzegowej	$S = 0,087Q^{-0,43}D_{50}^{-0,09}D_{84}^{0,84}Q_s^{0,10}$		-
Maksymalna głębokość wody brzegowej:	$d_m = 0,20Q^{0,36}D_{50}^{-0,56}D_{84}^{0,35}$		m
Długość łuku meandra	$z = 6,31 W$		m
Krętość cieku:	$p = S_v/S$		-
Szerokość lustra wody brzegowej bystrza:	$RW = 1,034 W$		m
Głębokość wody brzegowej bystrza:	$Rd = 0,951 d$		m
Maksymalna głębokość wody brzegowej bystrza:	$Rd_m = 0,912 d_m$		m
Szerokość lustra wody brzegowej plosa:	$PW = 0,966 W$		m
Głębokość wody brzegowej plosa:	$Pd = 1,049 d$		m

Maksymalna głębokość wody brzegowej plosa:	$Pd_m = 1,088 d_m$	m
--	--------------------	---

$D_{84}$  –84 percentyl rozkładu lognormalnego obrukowania dna (próbka zbierana ilościowa, grid by number sample ISO 9195:1992(E)).

### ZAŁĄCZNIK 3

#### Obliczenia przepływów maksymalnych na podstawie wzorów empirycznych Punzeta (Ratomski 2000)

Dla potoku Krzywiczanka obliczono przepływy maksymalne z prawdopodobieństwem 0,1, 1, 10, 50 i 67% w dwóch przekrojach: przyujściowym i w przekroju uregulowanym 100m poniżej mostu drogowego w przysiółku Krzywica. Zastosowano wzory Punzeta zaczerpnięte z Ratomskiego (2000), dane pochodzące z map zlewni 1:10000 i 1:5000, oraz ze stron internetowych. Zestaw danych oraz wyników obliczeń zamieszczono w tabeli.

Zmienne zależne i niezależne	Jedn.	Parametry dotyczące przekroju 100m poniżej mostu drogowego w Mizerówce	Parametry dotyczące przekroju przyujściowego potoku Krzywiczanka	
Powierzchnia zlewni A:	km <sup>2</sup>	6,175	6,809	
Średni roczny opad P:	mm	854	854	
Najwyżej położone źródło $W_{zr}$ :	m npm	830	830	
Wysokość przekroju $W_p$ :	m npm	319	314	
Średnie wzniesienie zlewni $H=0,5(W_{zr} + W_p)$ :	m npm	575	572	
Różnica wysokości zlewni $\Delta W=0,001(W_{zr} - W_p)$ :	km	0,511	0,516	
Długość ciekę L:	km	8,1	9,4	
Wskaźnik nieprzepuszczalności gleb (Tablica 3.10 Ratomski 2000, dla gleb gliniastych ze skał osadowych)	%	90	90	
Spadek średni zlewni $J=1000(\Delta H/L)$	‰	63	55	
Parametr kształtu zlewni $C_v^{max} = (3,027 \Delta W^{0,173}) / (A^{0,102} L^{0,066})$	km <sup>-2</sup>	1,95	1,91	
Przepływ maksymalny dwuletni (zlewnia górską) $Q_{50\%} = (0,002787 * A^{0,747} * P^{0,536} * N^{0,603}) / J^{0,075}$	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	4,418	4,803	
Przepływy maksymalne o prawdopodobieństwie innym niż 50%, $Q_{p\%} = Q_{50\%} * \phi_{p\%}$ , ( $\phi_{p\%}$ z Tablicy 3.8 Ratomski 2000, dla $C_v^{max}$ i odpowiedniego p%)				
$Q_{67\%}$ (oszacowanie)	$\phi_{67\%} = 0,90$ (oszacowanie)	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	3,976	4,323
$Q_{10\%}$	$\phi_{10\%} = 4,00; 3,93$	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	17,672	18,877
$Q_{1\%}$	$\phi_{1\%} = 8,88; 8,67$	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	39,232	41,645
$Q_{0,1\%}$	$\phi_{0,1\%} = 13,73; 13,36$	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	60,659	64,173

### ZAŁĄCZNIK 4

## **Obliczenia przepływów pełnokorytowych na podstawie wzorów empirycznych Chezy'ego – Manninga (Ratomski 2000)**

Prędkość średnią w przekroju określić można z wzoru Chezy'ego – Manninga:

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$$

Gdzie:

*n* – współczynnik szorstkości, np. według Ven Te Chowa (Tablica 3.21 Ratomski 2000), przyjęto *n* = 0,050 dla krętego koryta o dnie żwirowym z kamieniami.

*R* – promień hydrauliczny, iloczyn powierzchni przekroju przez obwód zwilżony w m,

*S* – spadek wody brzegowej.

Przepływ pełnokorytowy jest iloczynem średniej prędkości i powierzchni przekroju.

### **LITERATURA**

Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J.: Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich, Warszawa 2005

Jeleński J.: Droga i jej odwodnienie jako trwałe uszkodzenie doliny i łożyska ciek. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne Nr 62 (Zeszyt 112) (115-135) Kraków 2004

Mokwa M., Wiśniewolski W.: Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008

Petts G., Calow P.: River Restoration. Blackwell, Oxford 1996

Ratomski J.: Podstawy projektowania zabudowy potoków górskich. Politechnika Krakowska, Kraków, 2000.

Thorne C. R., Hey R. D., Newson M. D.: Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management. Wiley, Chichester 1997

Wyżga B.: Regulacja koryt karpackich dopływów Wisły – ocena ocena działań inżynierskich w świetle wiedzy geomorfologicznej i sedymentologicznej. Czasopismo Geograficzne, 72(1): 23-52. 2001

Wyżga B.: Gruby rumosz drzewny: depozycja w rzece górskiej, postrzeżenie i wykorzystanie do rewitalizacji cieków górskich. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków 2007

### **STRESZCZENIE**

Nie korzystając z odpowiedniego aparatu matematycznego do opisu naturalnych cieków projektanci drogowi zamieniają je w sąsiedztwie dróg na rowy i kanały chcąc mieć pewność, że zjawiska w nich występujące nie będą zagrażać budowli drogowej. Jednak w ten sposób budowa drogi przyczynia się do trwałego uszkodzenia cieków wraz z ich przyrodniczym otoczeniem, ciągłością i charakterystycznym materiałem koryta.



Równania równowagi naturalnych cieków żwirowych Hey'a – Thorne'a pozwalają opisać parametry meandrującego lub prostego koryta o żwirowym dnie uwzględniając zadrzewienie brzegów, uziarnienie materiału podłoża, natężenie transportu dennego oraz zmienną szerokość i głębokość cieku dla rozpatrywanej zlewni i spadku doliny. W oparciu o te równania można przebiegający w sąsiedztwie drogi lub przecinający drogę ciek pozostawić bez ingerencji inżynierskiej lub przewidzieć takie ukształtowanie modernizowanego koryta, przy którym ciek będzie pozostawać w stanie równowagi dynamicznej, stanowiąc kontynuację naturalnego cieku z zachowaniem ciągłości jego przebiegu i cech morfologicznych. Dla wykazania przydatności przytoczonej metodologii pomierzono parametry niewielkiego cieku żwirowego i przeprowadzono przykładowe obliczenia. Metodologia przygotowania danych wejściowych do równań równowagi podana jest w załącznikach do referatu.

## **SUMMARY**

Not using an appropriate mathematical apparatus to delineate natural channels, road designers change them in vicinity of roads into ditches and canals in objective to be sure, that phenomena in them would not affect road structure. However, in this way road construction contributes to permanent destruction of channels, together with their natural surroundings, continuity and characteristic bed material.

Hey and Thorne regime equations of natural gravel bed rivers enable to determine parameters of meandering or straight channel taking into account bank vegetation, gravel bed size distribution, differences in sediments discharge, local variation in width and depth of channel for given catchment and valley slope. Based on the equations results the river flowing along or crossing the road can be left intact without engineering intervention or one can predict such a shape of modernized channel, in which the river will be in regime, continuing the existing natural channel with its geometry and morphological features. To show how useful is an application of referenced methodology a small gravel-bed creek parameters have been measured and example of regime equation calculated. Methods of database preparation for regime equations are given in enclosures to the paper.

## **ZUSAMMENSETZUNG**

.....

## **SŁOWA KLUCZOWE**

Ochrona środowiska, naturalny ciek żwirowy, równania równowagi koryt żwirowych  
Nature conservation, natural gravel-bed river, gravel-bed rivers regime equations