

WYZNACZENIE KRZYWEJ NATĘŻENIA PRZEPIYU W PRZEKROJU COFKI ZBIORNIKÓW WODNYCH W ZESŁAWICACH

Bogusław Michalec, Andrzej Wałęga, Agnieszka Cupak
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Andrzej Michalec
Architekt IT

Anna Połowska-Wróbel
Małopolski Urząd Wojewódzki w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów geodezyjnych i hydrometrycznych oraz obliczeń wykonanych w celu opracowania krzywej natężenia przepływu w przekroju Dłubni, zlokalizowanego w kilometrze 10+247. Pomiary geodezyjne przekroju poprzecznego i spadku podłużnego zwierciadła wody wykonano za pomocą niwelatora Topcon AT-G6, a osiem pomiarów hydrometrycznych wykonano za pomocą młynka indukcyjnego Nautilus C2000 OTT Hydrometrie. Natężenie przepływu obliczono metodą Harlachera na podstawie danych hydrometrycznych i za pomocą wzoru Chézy'ego. Stwierdzono, że przepływy niskie i średnie obliczone wzorem Chézy'ego są średnio pięciokrotnie wyższe od określonych metodą Harlachera. Przyczyną tak znacznych różnic uzyskanych wyników obliczeń natężania przepływu dla danego napełnienia jest układ dna koryta. Stwierdzono, że istotny wpływ na warunki przepływu wody przy przepływach niskich i średnich ma wzniesienie dna w świetle mostu, znajdującego się 203 m poniżej przekroju wodowskazowego. Stwierdzono również, że na kształt krzywej natężenia w tym przekroju ma również wpływ oddziaływanie spiętrzenia wody w zbiornikach w Zesławicach.

Słowa kluczowe: wodowskaz, spiętrzenie, monitoring hydrologiczny, mały zbiornik wodny

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr hab. Bogusław Michalec, prof. UR, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, dr hab. inż. Andrzej Wałęga, dr inż. Agnieszka Cupak, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24-28, 30-059 Kraków; mgr inż. Andrzej Michalec, Architekt IT, IBM, ul. Armii Krajowej 18, 30-150 Kraków; mgr inż. Anna Połowska-Wróbel, Biuro do Spraw Dorzecza Górnej Wisły, Małopolski Urząd Wojewódzki w Krakowie, Małopolski Urząd Wojewódzki w Krakowie, ul. Basztowa 22, 31-155 Kraków; e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl, a.walega@ur.krakow.pl, a.cupak@ur.krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

WSTĘP

Zgodnie z obowiązującymi przepisami, tj. Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie [Rozporządzenie... 2007], wszystkie budowle piętrzące powinny być wyposażone w urządzenia kontrolno-pomiarowe, w tym w umożliwiające obserwacje i pomiary zarówno stanów wody górnej i wody dolnej oraz stanu wód na głównych dopływach [*ibidem*: §119]. Wyjątkiem są budowle piętrzące o wysokości piętrzenia niższej niż 2,0 m i pojemności zbiornika mniejszej od 0,2 mln m³, które nie muszą być wyposażane w urządzenia kontrolno-pomiarowe [*ibidem*: §120 ust. 2]. Przepisy te nie dotyczą zatem budowli piętrzących, dla których przed dniem wejścia w życie rozporządzenia została wydana decyzja o pozwoleniu na budowę lub został złożony wniosek o jej wydanie. Natomiast według ustawy Prawo wodne [Ustawa... 2012] zgodnie z art. 64 ust. 2b użytkownik budowli piętrzącej, o wysokości piętrzenia powyżej 1 m i przepływie średnim rocznym (*SSQ*) powyżej 1,0 m³ · s⁻¹, jest obowiązany do prowadzenia dziennika gospodarowania wodą. W dzienniku tym zamieszcza się odczyty wodowskazowe, pojemność zbiornika, dopływy do zbiornika lub stopnia, odpływ ze zbiornika lub stopnia z poszczególnych urządzeń upustowych, a także pobory wody przez poszczególne zakłady [*ibidem*: art. 64 ust. 2c]. Oznacza to, że w praktyce każdy mały zbiornik wodny, jako obiekt piętrzący o wysokości piętrzenia większej od 1 m, powinien być wyposażony między innymi w wodowskaz umożliwiający rejestrację stanu wód na dopływach. Dysponowanie informacją o aktualnym dopływie wód do zbiornika jest niezbędne do podejmowania odpowiednich decyzji związanych z gospodarowaniem wodą na obiekcie.

Małe zbiorniki wodne zlokalizowane są przeważnie na ciekach nieobjętych monitoringiem hydrologicznym. Przykładem są zbiorniki wodne w Zesławicach na rzece Dłubni, znajdujące się w granicach miasta Krakowa. Zbiorniki te pierwotnie miały pełnić funkcję przeciwpowodziową, lecz ze względu na znacznie zredukowaną ich pojemność pełnią jedynie funkcję rekreacyjną i służą do wyrównywania stanów niżówkowych w korycie Dłubni. W ciągu całego okresu eksploatacji zbiorników, obejmującego ponad 48 lat, ekstremalne wezbrania spowodowały zagrożenie powodziowe zarówno powyżej, jak i poniżej zbiorników. Szczególne skutki wezbrania miały miejsce 18 lipca 2010 roku. Wezbranie to spowodowało zatopienie zabudowań w Zesławicach, znajdujących się poniżej zapory zbiorników [Michalec 2012]. W następstwie tego zdarzenia Krakowski Związek Spółek Wodnych został decyzją wodnoprawną zobligowany do wykonania posterunku wodowskazowego ze stacją telemetryczną, który powinien być zlokalizowany w przekroju Dłubni powyżej zbiorników. Zadaniem tego posterunku miało być umożliwienie określenia natężenia przepływu wody dopływającej do zbiorników w celu optymalnego gospodarowania wodą zbiorników wodnych w Zesławicach. Projekt posterunku wodowskazowego na rzece Dłubni został opracowany w listopadzie 2011 roku [Michalec i in. 2011]. Posterunek ten nie został wykonany. W październiku 2014 roku wygasło pozwolenie wodnoprawne na piętrzenie wód w zbiornikach w Zesławicach. Zgodnie z nowym pozwoleniem wymóg dotyczący monitoringu stanu wód dopływających powinien być spełniony.

Na przełomie września i października 2014 roku Bogusław Michalec i Andrzej Michalec z własnej inicjatywy i dysponując prywatnymi środkami finansowymi, doko-

nali instalacji posterunku wodowskazowego w przekroju rzeki Dłubni w Batowicach (ryc. 1). Przekrój ten zlokalizowano w strefie oddziaływania spiętrzenia wód Dłubni zaporą zbiorników w Zesławicach. Zainstalowana stacja wodowskazowa jest autorskim projektem informatyka i elektronika Andrzeja Michalca, stanowiąc konkurencyjne urządzenie dla tego typu stacji, oferowanych przez producentów krajowych i zagranicznych. Przewagą tego urządzenia jest jego cena jednostkowa, średnio niższa 4–5-krotnie od średnich cen urządzeń komercyjnych. Założeniem twórcy stacji wodowskazowej było stworzenie konkurencyjnego taniego i zarazem niezawodnego urządzenia, umożliwiającego zmniejszenie kosztów instalacji i eksploatacji. Zainstalowana stacja zasilana jest z ogniw solarnych i posiada wbudowany akumulator, umożliwiający autonomiczną pracę, nawet w okresach całkowitego zachmurzenia. Po ponad rocznych testach laboratoryjnych stacja została zainstalowana i działa nieprzerwanie w warunkach terenowych od lipca 2014 roku. Docelowo autorzy pracy planują stworzenie osłony hydrologiczno-meteorologicznej w zlewni zbiorników w Zesławicach. W tym celu zostanie założone kilka stacji wodowskazowych i pluwiografowych na terenie zlewni rzeki Dłubni. Jest to tym bardziej istotne, że na Dłubni nie ma obecnie żadnych wodowskazów należących do IMGW. Wodowskaz IMGW w Zesławicach został zlikwidowany. Poniżej zbiornika na Dłubni znajduje się automatyczna stacja telemiograficzna z ciągłym przekazem danych do sterowni jazu na Dłubni. Linia łącząca stację ze sterownią została uszkodzona w 2013 roku. Stacja ta jest własnością Krakowskiego Związku Spółek Wodnych.

Założona stacja wodowskazowa została zlokalizowana w przekroju Dłubni w kilometrze 10+247, tj. 102 m powyżej przekroju przyjętego w projekcie posterunku wodowskazowego na rzece Dłubni [Michalec i in. 2011]. Według obliczeń przedstawionych w projekcie proponowany przekrój znajduje się w strefie oddziaływania piętrzenia wody w zbiornikach w Zesławicach. Wpływ spiętrzenia zwierciadła wody na zmiany krzywej natężenia przepływu jest przeważnie okresowy, a krzywe natężenia przepływu dla przekrojów koryt naturalnych i sztucznych nie mają cech trwałości i ścisłości. Spośród czynników mających wpływ na trwałe zmiany związku stan–przepływ najczęściej wymienia się procesy akumulacji i erozji materiału dennego, powodujące zmiany poziomu zera wodowskazu, zmiany przekroju poprzecznego rzeki. Skutkiem tych zmian jest niejednokrotnie zmniejszenie przepustowości koryta, nawet o 40–50% [Oleszczuk i in. 2014]. Zmiany krzywej natężenia przepływu spowodowane spiętrzeniem zwierciadła wody są przeważnie okresowe i są m.in. spowodowane zjawiskami lodowymi, zarastaniem przekrojów czy też zatorami. Stały wpływ spiętrzenia wody w cieku na związek stan–przepływ dotyczy szczególnych przypadków, takich kiedy wodowskaz został zlokalizowany w strefie cofki utworzonej w warunkach normalnego piętrzenia wody budowlą piętrzącą.

W pracy dokonano analizy stałego wpływu spiętrzenia wody w cieku na związek stan–przepływ, spowodowanego układem dna cieku w profilu podłużnym. Przedstawiono również przyjętą metodykę wyznaczenia krzywej natężenia przepływu dla przekroju zlokalizowanego w strefie oddziaływania spiętrzenia przepływów w przekroju rzeki Dłubni, znajdującym się w zasięgu cofki zbiorników wodnych w Zesławicach.

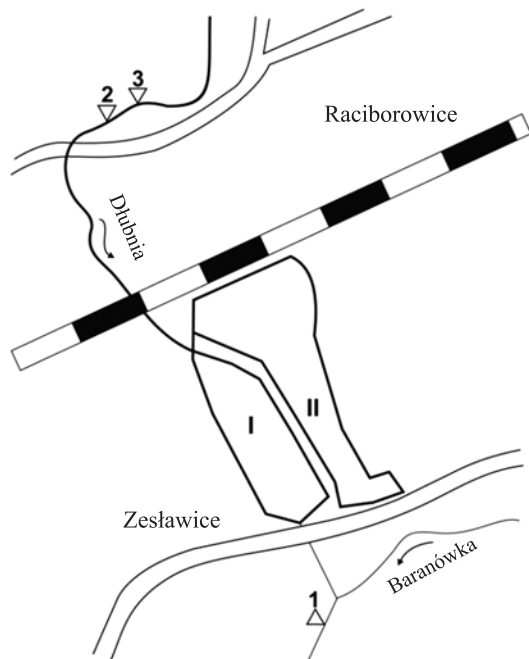


Ryc. 1. Automatyczna stacja wodowskazowa w Batowicach: a) maszt z panelem solarnym i skrzynką z modułami elektronicznymi, b) instalacja oprogramowania do modułów sterowania w skrzynce stacji, c) pal (ceownik stalowy) z zamontowanym czujnikiem ciśnienia – przed wbiciem w dno Dłubni

Fig. 1. Automatic water-gauge station in Batowice: a) mast with solar panel and electronic modules box, b) the installation of the software to control modules in the station box, c) pole (C-rail) with integrated pressure sensor – before inserting in the bottom of Dłubnia river

METODYKA

W przekroju poprzecznym w kilometrze 10+247 rzeki Dłubni, w którym znajduje się czujnik automatycznej stacji wodowskazowej, wykonano pomiary geodezyjne i pomiary hydrometryczne prędkości przepływu wody. Przekrój ten oznaczono symbolem 3 na ryc. 2. Przekrój 2 na tej rycinie to przekrój, w którym zgodnie z projektem posterunku wodowskazowego, opracowanym w 2011 roku, miał pierwotnie znajdować się wodowskaz założony przez Krakowski Związek Spółek Wodnych.



Ryc. 2. Lokalizacja przekrojów wodowskazowych na rzece Dłubni: 1 – dawny wodowskaz Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 2 – projektowany, 3 – przekrój automatycznej stacji wodowskazowej, oraz zbiorniki wodne w Zesławicach: I – zbiornik główny, II – zbiornik remontowy

Fig. 2. Location of water-gauge stations on the Dłubnia river: 1 – old water-gauge of Institute of Meteorology and Water Management, 2 – designed one, 3 – cross-section of automatic water-gauge, and water reservoirs at Zesławice: I – main reservoir, II – assistant reservoir

Pomiary geodezyjne przekroju poprzecznego i spadku podłużnego zwierciadła wody wykonano za pomocą niwelatora Topcon AT-G6, natomiast pomiary hydrometryczne za pomocą młynka indukcyjnego Nautilus C2000 firmy OTT Hydrometrie. Pomiary geodezyjne spadku podłużnego zwierciadła wody i dna rzeki Dłubni wykonano na odcinku 268 m poniżej przyjętego przekroju wodowskazowego w kilometrze 10+247, a także na odcinku 136 m powyżej tego przekroju. W trakcie prac geodezyjnych wykonano także pomiary rzędnych dna, brzegów i terenów przybrzeżnych. Prace te wykonano w dniach 30.09.–03.10.2014.

Krzywą natężenia przepływu wyznaczono zgodnie z ogólnie przyjętą metodyką przedstawioną w pracach Byczkowskiego [1996], Bajkiewicz-Grabowskiej i Mikulskiego [1999], Szkutnickiego i in. [2007]. W celu określenia związku stan–przepływ pomiary prędkości przepływu wody wykonano przy zróżnicowanych przepływach. Pomiary hydrometryczne wykonywano zarówno przed założeniem posterunku wodowskazowego, jak również po jego wykonaniu. W przekroju wodowskazowym wyznaczano pion hydro-metryczne w odległościach 0,4–0,6 m. W każdym z pionów, w zależności od napełnienia wykonywano pomiar prędkości przepływu wody na co najmniej trzech wysokościach

pionu hydrometrycznego [Procedura pomiarowa... 2002]. Przepływ całkowity obliczano metodą Harlachera [Byczkowski 1996]. W trakcie pomiarów hydrometrycznych wykonano również kontrolne pomiary geodezyjne przekroju poprzecznego i spadku zwierciadła wody. Wyniki tych pomiarów umożliwiły przeprowadzenie weryfikujących obliczeń przepływu według wzoru Chézy'ego, w którym współczynnik szorstkości koryta przyjęto z tablic Ven Te Chow [Książczyński i in. 2000], a współczynnik prędkości obliczono wzorem Manninga.

Wyniki obliczeń krzywej natężenia przepływu, opracowanej na podstawie obliczeń hydraulicznych wzorem Chézy'ego, porównano z krzywą natężenia przepływu opracowaną na podstawie pomiarów hydrometrycznych. Krzywa ta została opisana za pomocą równania Bubendeya [Byczkowski 1996], rozwiązując poniższy układ równań:

$$an + b \sum_1^n H_i + c \sum_1^n H_i^2 = \sum_1^n Q_i \quad (1)$$

$$a \sum_1^n H_i + b \sum_1^n H_i^2 + c \sum_1^n H_i^3 = \sum_1^n Q_i H_i \quad (2)$$

$$a \sum_1^n H_i^2 + b \sum_1^n H_i^3 + c \sum_1^n H_i^4 = \sum_1^n Q_i H_i^2 \quad (3)$$

Układ równań rozwiązano metodą wyznaczników, tj. określając wyznaczniki współczynników a , b i c z ilorazów wyznaczników zapisanych w postaci: $c = Wa/W$, $b = Wb/W$ i $a = Wc/W$. Natężenie przepływu dla danego stanu wody obliczono z równania Bubendeya:

$$Q = a \cdot h^2 + a \cdot h + c \quad (4)$$

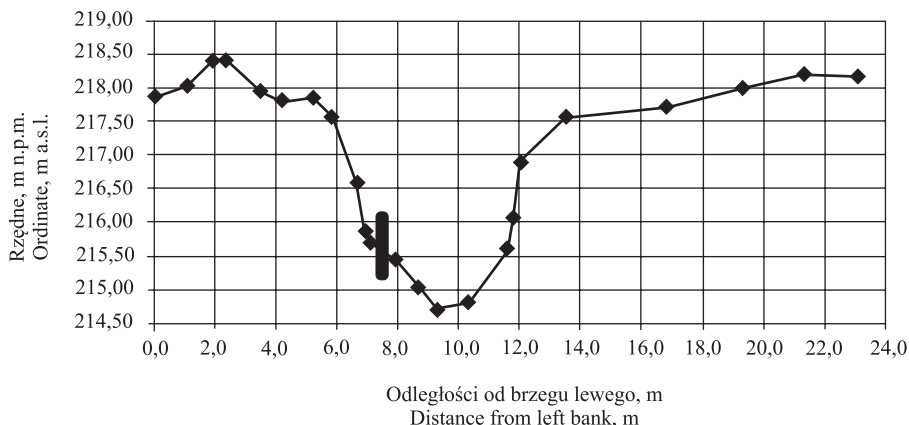
gdzie:

Q – natężenie przepływu, $m^3 \cdot s^{-1}$,
 h – napełnienie w korycie, m.

Obliczenia zasięgu cofki zbiorników w Zesławicach i spiętrzenie wody w zasięgu cofki obliczono według wzoru Tolkmitta [Sobota 1984, Książczyński i in. 2000].

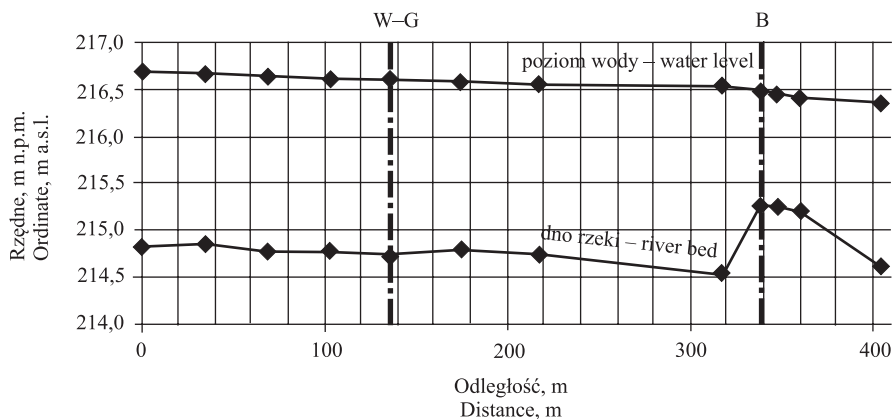
WYNIKI BADAŃ I DyskusJA

Przekrój poprzeczny na rzece Dłubni (ryc. 3), w którym zainstalowano czujnik ciśnienia automatycznej stacji wodowskazowej, znajduje się w strefie oddziaływania spiętrzenia wód w zbiornikach wodnych w Zesławicach. Na ryc. 3 przedstawiono profil podłużny zwierciadła wody przy stanie w przekroju wodowskazowym wynoszącym 216,61 m n.p.m., co odpowiada napełnieniu 1,89 m. Spiętrzenie to ma miejsce po przekroczeniu rzędnej piętrzenia 216,50 m n.p.m. w zbiornikach, przy czym normalny poziom piętrzenia (N.P.P.) wynosi 215,00 m n.p.m., a maksymalny poziom piętrzenia (Max.P.P.) jest równy 216,60 m n.p.m., a poziom awaryjny to 218,00 m n.p.m. W normalnych warunkach eksploatacji, tj. przy zachowaniu rzędnej N.P.P., następuje spiętrzenie przepływów niskich i średnich spowodowane oddziaływaniem dna rzeki Dłubni w przekroju mostu drogowego na drodze powiatowej Batowice–Raciborowice (ryc. 4), który znajduje się 203 m poniżej tego przekroju.



Ryc. 3. Przekrój poprzeczny w km 10+247 rzeki Dłubni, w którym zainstalowano wodowskaz. Zaznaczono miejsce wbicia pała z czujnikiem ciśnienia

Fig. 3. Cross-section at kilometer 10+247 of Dłubnia river where the water-gauge was installed. The location of the pole when the pressure sensor was marked



Ryc. 4. Profil podłużny rzeki Dłubni; W-G – stacja wodowskazowa, B – most

Fig. 4. Longitudinal profile of the Dłubnia river; W-G –water-gauge station, B – bridge

Pomiary hydrometryczne prędkości przepływu wody wykonano w zakresie napieńni w przekroju wynoszącym od 1,55 do 2,02 m (tabela 1). Wykonując pomiary hydrometryczne przy różnych napienieniach w korycie Dłubni, określono również spadek zwierciadła wody.

Ze względu na niewielkie zróżnicowanie wartości spadku zwierciadła wody przy różnych napienieniach, mieszczące się w granicach błędu pomiaru geodezyjnego, przyjęto w obliczeniach wartość średnią spadku zwierciadła wody w tym przekroju, obliczoną na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 1, wynoszącą 0,661‰.

Przepływy obliczone metodą Harlachera na podstawie danych hydrometrycznych wraz z przepływami obliczonymi wzorem Chézy’ego zamieszczono w tabeli 2.

Przeptywy obliczone wg wzoru Chézy'ego są znacznie wyższe od określonych metodą Harlachera na podstawie danych hydrometrycznych. Przy napelnieniu $h = 1,55$ m przepływ obliczony wzorem Chézy'ego jest ponad 5-krotnie wyższy od obliczonego na podstawie pomiarów hydrometrycznych. Wraz ze wzrostem napelnienia ta różnica ulega zmniejszeniu – natężenie przepływu obliczone wzorem Chézy'ego są nieznacznie ponad 2-krotnie wyższe od określonych metodą Harlachera dla napelnień wynoszących 1,99 i 2,02 m.

Tabela 1. Napelnienia, rzędne i spadki zwierciadła wody w przekroju zainstalowanego wodowskazu

Table 1. Water depth, ordinates and slopes of water in cross-section of installed water-gauge

Napelnienia h w korycie rzeki Dłubni Water depth h in the Dłubnia river m	Rzędne zwierciadła wody w przekroju Water ordinates in cross section m n.p.m. – m a.s.l.	Spadki zwierciadła wody i Water slopes i ‰
1,55	216,27	0,659
1,62	216,34	0,659
1,64	216,36	0,659
1,84	216,56	0,661
1,89	216,61	0,661
1,96	216,68	0,662
1,99	216,71	0,662
2,02	216,74	0,663

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń natężenia przepływu całkowitego w przekroju zainstalowanego wodowskazu

Table 2. Results of calculations of total discharges at cross-section of installed water-gauge

Napelnienie w korycie rzeki Dłubni Water depth in Dłubnia river h , m	Rzędna zwierciadła wody Water ordinate m n.p.m. – m a.s.l.	Przeptyw Q , $m^3 \cdot s^{-1}$, obliczony na podstawie Discharge Q , $m^3 \cdot s^{-1}$, calculated according to	
		pomiarów hydrometrycznych hydrometric measurements	wzoru Chézy'ego Chézy equation
1,55	216,27	0,98	5,31
1,62	216,34	1,19	5,79
1,64	216,36	1,22	5,93
1,84	216,56	2,10	7,40
1,89	216,61	2,64	7,77
1,96	216,68	2,84	8,25
1,99	216,71	3,81	8,46
2,02	216,74	4,10	8,67

Przyczyną tak znacznych różnic uzyskanych wyników obliczeń natężania przepływu dla danego napełnienia jest morfologia koryta Dłubni poniżej przekroju zainstalowanej automatycznej stacji wodowskazowej. Koryto Dłubni w tym przekroju jest przegłębione w stosunku do dna w przekroju mostu (ryc. 4), a różnica rzędnych dna wynosi 0,54 m. Taki układ dna powoduje spiętrzenie przepływów niskich i średnich. Według obliczeń napełnienie dla najniższego z pomierzonych natężeń przepływu $Q = 0,983 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ powinno wynosić ok. 0,74 m, a nie 1,55 m, jak stwierdzono w trakcie pomiarów. Obliczenia te zostały wykonane dla modelowego schematu obliczeniowego, w którym spadek zwierciadła wody jest równy spadkowi dna cieku. Na ryc. 5 przedstawiono krzywą natężenia przepływu opracowaną dla prędkości przepływu wody obliczonych wzorem Chézy'ego (linia przerywana) i obliczoną na podstawie wyników pomiarów hydrometrycznych metodą Bubendeya (linia ciągła).

Równanie krzywej natężenia przepływu w przekroju wodowskazowego, określone metodą Bubendeya, ma postać:

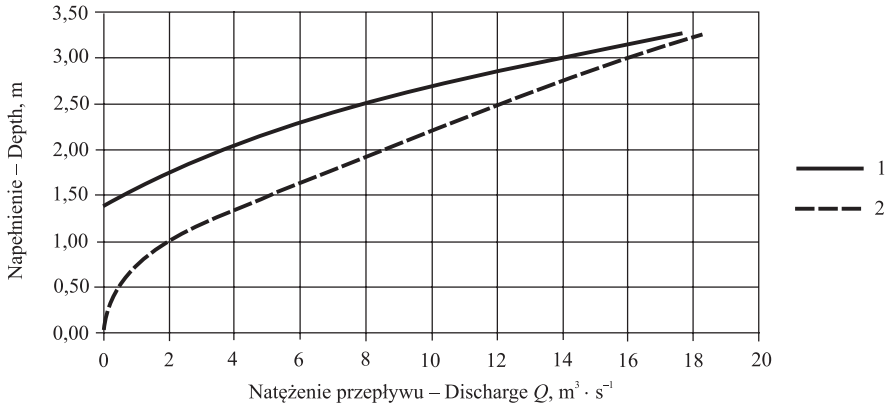
$$Q = 2,87008 \cdot h^2 - 9,95338 \cdot h - 0,00447 \quad (5)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (4).

Krzywa natężenia przepływu obliczona na podstawie prędkości przepływu wody za pomocą wzoru Chézy'ego, oznaczona linią przerywaną na ryc. 5, nie uwzględnia wpływu spiętrzenia zarówno przepływów w zakresie stanów niskich, jak i wpływu piętrzenia wody w zbiornikach w Zesławicach. Krzywa opracowana według równania Bubendeya (linia ciągła na ryc. 5), tj. na podstawie wyników pomiarów hydrometrycznych, uwzględnia wpływ mostu na przepływy w zakresie stanów niskich. Ze względu na spiętrzenie wywołane układem dna w świetle mostu krzywa według równania Bubendeya jest ważna dla napełnień w korycie rzeki Dłubni w przekroju wodowskazowym mieszczących się w przedziale od $h = 1,38 \text{ m}$ do $h = 3,26 \text{ m}$. Maksymalny przepływ brzegowy obliczony według równania Bubendeya, dla napełnienia wynoszącego 3,26 m, jest równy $17,62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i jest mniejszy o 3,7% od przepływu obliczonego zgodnie z wzorem Chézy'ego, wynoszącego $18,27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Krzywa wykreślona według równania Bubendeya (ryc. 5) nie uwzględnia wpływu spiętrzenia wód Dłubni zaporą zbiorników w Zesławicach. Obliczenia spiętrzenia według formuły Tolkmitta wykonano dla napełnień w przekroju mostu i w przekroju wodowskazowym (tab. 3), przyjmując poziom zwierciadła wody w zbiornikach wynoszące 215,50 m n.p.m. i 216,60 m n.p.m., który odpowiada Max.P.P. oraz 218,00 m n.p.m., będący poziomem awaryjnym (tab. 3). Ze względu na brak danych pomiarowych spadek zwierciadła wody, wykonanych przy przejściu wód wezbraniowych, przyjęto spadek dna na obcinku 1634 m, przy czym odległość od zapory do końca zbiorników wynosi 650 m. Jest to odległość od przekroju zapory do przekroju mostu. Spadek ten wynosi 0,67‰.

Nieznaczne spiętrzenie wody w zbiorniku, tj. wynoszące kilkadziesiąt centymetrów ponad normalny poziom piętrzenia, wynoszący 215,00 m n.p.m., spowoduje nieznaczne spiętrzenie przepływów w przekroju wodowskazowym. Jak wynika z obliczeń (tab. 3) spiętrzenie zwierciadła wody w przekroju wodowskazowym zwiększy się teoretycznie o 0,26 m przy zwiększeniu piętrzenia wody w zbiorniku z rzędnej 215,00 do 215,50 m n.p.m. Spiętrzenie to będzie wynosić 1,88 m gdy poziom wody w zbiorniku osiągnie 218,00 m n.p.m.



Ryc. 5. Krzywe natężenia przepływu w przekroju wodowskazowym w km 10+247 rzeki Dłubni; 1 – wg równania Bubendeya, 2 – według pomiarów

Fig. 5. The rating curves for water-gauge in cross-section at kilometer 10+247 of Dłubnia river; 1 – acc. to Bubendeya's equation, 2 – acc. to measurements

Tabela 3. Wyniki obliczeń spiętrzenia wody w przekroju mostu i wodowskazu dla różnych poziomów wody w zbiornikach (W.L.)

Table 3. Results of calculations of water damming up in cross-section of the bridge and of the water-gauge for different water level (W.L.) in reservoirs

W.L. m n.p.m. m a.s.l.	H m	Z m	$(H + Z)$ $\cdot H^{-1}$	$\varphi(H + Z)$ $\cdot H^{-1}$	L km	Przekrój mostu Cross-section of the bridge		Przekrój wodowskazu Cross-section of the water-gauge	
						$\varphi(H + z)$ $\cdot H^{-1}$	z m	$\varphi(H + z)$ $\cdot H^{-1}$	z m
215,50	3,75	3,0	1,133	0,793	6,43	0,590	0,26	0,465	0,17
216,50	4,75	1,5	1,316	1,134	11,64	0,974	1,05	1,081	1,38
218,00	6,25	0,5	1,480	1,367	18,47	1,245	1,88	1,170	2,13

H – napelnienie przed zaporą zbiorników w Zesławicach – water depth in front of the dam of Zesławice reservoirs, Z – spiętrzenie w przekroju budowli piętrzącej – accumulation in cross-section of accumulation building, z – spiętrzenie w przekroju wodowskazowym – accumulation in cross-section, L – zasięg cofki – area of backflow

WNIOSKI

Poprawne określenie związku stanów i przepływów w danym przekroju wodowskazowym wymaga uwzględnienia wpływu spiętrzenia przepływów w całym zakresie napelnienia. Na kształt krzywej natężenia przepływu może mieć wpływ układu dna, lub może mieć wpływ oddziaływania spiętrzenia wody w zbiorniku wodnym. Wpływ obu tych czynników stwierdzono w przypadku opracowywania krzywej natężenia przepływu w przyjętym przekroju wodowskazowym rzeki Dłubni. Jak wykazały obliczenia,

nieuwzględnienie tych czynników spowodowałoby określenie zawyżonej przepustowości koryta Dłubni w rejonie stacji wodowskazowej.

Przyczyną uzyskanej różnicy wyników obliczeń natężenia przepływu na podstawie wyników pomiarów i obliczeń wg wzoru Chézy'ego w przekroju wodowskazowym jest wpływ spiętrzenia wody spowodowany układem dna poniżej tego przekroju. Istotny wpływ na warunki przepływu wody przy przepływach niskich i średnich ma wzniesienie dna w świetle mostu, którego rzędna jest o 0,54 m wyższa od rzędnej w przekroju wodowskazowym. Na kształt krzywej natężenia w tym przekroju ma również wpływ spiętrzenie wody w zbiornikach w Zesławicach, które jak wynika z Instrukcją gospodarowania wodą, utrzymania i eksploatacji zbiornika [Instrukcja... 2003] następuje w warunkach powodzi. Według tego dokumentu okres powodzi występuje wtedy, gdy dopływ wody do zbiorników przekracza $17,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartość ta jest nieznacznie wyższa od określonego przepływu brzegowego, obliczonego według równania Bubendeya. Wówczas następuje stopniowe podnoszenie zamknięć na jazie do momentu uzyskania odpływu wody ze zbiornika nieprzekraczającego przepływu brzegowego dla dolnego stanowiska w ilości $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Gdy natężenie dopływu wody do zbiornika wzrastając przekroczy wartość odpływu ze zbiorników, wynoszącą $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, wówczas następuje piętrzenie wody w zbiorniku do rzędnej 216,50 m n.p.m. [Instrukcja... 2003]. Oznacza to, że przedstawiona na ryc. 5 krzywa natężenia przepływu odpowiada normalnym warunkom eksploatacji zbiorników, tzn. gdy poziom zwierciadła wody w zbiornikach jest równy rzędnej normalnego poziomu piętrzenia (N.P.P.). W przypadku zwiększenia rzędnej piętrzenia następuje spiętrzenie wody w przekroju wodowskazowym. W zależności od coraz wyższego poziomu piętrzenia, wyższego od N.P.P., dany przepływ w przekroju wodowskazowym będzie spiętrzony o odpowiednio coraz wyższą wartość. Określenie tej zależności wymaga wykonania pomiarów hydrometrycznych.

Wyniki przeprowadzonej analizy są istotne nie tylko ze względu na skorygowanie zasad gospodarowania wodą w zbiorniku, której efektem powinno być niedopuszczenie do uzyskania maksymalnego poziomu piętrzenia w zbiorniku. Drugim ważnym aspektem jest wykorzystanie uzyskanych wyników w analizach oceny zarówno zagrożenia, jak i ryzyka powodziowego terenów znajdujących się w zasięgu cofki zbiorników w Zesławicach.

PIŚMIENNICTWO

- Bajkiewicz-Grabowska, E., Mikulski, Z. (1999). Hydrologia ogólna. PWN, Warszawa.
- Byczkowski, A. (1996). Hydrologia. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne. Dz.U. z 2012 r., poz. 145 z późn. zm.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. Dz.U. z 2007 r. Nr 86, poz. 579.
- Instrukcja gospodarowania wodą, utrzymania i eksploatacji zbiornika (2003). Maszynopis. Archiwum Krakowskiego Związku Spółek Wodnych, Kraków.
- Książczyński, K., Jeż, P., Gręplowska, Z. (2000). Tablice do obliczeń hydraulicznych. Wyd. 2 poprawione i uzupełnione. Politechnika Krakowska, Kraków.

- Michalec, B. (2012). Wyznaczenie krzywej natężenia przepływu dla przekroju w strefie oddziaływania spiętrzenia przepływów niskich., *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 11 (3), 61–70.
- Michalec, B., Tarnawski, M., Olearczyk, D., Stonawski, J. (2011). Projekt posterunku wodowskazowego na rzece Dłubni umożliwiającego kontrolę dopływu wody do zbiornika wodnego Zesławice. Opracowanie wykonane na zlecenie Krakowskiego Związku Spółek Wodnych w Krakowie, z dnia 10.10.2011. Maszynopis. Archiwum Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- Oleszczuk, R., Urbański, J., Gąsowska, M. (2014). The influence of morphological changes of small lowland river on discharge rate. *Ann. Warsaw Univ. Life Sci. – SGGW, Land Reclam.*, 46(4), 279–290.
- Procedura pomiarowa (2002). Pomiar natężenia przepływu za pomocą młynka hydrometrycznego – wykonany w bród. IMGW/PSHM/SPO/POM/2002. Maszynopis.
- Sobota, J. (1984). *Hydraulika i elementy hydromechaniki*. AR, Wrocław.
- Szkutnicki, J., Kadłubowski, A., Chudy, Ł. (2007). *Metody wyznaczania krzywej natężenia przepływu*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.

DETERMINATION OF THE RATING CURVE IN THE BACKWATER CROSS-SECTION OF RESERVOIRS AT ZESŁAWICE

Summary. In the paper, results of geodesic and hydrometric measurements were presented, also calculations for need of preparation of rating curve in cross-section of Dłubnia river, located in 10+247 kilometer were made. Geodesic measurements of cross-section and longitudinal water level slope were made with use Topcon AT-G6 leveler, and eight hydrometric measurements were made with use Nautilus C2000 OTT Hydrometrie current meter. Discharge was calculated with use Harlacher method based on hydrometric data and with use Chézy equation. It was ascertained, that low and average flows are medium five times higher to those calculated with use Harlacher method. The cause of such a significant differences in flow calculations for given damming up is a composition of the bottom of the river. It was ascertained, that essential influence on condition of water flows in case of low and average flows has an upgrade of the bottom in clear span, which is 203 m below of gauging section. It was also ascertained, that on shape of rating curve, in this cross section, also a damming up in Zesławice reservoirs has an influence.

Key words: water-gauge, damming up, hydrological monitoring, small reservoirs

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 10.03. 2016

Do cytowań – For citation: Michalec, B., Wałęga, A., Cupak, A., Michalec, A., Połoska-Wróbel, A. (2016). Wyznaczenie krzywej natężenia przepływu w przekroju cofki zbiorników wodnych w Zesławicach. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(1), 113–124.