



Często drogi trasowane są w dnach dolin wzdłuż potoków i rzek, gdzie przecinają liczne dopływy, a często także główny ciek. Tak w postaci przepustów i mostów wprowadzają sztuczne przeszkody w dotąd nieskrępowany system rzeczny.

Tam, gdzie spadki koryt są niewielkie, a w związku z tym cieki posiadają niewielką jednostkową moc strumienia, co odzwierciedlone jest obecnością piaszczystego lub mulistego dna cieku (klasyfikacja cieków na podstawie jednostkowej mocy strumienia według: Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., „Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich”, Warszawa 2005 r.), zabudowa koryt lub przekształcanie istniejących koryt w planie nie musi zaburzać równowagi cieków.

Natomiast tam, gdzie występują potoki o skalnym, kamienistym i żwirowym dnie, a doliny bywają wąskie i ciasno zabudowane, istnieje tendencja do uproszczania i ustabilizowania przebiegu 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 w celu uniknięcia lub uproszczenia przejść drogowo-mostowych. Z drugiej strony od zarządów wodnych i zarządów melioracji pojawiają się naciski na regulowanie cieków w sąsiedztwie dróg, mostów i przepustów. Argumentowane jest to koniecznością tradycyjnego zabezpieczenia przeciwpowodziowego i przeciwerozyjnego drogi i jej sąsiedztwa.

Projekty regulacyjne polegają na zmianie profilu i przekroju cieku 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 poprzez likwidację naturalnego opancerzenia dna w okresie późniejszym zakłóca równowagę dynamiki

Równania równowagi cieków żwirowodennych

Utworzono: czwartek, 20, listopad 2008 12:38 Józef Jeleński

transportu wleczonego rumowiska. W konsekwencji zwiększonej erozji dennej przy umocnionych brzegach koryta, rzeka wciną się w dno doliny osuszając warstwę wodonośną w aluwiach doliny. Ponadto koryto przenosi wtedy przepływy o większej energii niż uprzednie przekroje rzeki nieuregulowanej oraz większe niż stosowane przez projektanta do obliczenia kanału regulacyjnego. Wywołuje to konieczność prowadzenia stale remontów, a także skłania projektantów do stosowania 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, powoduje, że w takich ciekach nie ma warunków do bytowania organizmów roślinnych i zwierzęcych. Wyłącza to znaczne obszary wód z procesów przyrodniczych i przerywa łączność wód wzdłuż cieków oraz pomiędzy ciekami a terenami nadbrzeżnymi (rys. 1).



Nie brakuje przykładów zarówno dobrych, jak i niekorzystnych rozwiązań sąsiedztwa drogi i cieków. Można powiedzieć, że najlepszym sposobem ochrony naturalności cieków równoległych do drogi jest oddalenie ich od siebie na odpowiednią odległość. Przy przekraczaniu cieków przepust i most powinien mieścić nie tylko koryto cieków, ale także jak najszersze pasy nadbrzeżne, by zachować komunikację ludzi oraz zwierząt wodnych i lądowych. W wielu jednak przypadkach pojawia się 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 cieków. Z braku innych wskazówek można dla górskich potoków i rzek stosować regułę 3x20:

- minimum 20 m roślinnego pasa nadbrzeżnego,
- temperatura wody maksimum 20°C, co oznacza minimum 50% zacielenia 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 w celu zachowania naturalnego meandrowania cieków konieczne jest wprowadzanie pasa terenu szerokości od 3 do 5-krotnie przekraczającej szerokość

koryta rozpatrywanego ciek. W uzasadnieniu braku ingerencji w naturalny przebieg ciek bądź 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 ciek.

Dynamiczna równowaga ciek

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 żwirowe 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 ciek 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 ciek 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 ciek. W konsekwencji naruszenia równowagi objawy niepożądane mogą być obserwowane już po pierwszym wezbraniu nie tylko na przekształconym odcinku ciek, ale także na odcinkach daleko sięgających w górę i w dół ciek. 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 ciek kamieni i żwiru bywa stabilizowana seriami betonowych i kamiennych stopni. Zwiększona erozja wgłębna ciek 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.

Równania równowagi ciek 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 żwirodennych 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.

Równania równowagi stabilnych naturalnych koryt żwirowych (według: Thorne C. R., Hey R. D., Newson M. D., „Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management”. Wiley, Chichester 1997 r.) podają dane wyjściowe i pozwalają 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 ujednoliconego 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 wleczanego 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 w celu zwiększenia jego krętości i zastosowania sekwencji bystrze-płoso. 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 wleczanego, 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 płos 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 km². 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:

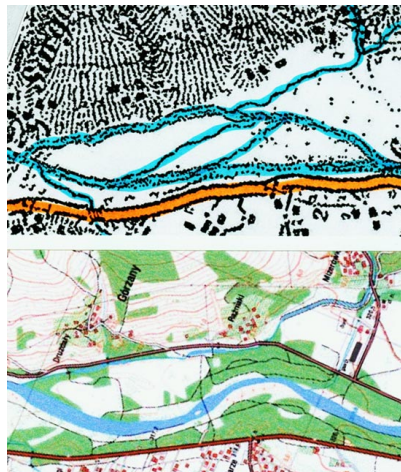
$$Z = \alpha W$$

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

Przykład zastosowania 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 miejscu wyciętych drzew przydrożnych. Ponieważ teren pomiędzy tą drogą a rzeką Rabą należy do obszaru Natura 2000, konieczna stała się analiza wpływu zajęcia części terenów zalewanych wodą 100-letniej 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 wstąpienia 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.



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. (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 łęgowa. Głębokie pola 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. Przyujściowy odcinek potoku nawadnia warstwy aluwii w dolinie Raby przyczyniając się do zwiększenia retencji dolinowej i korytowej oraz do zachowania niskiej temperatury wody w Rabie. Podobne starorzecza zasilane wodą dopływów zostały całkowicie wyeliminowane w dolinie Raby. Miejsca ostatnich takich starorzeczy zostały wykorzystane pod budowę dróg w rejonie Lubnia (lata 2006-2008), Stróży (2004-2006) i Myślenic (2002-2004).

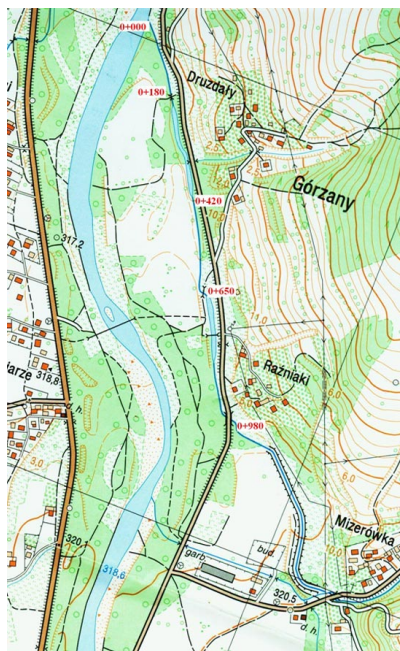


Potok Krzywiczanka jest ostatnim miejscem obfitującym w roślinność podwodną, skąd może się ona przenosić do koryta uregulowanej Raby. Występują tu dwa gatunki prawnie chronionych roślin (włosienicznik wodny i rzeczny - rys. 3), oraz 10 gatunków prawnie chronionych zwierząt (minóg strumieniowy, głowacz

Równania równowagi cieków żwirowych

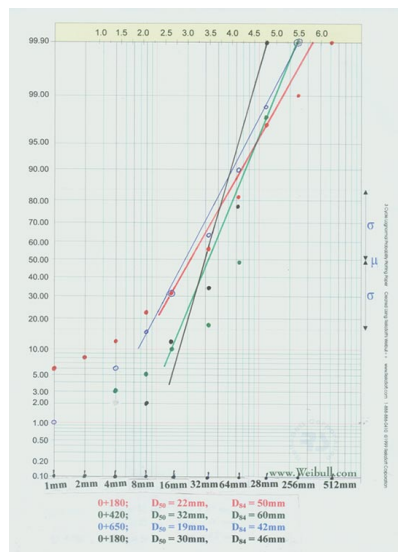
Utworzono: czwartek, 20, listopad 2008 12:38 Józef Jeleński

pręgopłetwy, śliz, piekielnica, rzesorek rzeczek, jeź, wydra, bóbr, zimorodek, czapla siwa). Nigdzie indziej szuwar jeżogłówkowy nie występuje tak obficie jak tutaj, z mocnymi skupiskami roślin ziemnowodnych będących siedliskiem kiełży (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.



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 plosa 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 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 bystrzych odcinkach żwirowych o spadkach około dwukrotnie większych.



W obliczeniach parametrów koryta potoku Krzywiczanka posłużono się danymi z badań terenowych (uziarnienie żwiru dna potoku) oraz danymi z map (powierzchnia zlewni, wysokości, spadki) stosując równania równowagi stabilnych naturalnych koryt żwirowennych (według: Thorne C. R., Hey R. D., Newson M. D., „Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management”. Wiley, Chichester 1997 r.). Następnie skonfrontowano obliczenia z pomiarami terenowymi, które obejmowały wykonanie kilku przekrojów poprzecznych umieszczonych na istniejących koronach bystrzy oraz na pomiarzeniu 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 plosie rzeki Raby.

Określono jednostkową moc strumienia ? w tych przekrojach oraz przepływy pełnokorytowe (obliczenia przepływów pełnokorytowych na podstawie wzorów empirycznych Chezy’ego–Manninga w: Ratomski J., „Podstawy projektowania zabudowy potoków górskich”, Politechnika Krakowska, Kraków, 2000 r.). 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 (obliczenia przepływów maksymalnych na podstawie wzorów empirycznych Punzeta w: Ratomski J., „Podstawy projektowania zabudowy potoków górskich”, Politechnika Krakowska, Kraków, 2000 r.). 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 w ustaleniu 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

Równania równowagi cieków żwirowennych

Utworzono: czwartek, 20, listopad 2008 12:38 Józef Jeleński

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 wleczonego rumowiska $Q_s=0,001 \text{ kg s}^{-1}$, gdyż dostawa rumowiska ze zlewni jest odcięta zaporą 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 równaniami Hey-Thorne’a	Dane terenowe i wyniki obliczeń przepływu, prędkości i jednostkowej mocy strumienia brzegowego dla przekrój:			
		0+380 Stacja wymiarowa dotychczas	0+420 Stacja wymiarowa na terenie	0+420 Stacja wymiarowa na terenie	0+180 Stacja wymiarowa dotychczas
Przepływ brzegowy Q [m^3/s]	5,70	5,45	5,97	5,91	5,47
Średnia szerokość otoczenia dna [m]	0,026	0,030	0,019	0,032	0,022
Średnia szerokość otoczenia dna [m]	0,050	0,046	0,042	0,060	0,050
Średnia szerokość otoczenia dna [m]	6,74	6,00	8,50	6,10	8,90
Średnia szerokość otoczenia dna [m]	0,58	0,68	0,58	0,73	0,64
Średnia szerokość otoczenia dna [m]	0,92	0,90	0,70	1,00	0,95
Średnia szerokość otoczenia dna [m]	0,0092	0,0085	0,0080	0,0080	0,0085
Prędkość średnia wody brzegowej V [m/s]	41,1	1,34	1,21	1,32	1,70
Prędkość średnia wody brzegowej V [m/s]	-	76	55	76	141
Prędkość średnia wody brzegowej V [m/s]	-	76	55	76	141

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 koryto 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 Raby wody większych wezbrań kształtując koryto 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 A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., „Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich”, Warszawa 2005 r.) 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

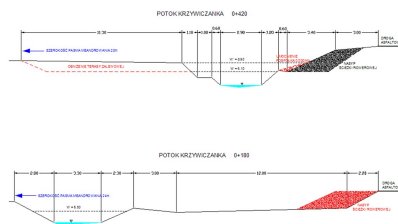
jednostkowa moc strumienia będzie w nim dwukrotnie większa niż w sąsiadujących przekrojach. Także średnia prędkość przepływu brzegowego będzie wtedy wyższa niż w sąsiednich przekrojach. Może to w przypadku dużych wezbrań potoku prowadzić do erozji nasypu ścieżki rowerowej. Fakt, że obliczona głębokość 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⁻²) jako „ciek żwirowodenny o dużej energii strumienia, zachowujący równowagę w przypadku ograniczonej dostawy rumowiska i o adekwatnym uziarnieniu bystrzy i plos” (według: Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., „Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich”, Warszawa 2005 r.). 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 w celu zachowania procesów korytowych.

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 0,6 m, co wynika z różnicy poziomów lewej i prawej terasy zalewowej (rys. 6). Można rozważać pięć wariantów ingerencji inżynierskiej w tym miejscu:

- 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%, by zmniejszyć moc 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.

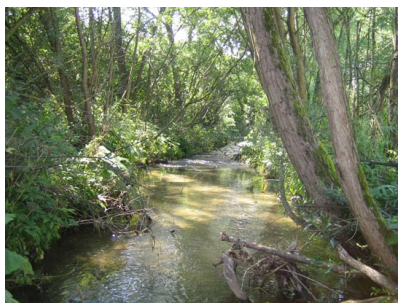


Najbardziej efektywne pod względem ekonomicznym i najmniej uciążliwe pod względem środowiskowym byłoby łączne zastosowanie częściowe dwóch pierwszych wariantów, czyli obniżenie terasy zalewowej na szerokości około 10 m i umocnienie skarp nasypu ścieżki rowerowej. Zabieg ten będzie potrzebny na długości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

Wnioski

Jak widać na omawianym przykładzie, zamiast regulacji potoku na długości około kilometra można nieznacznie robotami ziemnymi na długości nie przekraczającej około 100 m - przy użyciu odpowiednich materiałów - uzyskać stan zapewniający nieuciążliwość 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'a-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 żwirowodennych, takich jak Raba, Skawa czy Dunajec, ich dopływów wielkości Rogoźnika, Piekielnika czy Kamienicy oraz mniejszych potoków, o zlewni powyżej około 5 km² 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 na zbędnych kosztach zabezpieczeń przeciwoerozyjnych.

Józef Jeleński

Ove Arup & Partners Ltd., Oddział w Polsce

Dorota Gatkowska-Jeleńska

WS Atkins Polska, Sp. z o.o.

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 łóżyska cieków.

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 karpaccich dopływów Wisły – 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, postrzeganie i wykorzystanie do rewitalizacji cieków górskich. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków 2007.