

Wojciech Bartnik, Wojciech Majewski, Marta Łapuszek, Jerzy Ratomski

**OCENA RÓWNOWAGI HYDRODYNAMICZNEJ
DOLNEGO DUNAJCA
W WARUNKACH PRACY ELEKTROWNI WODNYCH**

***THE ESTIMATION OF HYDRODYNAMICAL BALANCE
OF THE LOWER DUNAJEC BELOW HYDRO-ENERGY
POWER PLANT***

Streszczenie

Dunajec jest jedną z większych rzek polskich z dużym zagrożeniem powodziowym i potencjałem hydroenergetycznym. Wybudowane zostały dwie wielkie zapory dla ochrony przeciwpowodziowej. z wykorzystaniem hydroenergetycznym piętrzenia wody w tych zbiornikach. W 1997 r. oddano do eksploatacji zapórę, zbiornik wodny i elektrownię Czorsztyń-Niedzica. W konsekwencji budowy zapór i zbiorników Czorsztyń-Niedzica oraz Rożnów zatrzymany został prawie całkowicie transport rumowiska, co spowodowało ciągłą erozję dna Dunajca poniżej Czchowa na odcinku 67,4 km. W chwili obecnej Dunajec ma charakter drenującej rzeki. W związku ze stale postępującą erozją denną poniżej Czchowa lokalnie do 4 m dla zatrzymania tego procesu i odtworzenia warunków położenia dna z okresu poprzedzającego budowę zbiorników, powstała koncepcja stabilizacji tego odcinka progami niskiego spadku. Progi stabilizacyjne będą mogły być wykorzystane do lokalizacji małych elektrowni wodnych, które będą pracować na średnim przepływie [Praca zbiorowa 2006].

Słowa kluczowe: mała elektrownia wodna, erozja denną, równowaga hydrodynamiczna

Summary

The one of the Polish rivers richest in water with substantial flood hazard and important hydro-energy potential. Two large flood protection and hydro-energy schemes were constructed on the Upper Dunajec: Rożnów-Czchów and Czorsztyn-Sromowce Wyżne. Lower Dunajec extends downstream from the Czchów hydraulic barrage to the outflow to the Vistula and is 67.4 km long. Construction of two large hydraulic schemes resulted in the increase of the low and average discharges, however, simultaneously important disturbance of sediment transport occurred. A large amount of sediment is deposited in the reservoirs. As the result of this process, significant erosion was observed along the Lower Dunajec reaching in some places even 4 m. This process was increased by the sediment exploitation from the river channel. Due to flood problems several training works were executed along the Lower Dunajec. All these resulted in lowering of the river channel, which became a draining river. Stabilization of the river channel is possible by means of the construction of special weirs with inflatable gates. Construction of the weirs gives the possibility of using heads for hydro-energy. It is proposed to construct small hydraulic power plants, which would operate during low and average discharges.

Key words: small hydro-energy power plant, bed erosion, hydrodynamical balance

CHARAKTERYSTYKA HYDRAULICZNA I HYDROLOGICZNA DUNAJCA

Dunajec jest prawobrzeżnym dopływem Wisły o bardzo zróżnicowanym charakterze, od rzeki typowo górskiej do odcinka nizinnego przy dopływie do Wisły. Na przepływy rzeki ma wpływ górską część Dunajca, wypływająca z północnych stoków Tatr w postaci Białego i Czarnego Dunajca, jak również jego prawobrzeżny dopływ Poprad, biorący początek na południowych stokach Tatr w Słowacji. Poprad przed wpłynięciem na teren Polski stanowi na długości około 17 km odcinek graniczny między Polską i Słowacją. Poprad dopływa do Dunajca powyżej Nowego Sącza. Dunajec poniżej zbiornika wyrównawczego Sromowce Wyżne jest również odcinkiem granicznym ze Słowacją na długości około 12 km.

Ważniejszymi dopływami Dunajca (idąc od góry) są: Białka, prawobrzeżny dopływ poniżej Nowego Targu, a powyżej zbiornika Czorsztyn, Poprad prawobrzeżny dopływ powyżej Nowego Sącza, Łososina lewobrzeżny dopływ łączący się z Dunajcem w rejonie zbiornika Czchowskiego i Biała, czasami nazywana Białą Tarnowską, prawobrzeżny dopływ łączący się z Dunajcem w rejonie Tarnowa. Przebieg Dunajca pokazano na rysunku 1. Przepływy Dunajca są rejestrowane dla odcinka powyżej Białej oraz poniżej Białej. Zestawienie przepływów charakterystycznych dla tych dwóch przekrojów zestawiono w tabeli 1 [Majewski i in. 2007].

Tabela 1. Przepływy charakterystyczne Dunajca powyżej ujścia Białej i poniżej ujścia Białej**Table 1.** Characteristics discharge in the Dunajec River upstream and below the outlet of Biała River

Lp.	Rodzaj przepływu	Symbol	Przepływy [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	
			do km 30,500	poniżej km
1.	Najniższy zaobserwowany	NNQ	8,80	9,23
2.	Średni niski z wielolecia	SNQ	16,50	17,75
3.	Średni roczny z wielolecia	SSQ	73,00	81,66
4.	Średni wysoki z wielolecia	SWQ	968,00	1236,00
5.	Najwyższy zaobserwowany	WWQ	2930,00	3548,00

Na odcinku dolnego Dunajca, poniżej stopnia wyrównawczego w Czcho-
wie, przepływ średni niski z wielolecia SSQ jest obecnie rzędu $17\text{--}18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
natomiast przepływ średni z wielolecia wzrósł do około $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jest to wy-
rażny wpływ istniejących powyżej zbiorników wodnych, a w szczególności
pracy przepływowej elektrowni wodnej Czchów. Nadal jednak bardzo duże są
przepływy wysokie i przepływy powodziowe przekraczające wartość $3 \text{ tys. m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
Te przepływy mają bardzo istotny wpływ na erozję koryta.

PRZYCZYNY I PRZEBIEG ZJAWISK EROZYJNYCH

Z przepływem wody w korytach naturalnych nierozzerwalnie związany jest
ruch rumowiska. Rumowisko to może pochodzić z procesów denudacji zachodzących
w zlewni rzecznej lub też może być produktem erozji dennej czy bocznej zachodzącej
w samym korycie ciek. Intensywność tych zjawisk uwarunkowana jest wieloma
czynnikami zewnętrznymi, do których można zaliczyć klimat, budowę geomorfologiczną,
topograficzną zlewni itp.

Charakter procesu określają: intensywność ruchu rumowiska oraz zdolność
transportowa ciek. Przez intensywność ruchu (I_r) rozumiemy ilość materiału
transportowanego przez ciek w danych warunkach przepływu dla określonej
chwili czasowej. Zmiany intensywności ruchu rumowiska są powodowane
zmianami parametrów określających ten ruch. Zdolność transportowa ciek (Z_r)
wyraża wartość maksymalnego transportu, jaki może zaistnieć przy określonych
warunkach przepływu wody i danej charakterystyce materiału. Przyjmuje się, że
cieki dążą do pełnego wykorzystania zdolności transportowej.

W zależności od wzajemnego stosunku tych dwóch wielkości, przebieg
zjawiska może przyjmować następujące formy:

- Akumulacji $I_r > Z_r$
- Erozji $I_r < Z_r$
- Równowagi hydrodynamicznej $I_r = Z_r$

Zjawiska te mają odmienny przebieg w korytach cieków i zbiornikach. W korytach naturalnych, na skutek ciągłych zaburzeń i zmian przepływu oraz geometrii zachodzi zazwyczaj proces cyklicznie zmienny. Natomiast w zbiornikach wodnych, tam gdzie występuje gwałtowna, jednokierunkowa zmiana warunków przepływu (zwiększenie powierzchni czynnej, zmniejszenie prędkości, spadku i przepływu jednostkowego), procesy rumowiskowe mają charakter jednokierunkowy. Następuje spadek zdolności transportowej, wypadanie cząstek z ruchu i odkładanie materiału w cofce zbiornika. Powiększanie się i przesuwanie odkładów w głąb zbiornika powoduje zmniejszenie jego pojemności użytkowej. Zmiany położenia dna przebiegają zazwyczaj wolno, a ich intensywność osiąga wartość do kilku centymetrów rocznie. Pozornie niewielkie, w dłuższym czasie powodują, że dno obniża się o kilkadziesiąt centymetrów.

Gdy pojawia się fala wezbrania o wysokiej kulminacji, sięgającej nawet kilku tysięcy $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ erozja denną może osiągnąć znacznie większą wartość. Natężenie i duże prędkości przepływu przekraczają wówczas znacznie wartości dopuszczalne dla rumowiska o danej granulacji. Powoduje to zerwanie obrukowania dna i masowy ruch rumowiska. Wymieszanie różnofrakcyjnego materiału powoduje wypłukiwanie drobnego rumowiska, aż do wytworzenia się nowej pokrywy.

Do drugiej grupy czynników wywołujących i potęgujących erozję denną należy działalność człowieka prowadzona w dolinie lub korycie cieków.

Do najistotniejszych należą:

– Przegrodzenie doliny wysoką budowlą piętrzącą. W wytworzonym zbiorniku następuje sedimentacja grubszych frakcji (piaski, żwiry, kamienie) i tym samym brak zasilania w rumowisko wleczone odcinka rzeki położonego poniżej obiektu. W efekcie na tym odcinku wystąpić może silna erozja liniowa, aż do osiągnięcia stanu równowagi hydrodynamicznej w korycie cieków. Co więcej ten proces rozpoczyna się już zazwyczaj w momencie rozpoczęcia prac budowlanych, powodujących zaburzenia w ruchu rumowiska (grodze, drogi dojazdowe *etc.*).

– Drugim z czynników antropogenicznych są niewłaściwie prowadzone prace regulacyjne polegające zazwyczaj na nadmiernym zawężaniu koryta czy zwiększeniu spadku, przez skrócenie naturalnego biegu rzeki. Działania te powodują zwiększenie prędkości strumienia, a co za tym idzie zwiększony transport rumowiska i przyspieszoną erozję wgłębną. Przypadki takich działań miały miejsce na przedmiotowym odcinku Dunajca.

– Znaczący wpływ na przebieg procesu erozji dennej ma niekontrolowany pobór rumowiska dennego, dokonywany często na skalę półprzemysłową. Pomijając ubytek masy rumowiska, następuje pobranie grubych frakcji pokrywy, odsłonięcie warstw wgłębnych i osłabienie odporności dna na erozję.

Erozja denną w rzekach górskich jest procesem nieustannym, jednak jej natężenie nie zawsze jest jednakowe. Dlatego intensywność erozji koryta rzeki karpackiej określona została w niniejszej pracy przy zastosowaniu modelu staty-

stycznego. Analizę przeprowadzono przy założeniu, iż zaobserwowana na przestrzeni lat tendencja układania się stanów niskich rocznych jest obrazem położenia dna koryta ciek w tych latach [Punzet 1994]. Założenie jest słuszne gdyż przepływy niskie nie wykazują tendencji do znaczących zmian w czasie.

Przebieg minimalnych rocznych stanów wody w przekrojach wodowskazowych jest dobrym wskaźnikiem występujących zmian w położeniu dna rzeki, obserwowanych w okresie wieloletnim [Punzet 1993]. Z krzywych konsumpcyjnych wynika, iż na przestrzeni lat w badanych profilach wodowskazowych wystąpiły zmiany poziomu dna związane z postępującym procesem jego erozji. Zmiany przekroju poprzecznego spowodowane erozją lub akumulacją materiału wlezonego, regulacją lub obwałowaniem koryta mają wpływ na przebieg krzywej konsumpcyjnej w zakresie stanów niskich [Łopuszek 2003]. Jeżeli krzywe konsumpcyjne z późniejszego okresu układają się poniżej krzywych z lat wcześniejszych, wtedy należy się spodziewać tendencji erozyjnej dna koryta.

W celu oceny tendencji przebiegu napełnień koryta w zakresie stanów niskich na przestrzeni dziesięcioleci, dla ciągów napełnień koryta (h) w czasie (T) określono równania regresji liniowej, z których wynika, że nie uległy one zmianie. Oznacza to, iż pomimo obserwowanych na przestrzeni dziesięcioleci zmian w położeniu dna nie zmieniło się w znaczny sposób napełnienie koryta w zakresie stanów wody niskiej.

Otrzymane wyniki skłoniły więc do przyjęcia metodyki prowadzenia badań, bazujących na założeniu, że obserwowana przez dziesięciolecia tendencja obniżania się stanów niskich rocznych jest obrazem położenia dna koryta ciek w tych latach. Badania przeprowadzono na głównych karpackich dopływach górnej Wisły, w przekrojach wodowskazowych, dla których było możliwe uzyskanie wieloletnich, tj. 100-letnich ciągów danych stanów niskich rocznych. Obliczenia przeprowadzono także dla wodowskazów o krótszym okresie obserwacyjnym. Niektóre ciągi danych mają punkty, bądź przedziały nieciągłości. Wynika to z braku publikacji danych o stanie wód lub braku obserwacji. Tworząc wykresy stanów niskich i średnich rocznych, uwzględniono zmiany położenia zera wodowskazu.

Uzyskane wieloletnie ciągi stanów niskich rocznych podzielono na przedziały czasowe, w których określono funkcje aproksymujące. Funkcje te określają położenie dna w chwili T oraz wykazują obniżanie się dna ciek. Przyjmują one ogólną postać [Łopuszek 2003]:

$$H_d = H_z + H_i(T) \text{ [m n.p.m.]} \quad (1)$$

gdzie:

H_d – uśredniony poziom dna w roku T [m n.p.m.],

H_z – przyjęty poziom porównawczy [m n.p.m.],

T – rok obserwacyjny,

$H_i(T)$ – funkcja aproksymująca dla i -tego przedziału czasowego.

Podjęmowano wiele prób podziału badanych ciągów obserwacyjnych na przedziały czasowe, dla których określano funkcje wyrównujące. Ostatecznie przyjęto podział, jak również postaci funkcji $H_i(T)$ gwarantujące najmniejszy błąd wyrównania w stosunku do wielu ilości badanych funkcji. Ponadto długi ciąg obserwacyjny zapewnia wiarygodność otrzymanych wyników. Analogiczne obliczenia wykonano dla wieloletnich ciągów stanów wody średniej rocznej. Zbliżony przebieg funkcji wyrównujących, otrzymanych dla stanów średnich, do odpowiednich funkcji uzyskanych dla stanów wody niskiej rocznej potwierdza zaobserwowane tendencje obniżania się koryta cieku.

Weryfikacja określonych funkcji opisujących intensywność procesów erozyjnych w korycie cieku przeprowadzona została na materiale niezależnym, tzn. na podstawie analizy zaobserwowanych zmian położenia dna w pomierzonych przekrojach poprzecznych koryta. Do weryfikacji wykorzystane zostały archiwalne i aktualne przekroje poprzeczne koryt. Na podstawie zaobserwowanych zmian w ich położeniu na przestrzeni lat obliczono ilość materiału, jaki został wyerodowany w przekroju w badanych przedziałach czasowych. Określono też średnie roczne obniżenie dna.

Wybór przekrojów wytypowanych do weryfikacji uzależniony był od:

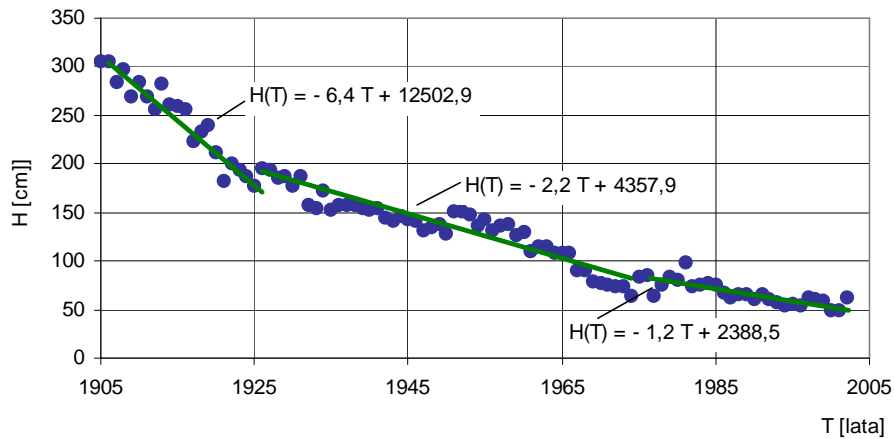
- Możliwości zweryfikowania każdej z wyprawdzonych funkcji.
- Możliwości uzyskania danych.
- Wielkości zaistniałych zmian rzędnych położenia dna tak, aby były one wystarczająco wyraźne.

Uzyskane w ten sposób wielkości obniżenia koryta porównane zostały z wartościami współczynników przy zmiennych czasowych T , funkcji $H_i(T)$ określających intensywność zmian erozyjnych koryta.

Podstawą do opracowania prognozy zmian położenia koryta cieku są liniowe funkcje regresji $H_i(T)$ uzyskane dla badanych przedziałów czasowych w poszczególnych profilach wodowskazowych rzeki. Funkcje te są dobrym narzędziem prognozowania w zakresie takich zjawisk, dla których jest możliwe uzyskanie odpowiednich danych statystycznych z przeszłości.

Tabela 2. Erozja dena w przekroju Żabno
Table 2. Bed erosion in cross-section Żabno

Wodowskaz: ŻABNO			
przedział czasowy	tównanie intensywności erozji dennej	wskaźnik obniżenia dna [cm · rok ⁻¹]	
		wg równania	wg przekroju
1905–1925	$H_1 = - 6,4 T + 12502,9$	- 6,4	- 6,2
1925–1975	$H_2 = - 2,2 T + 4357,9$	- 2,2	- 2,6
1976–2002	$H_3 = - 1,2 T + 2388,5$	- 1,2	- 1,0



Rysunek 1. Zmiana położenia dna w przekroju Żabno
Figure 1. The change of bed elevation in cross-section Żabno

PROGNOZA OBRUKOWANIA DNA – WARUNKI STABILNOŚCI KORYTA CIEKU

Obrukowanie dna tworzy ta część materiału dennego, która nie podlega wymyciu w czasie przepływu. Jest to proces, który może być scharakteryzowany dwoma krzywymi, tj. krzywą początkową dla rumowiska niejednorodnego i krzywą końcową dla rumowiska jednorodnego, określonego poprzez odchylenie standardowe krzywej przesiewu $\delta = 1,3$. Po przejściu kolejnego wezbrania krzywa przesiewu na skutek wymieszania się uziarnienia pokrywy z podłożem może powrócić do krzywej początkowej. Rumowisko niepodlegające wymyciu stanowi około 60% powierzchni dna, natomiast grubość uzbrojenia dna odpowiada najgrubszemu kamieniowi z pokrywy. Opancerzenie dna tworzy się przez stopniowe wmywanie z dna drobnych części uziarnienia. Inaczej ten proces przedstawia się w korycie o przepływach naturalnych, inaczej poniżej zbiorników wodnych, zapór rumowiskowych oraz stopni wodnych, gdzie odpływ może być regulowany, a sam zbiornik czy budowla piętrząca odcina dopływ rumowiska do niższych partii ciek. Proces ten przebiega na znacznych długościach poniżej budowli piętrzących, a sam proces wskutek braku alimentacji rumowiska zachodzi tak długo, aż wytworzy się stan równowagi, a więc powstanie obrukowanie dna.

Tworzenie się opancerzenia dna jest możliwe w przypadku materiału wielofrakcyjnego. Obrukowanie dna tworzy ta część materiału dennego, która nie

podlega wymyciu w czasie przepływu. Gessler [Bartnik 1992] ustalił, że prawdopodobieństwo pozostania ziarna na dnie zależy od względnych naprężeń granicznych:

$$q = \phi_p (\tau_{gr} / \tau_0) \quad (2)$$

opracowano metodę prognozowania obrukowania dna poprzez obliczenie naprężeń granicznych ruchu materiału dennego dla poszczególnych frakcji f_i ze wzoru:

$$\tau_{gr} = f_i g \Delta \rho_s d_i \quad (3)$$

Na podstawie określenia prawdopodobieństwa nieruszenia się ziarna z dna będzie określona wielkość przepływu dla początku ruchu i transportu masowego w przekrojach charakterystycznych. Pomiar granulometryczny rumowiska dennego zostały wykonane w lipcu 2006 na odcinku 68 km biegu rzeki Dunajec, poniżej zapory w Czchowie. Poboru prób rumowiska dennego dokonano w 21 przekrojach pomiarowych, charakterystycznych dla danego odcinka rzeki i miejscu lokalizacji progów stabilizacyjnych. Pobrano 61 próbek do wykonania analizy granulometrycznej rumowiska. Próbkę zostały pobrane z nurtu, odsypiska i z brzegu. Celem tych pomiarów było określenie zmian granulacji rumowiska rzeki Dunajec, które zaistniały pod wpływem, wymuszonych wybudowaniem zapory w Czchowie, zmian morfo-dynamicznych. Analizą objęto okres ostatnich 25 lat w przedziale lat 1980–2006 [Praca zbiorowa 2006].

Tabela 3. Zmiana uziarnienia dennego w okresie 25 lat
Table 3. The change of bedload granulometry within period of 25 years

Umiejscowienie progów	d_m (dane archiwalne rok 1980)	d_m (2006 r.)
Żabno	0,025	0,023
Ilkowiec-Sanoka	0,024	0,028
Biała	0,026	0,032
Ostrów	0,030	0,040
Mikołajowice	0,033	0,037
Wojnicz	0,034	0,046
Janowice	0,044	0,035
Melsztyn	0,031	0,053
Jurków	0,042	0,043
Czchów	0,040	0,041

Pomiary granulometryczne rumowiska dennego wykazały i potwierdziły brak równowagi hydrodynamicznej na badanym odcinku ciek. Potwierdza to wielkość aktualnej średnicy miarodajnej rumowiska dennego, która zwiększyła się prawie we wszystkich badanych przekrojach, co jednoznacznie wskazuje na transport i wypłukiwanie drobnych frakcji z dna. Natomiast zanotowane zmiany

w uziarnieniu w Czchowie i w Janowicach mogą mieć charakter lokalny, wywołany np. dużą erozją brzegową. Pomiary te wykazały również prawidłową tendencję w charakterystyce uziarnienia. Wielkości średnic pomierzonych w nurcie cieku są większe od pomierzonych w odsypiskach cieku i pobranych z brzegu. Zwiększenie średnicy rumowiska dennego potwierdza również charakter obecnego stanu morfodynamicznego do tworzenia obrukowania dna. Będzie to miało również bezpośredni wpływ na zwiększenie się wielkości napelnień granicznych i zwiększenie spadków granicznych, a więc można będzie uzyskać poprawę warunków eksploatacji hydroelektrowni i pracy turbin z powodu znacznego zmniejszenia się transportu drobnych frakcji rumowiska dla określonych przepływów.

WYZNACZENIE SPADKÓW GRANICZNYCH NA ODCINKACH CHARAKTERYSTYCZNYCH

Parametry graniczne ruchu dla badanych przepływów $Q = 90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q = 130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q = 250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [Praca zbiorowa 2006].

Tabela 4. Spadek zwierciadła wody i spadek graniczny I_{gr} [-] przy określonych przepływach

Table 4. The water surface slope and critical slope for characteristics discharges

Lokalizacja progu	Spadek rzeczywisty I [-]	I_{gr} [-] ($Q=90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	I_{gr} [-] ($Q=130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	I_{gr} [-] ($Q=250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	I_{gr} [-] ($Q=400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Żabno	0,00028	0,00057	0,00045	0,00031	0,00023
Sanoka	0,0006	0,00069	0,00056	0,00038	0,00029
Komorów	0,00077	0,00081	0,00065	0,00044	0,00033
Ostrów	0,00102	0,00084	0,00067	0,00046	0,00035
Mikołajowice	0,00102	0,00091	0,00072	0,00049	0,00037
Wojnicz	0,00102	0,00093	0,00075	0,00050	0,00038
Janowice	0,00102	0,00118	0,00095	0,00065	0,00049
Melsztyn	0,00153	0,00097	0,00079	0,00054	0,00040
Jurków	0,00105	0,00113	0,00091	0,00062	0,00047
Czchów	0,00105	0,00165	0,00133	0,00090	0,00069

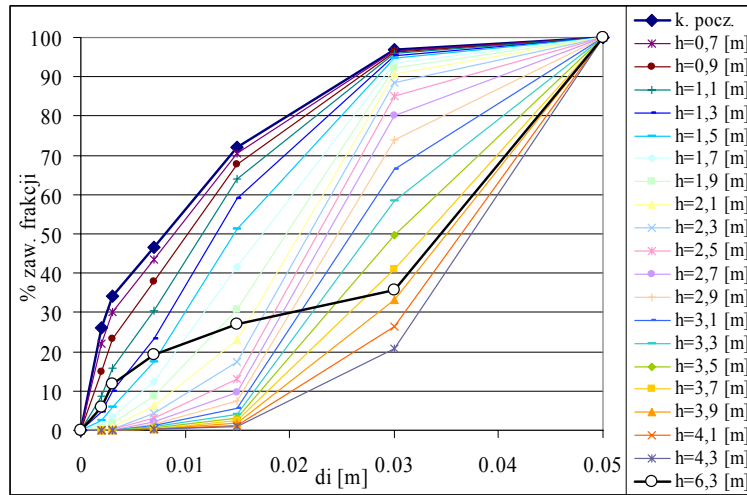
Tabela 5. Napętnienie graniczne h_{gr} w badanych przekrojach
Table 5. Critical depth of water h_{cr} in measured cross-sections

Lokalizacja progu	h_{gr} dla I rzeczywistego	h_{gr} dla I granicznego	h $Q = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Żabno	2,91	5.25	3,47
Sanoka	2,18	4.5	2,77
Komorów	1,85	4.3	2,59
Ostrów	1,60	4.1	2,85
Mikołajowice	1,73	4.0	2,87
Wojnicz	1,79	3.0	2,88
Janowice	2,35	3.7	2,97
Melsztyn	1,10	3.0	2,54
Jurków	2,15	3.2	2,9
Czchów	2,49	3.1	2,31

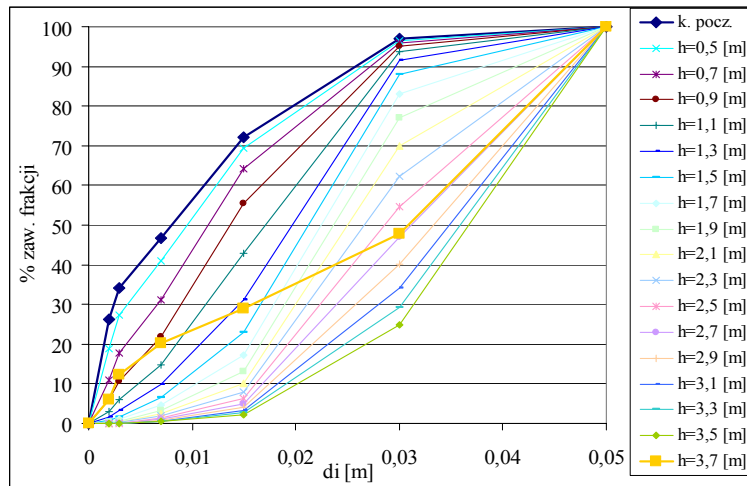
Po czasie, w którym nastąpi załadowanie przestrzeni międzyprogowych powstaną warunki do sedymentacji materiału dennego i proces erozji koryta zostanie zatrzymany na podstawie spełnienia warunku $h_{gr} < h$ dla maksymalnego przepływu pracy elektrowni (tab. 5). Można zatem oczekiwać, że na skutek podniesienia dna nastąpi oczekiwany wzrost poziomu krzywej depresji wód gruntowych, a co za tym idzie zwiększy się retencja i poziom przepływów minimalnych w korycie Dunajca.

OCENA WARUNKÓW RÓWNOWAGI HYDRODYNAMICZNEJ

Symulacja zerwania obrukowania dna i określenie parametrów hydraulicznych została przeprowadzona za pomocą programu komputerowego ARMOUR [Bartnik 1992]. Zasadą działania tego programu jest wprowadzenie danych wejściowych (przekrój, uziarnienie początkowe, spadek). Zerwanie obrukowania dna i transport masowy uwidacznia się w programie obliczoną krzywą przesiewu dla odchylenia standardowego $\delta = 1,3$ wg, czyli osiągnięcie tzw. warunku jednorodności uziarnienia dna w wyniku erozji materiału dennego o określonej średnicy dla przekroczonych wielkości naprężeń granicznych. W wyniku wzrostu naprężeń stycznych w korycie ciekę (wzrost napętnienia) następuje zerwanie obrukowania tzn. średnica d_{84} osiąga prawdopodobieństwo $q < 0,5$ i zostaje wprawiona w ruch. Rozpoczyna się transport masowy i następuje wymieszanie rumowiska dennego. Wizualizacja tego zjawiska uwidacznia się wykresem krzywej uziarnienia, który powraca do warunków początkowych (na wykresie krzywa granulometryczna rumowiska pogrubiona). Dla tak przebiegającego zjawiska zostały przypisane poszczególne napętnienia i przepływy. Obliczenia wykonano w przekrojach charakterystycznych, przykładowo dla przekrojów w Sanoka i Ostrów (rys. 2 i 3) [Praca zbiorowa 2006].



Rysunek 2. Wykres przebiegu zmian uziarnienia rumowiska dennego w przekroju Sanoka na skutek przejścia wezbrania $Q = 1617 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $h_{gr} = 1,95 \text{ m}$ (transport masowy rumowiska dennego przy napełnieniu $h = 6,3 \text{ m}$ i spadku 0,6 ‰.)
Figure 2. Armouring layer prognosis in in cross-section Sanoka after the passing flood – $Q = 1617 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $h_{cr} = 1,95 \text{ m}$ (total transport of bedload for $h = 6,3 \text{ m}$ and $I = 0,6 \text{ ‰}$.)



Rysunek 3. Wykres przebiegu zmian uziarnienia rumowiska dennego w przekroju Ostrów (wezbranie $Q = 625 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $h_{gr} = 1,33 \text{ m}$ (transport masowy przy napełnieniu $h = 3,7 \text{ m}$ i spadku 1,02‰).
Figure 3. Armouring layer prognosis in in cross-section Sanoka after the passing flood – $Q = 625 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $h_{cr} = 1,33 \text{ m}$ (total transport of bedload for $h = 3,7 \text{ m}$ and $I = 1,02 \text{ ‰}$.)

ENERGETYCZNE WYKORZYSTANIE DOLNEGO DUNAJCA

Stosunkowo duże przepływy oraz spadki zwierciadła wody na odcinku Dunajca od Czchowa do ujścia do Wisły czynią ten odcinek rzeki atrakcyjnym pod względem wykorzystania energetycznego. Przy wszystkich stopniach przewiduje się budowę małych elektrowni wodnych [Majewski i in. 2007].

Spady przy przepływach niskich i średnich uzyska się przez piętrzenie składanymi zamknięciami zainstalowanymi na progach. Będą one kładzione przy przepływach rzędu $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przy takich przepływach maleje spad i turbiny wodne tracą swoją sprawność. Budynki elektrowni projektuje się jako zata-pialne przy przepływach powodziowych, co wymagać będzie odpowiednich konstrukcji.

Zgodnie z zaleceniami UE w 2010 r. Polska powinna produkować 7,5% energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Dziś produkcja ta nie przekracza 2%. Obecnie w Polsce i na całym świecie energia elektryczna w ogólnym bilansie energetycznym odgrywa coraz większą i bardzo istotną rolę ze względu na łatwość jej wykorzystania przez użytkowników. Dlatego też powinno się do maksimum wykorzystać każdą możliwość wytworzenia energii elektrycznej w elektrowniach wodnych. Energia ta jest odnawialna, bo woda zgodnie z cyklem hydrologicznym płynie zawsze, ekologicznie czysta, bo elektrownie wodne nie wydzielają żadnych zanieczyszczeń do środowiska (woda, gleba i atmosfera). Obecnie energia elektryczna wytwarzana w elektrowniach wodnych uważana jest za dużo bardziej wartościową niż energia wytworzona w elektrowniach cieplnych. Ponadto wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach wodnych pozwala na lokalną dystrybucję energii i uniknięcie stosunkowo wysokich strat przesyłowych.

Wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach wodnych oprócz aspektów ściśle ekonomicznych ma również bardzo duże walory ekologiczne. Każdy megawat zainstalowany w elektrowni wodnej pozwoli na wyłączenie z eksploatacji równoważnika w elektrowni cieplnej nieposiadającej instalacji odsiarczania. W Polsce istnieje jeszcze wiele takich elektrowni, a instalacje odsiarczania są bardzo kosztowne.

CHARAKTER PRACY ELEKTROWNI

Elektrownie wodne wykorzystujące wodę spiętrzoną progami stabilizacyjnymi charakteryzują się szczególnymi warunkami pracy. Są to elektrownie o pracy przepływowej. W zależności od przepływu rzeki można wyznaczyć kilka charakterystycznych okresów pracy [Majewski i in. 2007].

W pierwszym okresie przepływ rzeki (Q_{rz}) jest niższy od przepływu instalowanego (Q_{inst}). Jest to okres o bardzo długim czasie pracy i zmieniających się spadach, od maksymalnego do instalowanego. Przepływ rzeki w tym okresie odbywa się tylko przez elektrownię.

Drugi okres obejmuje pracę elektrowni dla przepływów rzeki większych od przeliku instalowanego $Q_{rz} > Q_{inst}$. W okresie tym różnica przepływu $Q_{rz} - Q_{inst}$ przepływa przez jaz, który utrzymuje normalny poziom piętrzenia. Okres ten trwa do czasu wystąpienia minimalnego spadku, a więc do momentu zatrzymania elektrowni.

Trzeci okres obejmuje czas, w którym elektrownia nie pracuje, a przez jaz przepływa cała woda. W tym okresie jaz ruchomy jest stopniowo otwierany. Okres ten trwa do momentu osiągnięcia przez dolną wodę poziomu normalnego piętrzenia, a więc przepływ rzeki równy jest wodzie brzegowej. Po osiągnięciu tego stanu część ruchoma jazu zostaje całkowicie otwarta.

Czwarty okres jest okresem powodziowym. Przepływ rzeki jest większy od wody brzegowej $Q_{rz} > Q_b$. Jaz i elektrownia zostają zatopione.

Energetyczne wykorzystanie progów stabilizacyjnych stawia szczególne wymagania przy rozwiązywaniu konstrukcyjnym budynku elektrowni. Konieczność zastosowania specjalnych rozwiązań wynika z przepływu wód powodziowych (większych od wody brzegowej) ponad budowlami jazu i elektrowni.

Warstwa wody ponad stropodachem elektrowni może wynieść od 3 do 4 m. Z tej racji budynek elektrowni musi zapewniać pełną hermetyczność wszelkich zamknięć (drzwi, pokrywy luków montażowych, otwory wyprowadzające przewody wentylacyjne, kable energetyczne i sterownicze). Wszelkie zewnętrzne urządzenia eksploatacyjne elektrowni: czyszczarki krat, podnośniki zamknięć i inne powinny być usuwalne lub odpowiednio zakotwione. Budynek powinien mieć zapewnioną stateczność na wypłynięcie, a stropodach obliczony na obciążenie warstwą wody powodziowej.

UWARUNKOWANIA ŚRODOWISKOWE

Odcinek dolnego Dunajca przeznaczony jest do zaopatrzenia w wodę przemysłową i pitną, bytowania ryb łososiowatych i karpowatych oraz celów rekreacyjnych. Dunajec jest również odbiornikiem ścieków bytowo-gospodarczych, komunalnych i przemysłowych, jak również zanieczyszczeń obszarowych. W ocenie ogólnej stan czystości wód Dunajca od Czchowa do ujścia Białej Tarnowskiej zaliczany jest do II klasy czystości (według klasyfikacji czterostopniowej), natomiast na odcinku poniżej do III klasy czystości. W tej ogólnej ocenie czystości decydujące znaczenie mają zanieczyszczenia bakteriologiczne. W latach 1998–2004 stan czystości wód Dunajca uległ poprawie, szczególnie na odcinku od Czchowa do ujścia Białej Tarnowskiej.

Ten odcinek Dunajca jest ważnym korytarzem ekologicznym łączącym się z korytarzem ekologicznym doliny Wisły, który ma charakter międzynarodowy [Praca zbiorowa 2006].

Na odcinku tym znajdują się tarliska certy, gatunku zagrożonego i chronionego. Odcinek ten ma wysoki walor przyrodniczy. Według oceny specjali-

stów przyrodników zabudowa hydrotechniczna tego odcinka zakłóci jego drożność dla ryb i fauny dennej oraz zniszczy siedliska ryb i szlaki ich wędrówek. Przez budowlę hydrotechniczną, zgodnie z prawem wodnym musi być przez cały rok zabezpieczony przepływ nienaruszalny (poprzednio przepływ biologiczny). Minimalny przepływ dla wytworzenia prądu wabiącego wg badań niemieckich wynosi dla pstrąga $Q = 0,14-0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla łososia i troci. Minimalna ilość wody wg Rady Naukowej przy RZGW potrzebna do zaopatrzenia przepławki dla dorosłych ryb wędrownych wynosi $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i powinna być zapewniona zwłaszcza jesienią (od września do listopada), a w pozostałym okresie $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Warunek drożności rzeki Dunajec poniżej Czchowa – przepławki biologiczne.

W celu złagodzenia szkodliwości działania progów i elektrowni dla ryb i towarzyszących im zespołów fauny rzecznej w krajach wysoko zurbanizowanych, gdzie na skutek regulacji i zabudowy rzek doprowadzono do biologicznej dewastacji tych środowisk opracowano konstrukcje przepławek, czyli dróg wodnych naśladujących naturalne warunki panujące w korycie rzeczonym, ułatwiające rybom pokonywanie przeszkód. Najlepszą z nich jest tzw. „obejście” zlokalizowane poza korytem rzeki omijające próg hydrotechniczny. Przypomina ono naturalny charakter rzeki w sekwencji „płoso-bystrze”. Sprawia to, że obejście, pełniąc funkcję przepławki jest równocześnie siedliskiem stale bytujących w nim licznych gatunków ryb. Do wykonania obejścia wykorzystywane są naturalne materiały (żwir, kamienie głazy, pnie drzew i ich karpy, faszyna).

Budowa przepławek może tylko częściowo zrekompensować straty wywołane przegrodzeniem rzeki, a więc celem zachowania drożności Dunajca na odcinku poniżej Czchowa każda przegroda cieków musi być wyposażona w przepławki biologiczne. Faktem jest, że obecne przepławki dla ryb w Czchowie i Rożnowie spełniają swoje zadanie i pozwalają na migrację ryb aż do stopnia Sromowce Wyżne. Zadania przepławek, ich cel i konstrukcja wymagają zdecydowanej zmiany w tym zakresie. Przepławki techniczne z punktu widzenia zachowania ciągłości biologicznej cieków stały się anachronizmem.

Drugorzędowe szlaki migracji ryb dwuśrodowiskowych obejmujące głównie rzeki II rzędu, a takim jest Dunajec, którymi migruje zarówno w górę jak i w dół rzeki więcej niż 5% populacji ryb dwuśrodowiskowych z danego dorzecza muszą spełniać podstawowe warunki hydrauliczne:

- Średnia prędkość wody – $0,4-0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a tylko lokalnie do $2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Prędkość przepływu wody na wlocie: $0,90-1,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; na wylocie nie mogą być większe od $1,8-1,90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Duże prędkości wypływu wody z przepławki są niezbędne do wytworzenia na dolnym stanowisku budowli prądu wabiącego, którego wartość musi być największa w przekroju.

– Dla zachowania ciągłości cieką istotne jest zachowanie połączenia dna przepławki z dnem rzeki. Dno wylotu przepławki należy posadzić m.in. 0,50–0,75 m poniżej poziomu zwierciadła wody na dolnym stanowisku, jaki występuje przy przepływie wody średniej niskiej.

– Napełnienie wody w przepławce powinno się zmieniać w zakresie od 0,2 m do 1,5 m, przy czym minimalne napełnienie dla pstrąga 0,50 m, a dla łososa i troci 0,75 m.

– W przypadku elektrowni wodnej lokalizacja obejścia musi być umieszczona na tym samym brzegu co elektrownia, a wejście do przepławki od strony wody dolnej musi być zlokalizowane przed wylotem wody z elektrowni, a wyjście z obejścia od strony wody górnej przed wlotem wody do elektrowni.

– W korycie nieregularnie położone duże głazy stanowią kryjówki dla ryb.

CELE STRATEGICZNE I WNIOSKI KOŃCOWE

Postawione cele strategiczne będą określały zakres prac dla wytworzenia warunków równowagi hydrodynamicznej, a to:

– Zachowanie optymalnego z punktu widzenia ochrony przyrody reżimu hydrologicznego rzeki Dunajec, jako kluczowe znaczenie dla siedliska koryta rzeki, lasów łęgowych i zalewanych łąk na nadrzecznych terasach.

– Utrzymanie lub odtworzenie naturalnych procesów kształtowania koryta rzeki roztokowej (transportowanie rumowiska, deponowanie osadów, abrazja).

Cele strategiczne będzie można zrealizować poprzez budowę progów stabilizacyjnych. W zasięgu oddziaływania progów uzyskamy zmniejszenie spadku, zmniejszenie transportu rumowiska dennego, a więc wystąpią warunki do naturalnego kształtowania się koryta cieką. W wyniku podniesienia się dna terasa zalewowa będzie zasilana w okresach przepływów katastrofalnych, a wnioski uzasadniające koncepcje są następujące:

– Po czasie, w którym nastąpi załadowanie przestrzeni międzyprogowych powstaną warunki do sedymentacji materiału dennego. Na skutek podniesienia dna nastąpi oczekiwany wzrost poziomu krzywej depresji wód gruntowych, a co za tym idzie zwiększy się retencja i poziom przepływów minimalnych w korycie Dunajca.

– Po wybudowaniu progów wystąpią w korycie warunki do osadzania materiału dennego, w głównej mierze rumowiska wleczonego, które na Dunajcu ma charakter dominujący. Zerwanie obrukowania dna następuje znacznie powyżej napełnień brzegowych, powyżej przepływu $Q_{50\%}$. Taki warunek jest charakterystyczny dla przekrojów stabilnych. Natomiast dla koryta bez progów transport masowy dla spadku rzeczywistego pojawia się dla przepływów znacznie mniejszych od $Q_{50\%}$. Brak progów stabilizacyjnych może powodować erozję denną na tym odcinku cieką.

– Progi zlokalizowane na odcinkach przejściowych dla warunku, że jeżeli krzywizna trasy zmienia się w sposób ciągły, to stałego spadku i stałej głębokości dna można poszukiwać w wypadku powtórzenia układu poziomego cieków w planie.

– Czas załadowania przestrzeni zaprogowych wskazuje na duże zdolności erozyjne w części środkowej, natomiast odcinek ujściowy Dunajca jest stabilizowany rzędną dna Wisły (małe spadki), a odcinek górny jest pod wpływem zapory w Czchowie.

– Przy przepływie $Q = 130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i rzędnej piętrzenia wody na progu 178,35 m n.p.m. zasięg cofki będzie widoczny na długości ok. 2,1 km powyżej progu.

– Wybudowanie progów stabilizujących musi się odbywać w spójnej ocenie – biologicznej, morfologicznej i hydrologicznej dla klasyfikacji wartości ekosystemu wodnego, z priorytetowym zachowaniem hydromorfologicznych elementów jakości.

Tabela 6. Ocena stanu ekologicznego rzeki Dunajec poniżej Czchowa
Table 6. Estimation of ecological state of the Dunajec River below Czchow

	Warunki stanu dobrego	Dunajec z progami
element oceny	przepływ wód słodkich oraz kierunek i prędkość dominujących prądów odpowiadają całkowicie lub prawie całkowicie warunkom niezakłóconym	ze względu na lokalizację progów na odcinkach przejściowych pomiędzy łukami kierunku linii prądów pozostanie niezmieniony
ciągłość rzeki	ciągłość rzeki jest zakłócona na skutek działalności antropogenicznych i pozwala na niezakłóconą migrację organizmów wodnych i transport osadów	ciągłość rzeki zostanie zachowana dla przepływów większych od $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla migracji organizmów i transportu rumowiska, przepławka biologiczna
warunki morfologiczne	kształt koryta, zmienność szerokości i głębokości, prędkości przepływu, warunki podłoża oraz warunki i struktura stref nadbrzeżnych odpowiadają całkowicie lub prawie całkowicie warunkom niezakłóconym	warunki i struktura stref nadbrzeżnych będą odpowiadały warunkom naturalnym

Dyrektywa dopuszcza osiągnięcie dobrego stanu wód w terminach późniejszych w przypadku wystąpienia ograniczeń ekonomicznych (szczególnie gdy koszty wprowadzanych działań nie są możliwe do akceptacji przez społeczność lokalną) lub technicznych. Ponadto dla wód trwale, bądź silnie zmienionych przez człowieka (sztuczne i silnie zmienione części wód) Dyrektywa, a za nią polska ustawa Prawo wodne określa mniej rygorystyczne cele środowiskowe w zakresie hydromorfologii.

W wyniku wybudowania progów będzie można osiągnąć bezpośrednie cele środowiskowe wynikające z RDW:

– Ochrona przed dalszym pogarszaniem się wód, ekosystemów wodnych oraz ekosystemów lądowych i terenów podmokłych zależnych od wody.

– Poprawa stanu wód i ekosystemów zniszczonych w wyniku działalności człowieka.

Zmniejszenie skutków powodzi i suszy.

Wdrażanie RDW zakłada udział wszystkich zainteresowanych stron, a osiągnięcie nadrzędnego celu, czyli dobrego stanu wszystkich wód uzależnione jest od współpracy użytkowników wód, władz samorządowych i rządowych, organizacji pozarządowych oraz wszystkich obywateli. Woda stanowi podstawę działalności rolnictwa, rybołówstwa, przemysłu, energetyki wodnej, turystyki czy transportu. Przy procesie podejmowania decyzji należy zagwarantować, by u podstaw tych decyzji leżała wspólna wiedza i doświadczenie, by przy ich podejmowaniu zostały uwzględnione opinie tych, na których te decyzje będą miały wpływ, by uwzględniane były innowacyjne i twórcze sugestie oraz żeby istniały możliwości wprowadzenia nowych akceptowanych społecznie ustaleń.

BIBLOGRAFIA

- Bartnik W. *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym, początek ruchu rumowiska wlezonego*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, ser. Inżynieria Środowiska, Rozprawa habilitacyjna, 171, 1992.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. Ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Ramowa Dyrektywa Wodna).
- Łapuszek M. *The Investigation of Riverbed Erosion in a Mountainous River*. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, Vol. 50, no 1, 2003.
- Łapuszek M., Ratowski J. 1997. *Tendencje erozyjne koryta rzeki Dunajec w przekroju wodowskazowym Żabno*. Monografie PAN, 1997, z. 13.
- Majewski W. i in. *Możliwości wykorzystania dolnego Dunajca dla energetyki wodnej*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapor, Stare Jabłonki IMGW Warszawa 2007, s. 178–190.
- Praca zbiorowa. *Ekspertyza dotycząca możliwości hydroenergetycznego wykorzystania dolnego Dunajca w oparciu o kaskadę progów piętrzących stabilizujących dno*. PROEKO, Warszawa 2006.
- Punzet J. *Zmiany koryt rzecznych w dorzeczu Wisłoki w ciągu XX wieku*. Gospodarka Wodna, nr 9, 1993.
- Punzet J. *Podsumowanie wykonanych badań nad zmiennością koryt rzek karpaccich w XX wieku*. Gospodarka Wodna, nr 7, 1994.
- Roczniki hydrologiczne wód powierzchniowych*. Warszawa, IMGW, WKiŁ

Recenzent: Prof. dr hab. Włodzimierz Parzonka