

**Bogusław MICHALEC, Tarnawski MAREK, Agata MAJERCZYK,
Katarzyna WACHULEC**

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Department of Water Engineering and Geotechnics, University of Agriculture in Krakow

Weryfikacja krzywej natężenia przepływu w przekroju wodowskazowym na rzece Uszwicy

Verification of a rating curve in a gauge cross-section on the Uszwica River

Słowa kluczowe: wodowskaz, krzywa natężenia przepływu, przepływ nienaruszalny

Key words: water gauge, rating curve, base flow

Wprowadzenie

Zwiększający się deficyt wody wymaga potrzebę kontrolowania przepływów niskich, szczególnie na ciekach, na których zlokalizowane są ujęcia wody. Właściwa eksploatacja ujęcia wymaga zachowania w korycie poniżej niego przepływu nienaruszalnego, gwarantującego odpowiednie warunki dla przeżycia organizmów wodnych. Nieodzowne w tym celu jest prowadzenie obserwacji hydrologicznych w przekroju wodowskazowym poniżej ujęcia, które polegają na rejestracji stanów wody umożliwiających określenie przepływów. Coraz częściej w tym celu wykorzystywane są stacje

automatycznego pomiaru stanu wody, a także natężenia jej przepływu (Poppek i in. 2011). Natężenie przepływu mierzone jest na posterunku wodowskazowym sporadycznie, a stany wody powinny być obserwowane systematycznie, w sposób ciągły przez cały rok hydrologiczny (Byczkowski 1996). Określenie przepływu na podstawie rejestrowanego stanu jest możliwe na podstawie związku funkcyjnego między napełnieniem w korycie i natężeniem przepływu wody w obserwowanym przekroju – $Q = f(H)$, który może być przedstawiony za pomocą krzywej natężenia przepływu, nazywaną też krzywą konsumcyjną. Zależność między stanami wody a przepływami jest jednoznaczna tylko wtedy, kiedy zachowane są warunki przepływu, tj. między innymi niezmiennie opory przepływu spowodowane szorstkością koryta, prędkości przepływu wody w po-

szczególnych częściach przekroju koryta (Czetwertyński 1958). Warunki te mogą jednak ulegać zmianom, spowodowanym między innymi sezonowymi zmianami wywołanymi np. pojawieniem się pokrywy lodowej lub zarastaniem koryta w okresie wegetacji roślin, zmianami podłużnego spadku zwierciadła wody w rzece, kształtu przekroju poprzecznego koryta i doliny rzecznej oraz zmianami warunków pomiaru stanu wody (Ozga-Zielińska i Brzeziński 1997).

Procesy erozji lub depozycji materiału mineralnego są jedną z najczęstszych przyczyn wykształcenia się nowego przekroju poprzecznego koryta, powodując przy tym przesunięcie się zera wodowskazowego. Ma to istotny wpływ nie tylko na prawidłowe określenie napełnienia na podstawie dokonanego odczytu stanu na wodowskazie, ale również na określenie natężenia przepływu. W wyniku zmiany geometrii przekroju i spadku lokalnego dna powstaje nowa zależność napełnienie – przepływ, a tym samym inny kształt i położenie krzywej natężenia przepływu, którą należy zatem systematycznie uaktualniać dla każdego posterunku wodowskazowego. Ustalając lokalizację przekroju posterunku wodowskazowego, należy uwzględnić wpływ procesów erozji i depozycji materiału na zmianę przekroju. Nasilenie tych procesów występuje szczególnie na dolnych stanowiskach budowli piętrzących.

Celem pracy jest określenie przyczyn zmian krzywej natężenia przepływu w przekroju wodowskazowym w Brzesku, zlokalizowanym w km 37+257 rzeki Uszwicy, a także określenie zmian stanów odpowiadających przepływowi nienaruszalnemu.

Material i metodyka badań

Zmiany przekroju poprzecznego koryta wynikające ze zjawiska erozji oraz akumulacji mają między innymi miejsce na dolnym stanowisku betonowego jazu stałego w Brzesku-Okocimiu. Jaz ten (rys. 1), znajdujący się w km 37+300 rzeki Uszwicy (Niedbała i in. 2005), został wybudowany w miejsce dawnego jazu drewnianego na początku ubiegłego stulecia celem ujęcia wód dla lokalnego browaru piwowarskiego (Tarnawski i Michalec 2007). Istniejące powyżej jazu ujęcie brzegowo-komorowe pozwala na pobór wód powierzchniowych na potrzeby zakładów piwowarskich do celów produkcyjnych i gospodarczych.

Uszwica jest rzeką II rzędu i ma swój początek w Beskidzie Wyspowym, w okolicach Rajbrotu (góra Kobyła), na wysokości około 500 m n.p.m. Jako prawobrzeżny dopływ uchodzi do Wisły w 150,7 km jej biegu (Michalec i Tarnawski 2010). Całkowita długość cieków wynosi 61,2 km, a powierzchnia zlewni 325,2 km². Uszwica jest rzeką pogórską z charakterystyczną zmiennością stanów wody spowodowanych szybkim i znacznym odpływem wody ze zlewni. Przyczyną tego zjawiska są słabo przepuszczalne podłoże fliszowe, coraz gęstsza zabudowa obszaru zlewni i wynikająca z tego coraz większa wartość wskaźnik stopnia uszczelnienia zlewni oraz redukcja obszarów leśnych. Czynniki te prowadzą do nasilenia się zjawisk degradacji i agradacji w zlewni, a także przyczyniają się nasileniu procesów fluwialnych w korycie rzeki, zwłaszcza na dolnym stanowisku jazu. Przelew jazu ma szerokość 27,61 m, a wysokość piętrzenia wynosi 5,37 m (Niedbała i in.



RYSUNEK 1. Lokalizacja przekroju wodowskazowego (P-P) w km 37+257 rzeki Uszwicy
 FIGURE 1. Localization of water-gauge cross-section (P-P) in km 37+257 of the Uszwica River

2005), co zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska ... (2007) klasyfikuje ten obiekt do klasy III budowli hydrotechnicznych. Jaz ten zamyka zlewnię Uszwicy, która ma powierzchnię 184 km².

Poniżej płyty wypadu jazu, w km 37+257 rzeki Uszwicy (rys. 1), została wykonana w 2006 roku łata wodowskazowa według projektu z 2005 roku (Niedbała in. 2005). Służy do rejestracji stanów niskich, a opracowany związek stan – przepływ pozwala na określenie przepływu nienaruszalnego. Rejestracja przepływów małych jest obowiązkiem eksploatatora ujęcia. Zgodnie z pozwoleniem wodnoprawnym w warunkach przepływów o mniejszym natężeniu od przepływu nienaruszalnego ($Q_n = 0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) jest on zobowiązany przerwać pobór wody na ujęciu.

W miesiącach jesiennych w okresie od 2009 do 2011 roku wykonano pomia-

ry przekroju poprzecznego koryta cieku oraz spadku dna i zwierciadła wody. Pomiar geodezyjne zrealizowano za pomocą niwelatora typu AT-G6. W analizowanym przekroju wykonywano również pomiary prędkości przepływu wody indukcyjnym młynkiem hydrometrycznym typu Nautilus C2000 OTT Hydrometrie. W każdym roku w okresie jesiennych nízówek wykonywano serię pomiarów hydrometrycznych przy różnych przepływach. Prędkość przepływu wody zmierzono w wyznaczonych pionach hydrometrycznych, zgodnie z procedurą pomiarową IMGW (2002). Przyjęto piony hydrometryczne w odległościach co 0,5 m, w których prędkości mierzono w punktach na różnych wysokościach pionów, rejestrując dwukrotnie wartość średnią uzyskaną z pomiaru trwającego 10 s w każdym punkcie. Odczytano także stan wody na łacie wodowskazowej (rys. 2).



RYSUNEK 2. Przekrój wodowskazowy w km 37+257 rzeki Uszwicy
FIGURE 2. Gauge-section in km 37+257 of the Uszwica River

Dysponując pomierzonymi prędkościami przepływu w poszczególnych pionach hydrometrycznych, przepływ całkowity w przekroju obliczano metodą Harlachera (Byczkowski 1996). Wyniki obliczeń uzyskane tą metodą porównano z obliczeniami natężenia przepływu, w których średnią prędkość przepływu wody określono za pomocą wzoru Chézy'ego. Wykonana w trakcie pomiarów hydrometrycznych inwentaryzacja stanu dna i skarp koryta Uszwicy umożliwiła przyjęcie wartości współczynnika szorstkości według Manninga.

Krzywą natężenia przepływu według równania Bubendeya (Byczkowski 1996) ustalono na podstawie obliczonych natężeń przepływu metodą Harlachera w danym roku, w którym wykonano pomiary prędkości przepływu wody. Wyniki tych obliczeń i pomiarów geodezyjnych z okresu 2009–2011 zestawiono z wynikami z okresu 2006–2008, zamieszczonymi w pracy Michalca i Tarnawskiego (2010). Na podstawie danych z sześciu

lat określono wpływ zmian geometrii przekroju poprzecznego Uszwicy na rejestrację przepływu nienaruszalnego.

Wyniki

Zakres natężenia przepływu w trakcie pomiarów wykonanych w latach 2009–2011 mieścił się w przedziale $0,35\text{--}2,43\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (tab. 1). Zakres ten odpowiada przepływowi małym i średnim. Również pomiary z lat 2006–2008 zostały wykonane przy przepływach z zakresu małych i średnich. Jak podają Michalec i Tarnawski (2010), pomiary hydrometryczne w okresie 2006–2008 wykonano przy przepływach mieszczących się w przedziale $0,24\text{--}4,07\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Wyniki obliczeń natężenia przepływu, obliczonego na podstawie pomiarów hydrometrycznych, zamieszczono w tabeli 1. Porównując wyniki tych obliczeń, porównano z natężeniem przepływu obliczonym wzorem Chézy'ego.

TABELA 1. Przepływy w przekroju wodowskazowym w km 37+257 rzeki Uszwicy obliczone na podstawie pomiarów hydrometrycznych i wzorem Chézy'ego
 TABLE 1. Water flows in gauge-section in the km 37+257 of Uszwica River calculated on the basis of hydrometric measurements and Chézy's formula

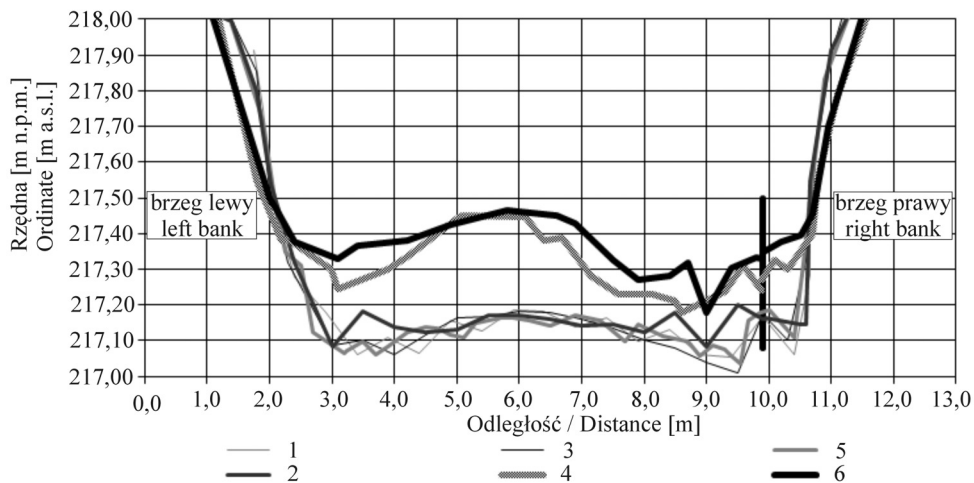
Rok pomiaru/ /Year of measurement	Spadek zwierciadła wody/ /Slope of water table [%]	Przepływ obliczony/ /Calculated water flow [m ³ ·s ⁻¹]		Różnica wyników/ /Difference of results [%]
		na podstawie pomiarów/ /on the basis of measurements	wzorem Chézy'ego/ /acc. to Chézy's formula	
2009	0,60	0,38	0,40	-5,76
		0,63	0,65	-3,52
		1,19	1,11	6,16
		2,43	2,33	4,08
2010	0,45	0,45	0,49	-8,02
		0,74	0,70	5,65
		1,22	1,23	-0,33
		2,19	2,11	3,52
2011	1,50	0,35	0,37	-5,11
		0,43	0,44	-2,56
		0,40	0,41	-3,78
		0,57	0,53	6,73

Współczynnik prędkości w tym wzorze obliczono ze wzoru Manninga, w którym współczynnik szorstkości dna przyjęto z tablic Ven Te Chowa. Ze względu na zakres przepływów i odpowiadających im napełnień, mieszczących się w korycie żwirowo-kamienistym, przyjęto współczynnik szorstkości wynoszący 0,036. W obliczeniach przyjęto spadek hydrauliczny określony na podstawie pomiarów rzędnych zwierciadła wody na odcinku 45 m. Natężenie przepływu określone na podstawie pomiarów okazało się przeważnie mniejsze od natężenia przepływu określonego na podstawie obliczeń, w których prędkość przepływu określono wzorem Chézy'ego (tab. 1).

Obliczenie natężenia przepływu wzorem Chézy'ego wymagało określe-

nia powierzchni przekroju poprzecznego koryta rzeki. Na rysunku 3 przedstawiono przekrój poprzeczny opracowany na podstawie pomiarów geodezyjnych w latach 2006–2011. Zmiany rzędnych dna w najniższym punkcie przekroju wodowskazowego w latach 2006–2011 przedstawiono w tabeli 2.

Zmiany kształtu koryta, co potwierdzają wyniki pomiarów geodezyjnych (rys. 1), spowodowane są intensywnymi przepływami wezbraniowymi w okresie wiosennych roztopów i letnich deszczy, które powodują nie tylko znaczne zmiany linii brzegów, lecz przede wszystkim dna Uszwicy poniżej płyty wypadu jazu. W ciągu sześciu lat obserwacji stwierdzono, że przegłębienia dna Uszwicy poniżej jazu w postaci tzw. wyboju uległy



RYSUNEK 3. Przekrój poprzeczny rzeki Uszwicy (1 – pomiar 2006 r.; 2 – pomiar 2007 r.; 3 – pomiar 2008 r.; 4 – pomiar 2009 r.; 5 – pomiar 2010 r.; 6 – pomiar 2011 r.)

FIGURE 3. The Uszwica River cross-section (1 – measurement in 2006; 2 – measurement in 2007; 3 – measurement in 2008; 4 – measurement in 2009; 5 – measurement in 2010; 6 – measurement in 2011)

zwiększeniu i w wyniku erozji wstecznej doprowadziły do zmian dna Uszwicy poniżej przekroju wodowskazowego. Zmiany przekroju porzecznego, spadku zwierciadła wody, jak również zmiany położenia najniższego punktu dna (tab. 2) wpłynęły na zmianę równania krzywej natężenia przepływu i poziomu zwierciadła wody odpowiadającego przepływowi nienaruszalnemu. Ze względu na erozję i odkładanie się materiału mineralnego w korycie rzeki Uszwicy w analizowanym okresie, konieczne było opracowanie nowych krzywych natężenia przepływu (Michalec i Tarnawski 2011). Opracowana w danym roku krzywa natężenia przepływu (tab. 2) umożliwiła wyznaczenie napęnienia w korycie Uszwicy przy przepływie nienaruszalnym. Ze względu

na znaczne zmiany rzędnych dna, powodujących zmiany tzw. zera wodowskazu, konieczne było określenie stanu na łacie dla każdego wyznaczonego napęnienia dla przepływu nienaruszalnego. Ze względu na zmiany zera wodowskazu zmianie uległy również napęnienia (h_n) w korycie. Zwiększenie się tych napęnień nastąpiło szczególnie w okresie 2010–2011, co zostało spowodowane powstaniem odkładów rumowiska w części środkowej koryta (rys. 3). Zakres ważności wszystkich krzywych natężenia przepływu, zamieszczonych w tabeli 2, odpowiada zakresowi stanów wody na łacie wodowskazowej, z wyjątkiem ostatniej krzywej, której zakres ważności odpowiada stanom wody na łacie powyżej wartości 12 cm.

TABELA 2. Rzędne dna i stany na wodowskazie (h_n) odpowiadające przepływowi nienaruszalnemu oraz rzędna zwierciadła wody przepływu nienaruszalnego (rz. Q_n) wraz z równaniami krzywej natężenia przepływu w poszczególnych latach

TABLE 2. The river bed ordinates and water levels (h_n) on gauge-section corresponding to base flow (Q_n) with equations of rating curve in respective years

Rok/ /Year	Rzędne dna [m n.p.m.]/ /River bed ordinates [m a.s.l.]	Równanie krzywej natężenia przepływu/ /Equation of rating curve	h_n [m]	rz. Q_n [m n.p.m] [m a.s.l.]
2006	217,06	$Q = 4,895 \cdot h^2 + 0,119 \cdot h$	0,11	217,31
2007	217,01	$Q = 4,804 \cdot h^2 - 0,275 \cdot h - 0,016$	0,11	217,31
2008	217,04	$Q = 4,921 \cdot h^2 - 0,166 \cdot h - 0,004$	0,12	217,32
2009	217,08	$Q = 5,225 \cdot h^2 + 0,056 \cdot h - 0,011$	0,13	217,33
2010	217,18	$Q = 16,371 \cdot h^2 - 2,571 \cdot h + 0,003$	0,22	217,42
2011	217,18	$Q = 19,443 \cdot h^2 - 2,452 \cdot h$	0,24	217,44

Podsumowanie

Ze względu na intensywne procesy erozji i depozycji materiału mineralnego w korycie rzeki Uszwicy w rejonie przekroju wodowskazowego, spowodowane przepływami wezbraniowymi w okresie wiosennych roztopów i letnich deszczy, konieczne jest co najmniej raz w roku wykonanie pomiarów geodezyjnych i hydrometrycznych w celu weryfikacji krzywej natężenia przepływu. Zmiany przekroju poprzecznego Uszwicy i zmiany położenia najniższego punktu dna w przekroju wodowskazowym wpływają na zmianę napęnień w korycie. Zmiany te wpływają szczególnie na określenie napęnienia dla przepływu nienaruszalnego. W ciągu sześciu lat rzędna najniższego punktu dna rzeki, przyjętego jako zero wodowskazu, zwiększyła się o 12 cm, powodując odpowiednie zwiększenie rzędnej zwierciadła wody, odpowiadającej napęnieniu przy przepływie nienaruszalnym. Konieczność wykonywania cyklicznych weryfikacji krzywej natężenia przepływu podyktowana jest

bezwzględny zachowaniem przepływu nienaruszalnego poniżej ujęcia wody browaru piwowarskiego. W przypadku niewykonania weryfikacji krzywej konsumpcyjnej pobór wody byłby wykonywany przy przepływach mniejszych od nienaruszalnego, powodując zmniejszenie ilości wody płynącej Uszwicą poniżej ujęcia.

Wnioski

Wyniki badań wskazują na konieczność ustanawiania przekrojów wodowskazowych w stabilnych przekrojach poprzecznych. W przypadku lokalizacji przekroju wodowskazowego na dolnym stanowisku jazu, poniżej urządzeń do rozpraszania energii wody, tak jak to miało miejsce w analizowanym przypadku, konieczne jest, aby na tym odcinku były wykonane umocnienia dna i brzegów rzeki. Przekrój wodowskazowy w km 37+257 rzeki Uszwicy założony w celu rejestracji stanów niskich, znajdujący się w części koryta nieubez-

pieczonego, w odległości 10 m od końca płyty wypadu jazu stałego, wykazuje się brakiem stałości. W efekcie odkładania się rumowiska w tym przekroju nastąpiły znaczące zmiany poziomu zwierciadła wody przepływów małych, w tym przepływu nienaruszalnego. Po dwóch latach od założenia łaty zwiększeniu zaczęła ulegać wartość rzędnej zwierciadła wody, odpowiadająca przepływowi nienaruszalnemu. W przypadku niewykonywania pomiarów weryfikujących krzywą natężenia przepływu tego przekroju w ujęciu wody dokonywano poboru wody przy przepływach mniejszych od nienaruszalnego.

Wykazano, że ze względu na zmiany geometrii przekrojów koryt cieków, w których znajdują się wodowskazy, konieczne jest wykonywanie cyklicznych weryfikacji krzywych natężenia przepływu. Szczegółowa weryfikacja prawidłowych i niezmiennych warunków pomiarowych powinna być wykonywana co kilka lat, a także powinny być wykonywane doraźne oceny w przypadkach wystąpienia warunków związanych z sytuacjami dużych wezbrań czy też powodzi.

Literatura

- BYCZKOWSKI A. 1996: Hydrologia. T. 1. Wyd. SGGW, Warszawa.
- CZETWERTYŃSKI E. 1958: Hydrologia, Arkady, Warszawa.
- NIEDBAŁA J., MICHAŁEC B., TARNAWSKI M. 2005: Operat wodnoprawny na budowę posterunku wodowskazowego Brzesko na rzece Uszwicy w km 37+257. Opracowanie wykonane na zlecenie Spółki Carlsberg Polska S.A., maszynopis, Kraków.
- MICHAŁEC B., TARNAWSKI M. 2010. Wpływ zmian krzywej przepływu na rejestrację przepływu nienaruszalnego. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumictus* 9 (1): 35–41.
- MICHAŁEC B., TARNAWSKI M. 2011: Kontrola stałości przekroju wodowskazowego na rzece Uszwicy w km 37+257 wraz z weryfikacją krzywej przepływu. Opracowanie wykonane na zlecenie Spółki Carlsberg Polska S.A., Warszawa.
- POPEK Z., HEJDUK L., HŁADKI P. 2011: Możliwości wykorzystania przepływomierza modułowego ISCO 2150 w pomiarach hydrometrycznych w małej rzece nizinnej. *Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ.* 53: 247–257.
- TARNAWSKI M., MICHAŁEC B. 2007: Ocena stanu technicznego i określenie możliwości przeprowadzenia wód wezbraniowych przez jaz na rzece Uszwicy. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4 (2): 189–199.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J. 1997: Hydrologia Stosowana. Wydanie drugie, zmienione. PWN, Warszawa.
- Procedura pomiarowa. Pomiar natężenia przepływu za pomocą młynka hydrometrycznego – wykonany w bród. IMGW/PSHM/SPO/POM/2002. Maszynopis.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie, Dz.U.2007 nr 86, poz. 579.

Streszczenie

Weryfikacja krzywej natężenia przepływu w przekroju wodowskazowym na rzece Uszwicy. Kontrolowanie przepływów niskich, w tym przepływu nienaruszalnego, jest szczególnie ważne w przypadku intensywnego poboru wody z ciek. Celem pracy była weryfikacja krzywej natężenia przepływu opracowanej dla przekroju wodowskazowego zlokalizowanego w km 37+257 rzeki Uszwicy, poniżej jazu stałego piętrzącego wodę dla potrzeb pobliskiego browaru.

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów geodezyjnych i hydrometrycznych wykonanych jesienią w okresie 2009–2011. Wyniki te porównano z wynikami badań z okresu 2006–2008. Pomiaru geodezyjne

wykazały brak stałości przekroju poprzecznego. Wyznaczone natężenia przepływu pozwoliły na opracowanie krzywych natężenia przepływu według równania Bubendeya. Zmiany przekroju poprzecznego, spadku lokalnego dna i zmiany położenia zera wodowskazowego wpłynęły na zmianę równania krzywej natężenia przepływu. Określono wpływ zmian morfologicznych koryta rzeki na rejestrację przepływu nienaruszalnego i opracowano nowe krzywe natężenia przepływu. Wykazano tym samym, że krzywa natężenia przepływu powinna być systematycznie uaktualniana dla każdego posterunku wodowskazowego.

Summary

Verification of a rating curve in a gauge cross-section on the Uszwica River. Low flow controlling is particularly important in the case of heavy water uptake from a watercourse. The aim of this research was to verify a rating curve in a gauge cross-section

located on the Uszwica River, below the weir damming water for the nearby brewery.

The paper presents the results of land surveying and hydrometric measurements conducted in autumn in the period 2009–2011, which were compared with the results from the period 2006–2008. The land surveying measurements showed lack of the cross-sectional stability. Changes in the cross-section, local bottom slope and changes in the gauge zero position altered the equation of the rating curve. The effect of morphological changes of the riverbed on the recording of invariable flow was determined and new rating curves were developed. It was therefore demonstrated that the rating curve should be regularly updated for each gauge post.

Authors' address:

Bogusław Michalec, Tarnawski Marek, Agata Majerczyk, Katarzyna Wachulec
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
al. A. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl