

WIKTORIA CZECH, KAROL PLESIŃSKI, ARTUR RADECKI-PAWLIK

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

CHARAKTERYSTYKA METOD WYZNACZANIA PRZEPŁYWU BRZEGOWEGO W RZEKACH GÓRSKICH*

BANKFULL DISCHARGE METHODS IN MOUNTAIN STREAMS:
BASIC CHARACTERISTICS

Streszczenie. Artykuł stanowi przegląd najczęściej stosowanych na świecie, a także w Polsce, metod wyznaczania przepływu brzegowego. Jego wartość powinna stanowić podstawowe kryterium selekcji zagadnień związanych z obliczeniami hydrologicznymi, a docelowo hydraulicznych warunków przepływu w korytach rzecznych, oraz zagadnień związanych z projektowaniem budowli hydrotechnicznych, tak jak to jest w niektórych krajach Europy Zachodniej. Wartość tego parametru jest także istotna z punktu widzenia badań ekologicznych i hydrobiologicznych. Opisane w pracy różne podejścia do wyznaczania przepływu brzegowego bazują na metodach empirycznych (obliczeniowych, graficznych) i biologicznych (roślinnych, zwierzęcych). Ich mnogość powoduje, że wielu polskich inżynierów i projektantów ma problemy z dokładnym wyznaczeniem tej charakterystyki. W związku z tym w pracy przedstawiono nie tylko teoretyczny opis wybranych metod, sposoby wyznaczania przepływu za ich pomocą oraz ich wady i zalety, lecz także praktyczne przykłady określania przepływu brzegowego tymi metodami na jednej z karpackich rzek.

Słowa kluczowe: przepływ brzegowy, potoki górskie, rzeka Ochotnica

Wstęp

W wielu krajach europejskich przepływ brzegowy jest podstawowym kryterium związanym z obliczeniami hydrologicznymi oraz hydraulicznymi dotyczącymi koryt rzecznych i budowli hydrotechnicznych. Jego wartość może być szczególnie przydatna na rzekach i potokach, gdzie nie mamy dostępu do danych obserwowanych na poste-

*Pracę zrealizowano w ramach projektu z działalności statutowej nr DS-3322/KIWiG/2014.

runkach wodowskazowych. W obrębie rzek kontrolowanych łatwiej jest uzyskać dane przepływów charakterystycznych niż w zlewniach niekontrolowanych.

Pojęcie przepływu brzegowego jest szeroko omawiane przez wielu naukowców. Według Lambora (1971) przepływ ten silnie wpływa na formowanie koryta rzecznej. Podobnie twierdzą Brzeziński i Ozga-Zielińska (1997), z tym zastrzeżeniem, że przepływ brzegowy nie tylko wpływa na formowanie przekroju poprzecznego koryta, lecz także powoduje zmiany w układzie poziomym. Wołoszyn i in. (1994) uważają, że przepływ brzegowy to przepływ o stanie wody wypełniającym koryto rzeki do krawędzi brzegów, powyżej których następuje zalanie doliny rzecznej. Podobną definicję podali w swoich pracach niektórzy zagraniczni naukowcy (Williams, 1978; Woodyer, 1968).

Istniejące definicje przepływu brzegowego są, jak widać, bardzo różne. Radecki-Pawlik i Skalski (2008) stwierdzają, że wartość przepływu brzegowego dla rzek i potoków górskich nie może być pojedynczą wartością, lecz raczej powinien być to zakres wartości, w którego ramach można oczekiwać wartości przepływu brzegowego. Określając poziom wody brzegowej na podstawie częstotliwości wylewu, można rozpoznać dwa typy terenów zalewowych: aktywne i nieaktywne. Terasa typu nieaktywnego jest zalewana tak rzadko, że procesy aluwialne mają bardzo mały wpływ na jej kształt w długim okresie czasu. Z kolei terasa typu aktywnego stanowi teren zalewowy, którego struktura i układ są formowane bądź niszczone pod wpływem rzeki, a zmiany te są obserwowane w stosunkowo krótkim czasie (około 10 lat). Według Nixona (1959) i Williamsa (1978) przepływ brzegowy nie powtarza się z konkretną częstotliwością.

Wartość przepływu brzegowego jest kluczowym parametrem w ocenie geometrii kanału, a samo zjawisko ma silny wpływ na kształtowanie się koryta rzecznej (Brzeziński i Ozga-Zielińska, 1997; Lambor, 1971). Znajomość przepływu brzegowego jest niezbędna do oceny i realizacji wielu projektów hydrotechnicznych wykonywanych w korytach rzek.

Koryto rzeki charakteryzuje się geometrią, która jest definiowana w kategoriach szerokości rzeki i średniej głębokości przy stanie wody brzegowej. Znajomość granicy występowania przepływu brzegowego jest wykorzystywana w celu sprawdzenia stabilności dna za pomocą energii jednostki strumienia, wyrażonej wzorem (Darley, 1996):

$$p_s = \rho \cdot g \cdot Q_b \cdot I_b \cdot B^{-1} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1)$$

gdzie:

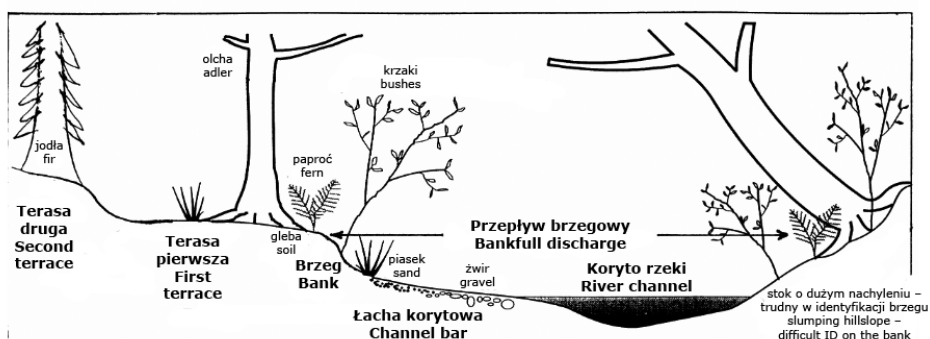
- ρ – gęstość wody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
- g – przyspieszenie ziemskie ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),
- Q_b – przepływ brzegowy ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- I_b – spadek (w warunkach przepływu wody brzegowej),
- B – szerokość koryta (m).

Ważnym elementem w ustalaniu granicy przepływu jest wybór odpowiedniego przekroju poprzecznego koryta. Jak twierdzi Radecki-Pawlik (2002), powinno się przyjmować takie przekroje korytowe, które odzwierciedlają dany odcinek rzeki (przekroje te zwiemy referencyjnymi). Znacznie różniące się kształtem przekroje mogą fałszować (zawyżać/zaniżać) wartości uzyskane w analizie. Przekrój poprzeczny powinien być tak dobrany, aby możliwe było określenie zmian w kształcie koryta, a tym samym odzwierciedlanie zmian granicy występowania przepływu brzegowego.

Rozpoznanie poziomu brzegów potoku (często nazywane „ławką” – co wynika z bezpośredniego tłumaczenia z języka angielskiego) jest ważne w identyfikacji aktywnego poziomu terasy zalewowej (Woodyer, 1968). Tereny zalewowe identyfikuje się jako powierzchnie płaskie przylegające do kanału, na którym w ciągu ostatnich kilku dekad został zdeponowany osad.

Większość rzek górskich ma dno aluwialne, co oznacza, że tworzą one własne kanały zbudowane z rumowiska dennego, które jest do nich dostarczane w wyniku erozji brzegowej. Epizody ruchu rumowiska i jego transportu występują podczas powodzi i są nazywane „zdarzeniami tworzącymi kanał”. Wydarzenia te określają rozmiar kanału potrzebny do przepływu wody. W okresie stosunkowo stabilnego klimatu i użytkowania zlewni w rzece panuje równowaga między wielkością przepływu wody i rozmiarami przekroju poprzecznego koryta, przy czym koryto jest wystarczająco duże, aby odprowadzić strumień wody przez większość czasu trwania przepływów. Jeżeli przepływy są większe od tej pojemności, strumień wody przelewa brzegi rzeki i występują powodzie.

Rzeki są w ciągłym cyklu przemian, istnieje więc wiele wskaźników mających wpływ na określenie przepływu brzegowego. Poniżej przedstawiono kilka wskaźników, które mogą pomóc w identyfikacji krawędzi przepływu brzegowego (rys. 1). Podstawowe parametry, które mogą być użyte do opisu przepływu brzegowego, to spadki terenu, roślinność, gleba, granice zalewu wody. Każdy z nich powinien być analizowany oddzielnie, natomiast łącząc uzyskane dane można uzyskać prawdopodobną odpowiedź na pytanie: Gdzie są granice przepływu brzegowego? Biorąc pod uwagę strome zbocze, należy pamiętać, że krawędź przepływu brzegowego jest położona na skraju płaskiej równi zalewowej i obszarów przybrzeżnych (dotyczy to naturalnych cieków wodnych). Przy ustalaniu przepływu brzegowego za pomocą roślinności, należy wyznaczyć linię demarkacyjną między niższymi obszarami, które nie są pokryte roślinnością lub są pokryte roślinnością, która toleruje wodę, oraz obszarami pokrytymi wieloletnią roślinnością (np. paprocie, krzewy i drzewa).



Rys. 1. Elementy koryta rzecznego i teras zalewowych pomocne w określaniu przepływu brzegowego (na podstawie Pleusa i Schuetta-Hamesa, 1998)

Fig. 1. Elements of the river channel and floodplains within the range of bankfull helpful in bankfull discharge determination (adopted from Pleus and Schuett-Hames, 1998)

Jeśli w stromym kanale rzeki bez wyraźnej terasy zalewowej poszukuje się przepływu brzegowego, należy wyznaczyć górną linię brzegu lub najniższą linię porostów i mchów na litej skale.

Podczas przepływu brzegowego i przepływów pośrednich można zaobserwować fragmenty drewna unoszącego się przy brzegach rzeki. Oznacza to, że znaki „wielkiej wody” muszą być utworzone podczas słabnącego etapu przepływu brzegowego lub przepływów pośrednich (Nakayama i in., 2002).

Aby określić przepływ brzegowy, należy znać:

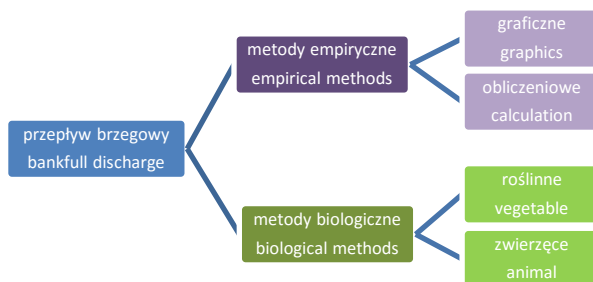
- krzywą natężenia przepływu,
- historyczne granice zalewu wody,
- wskaźniki glebowe, takie jak:
 - górna część bocznych łach,
 - zmiana spadku brzegu,
 - wskaźniki roślinne,
 - cechy erozyjne.

Znajomość przepływu brzegowego może pomóc w rozumieniu procesów geomorfologicznych w strumieniu i w rozumieniu biologicznych zmian w cieku. Wartość tego przepływu mogłyby być istotna w negocjacjach interdyscyplinarnych między hydrotechnikami, ekologami, biologami i geomorfologami.

Metody obliczeniowe

Aby określić wartość granicy przepływu brzegowego, nie są wymagane obserwacje hydrologiczne. Przepływ ten można wyznaczyć za pomocą obserwacji i punktu pomiarowego (Radecki-Pawlik i in., 2005). Rzeka nie musi być zatem objęta monitoringiem i kontrolą hydrologiczną, co znacznie ułatwia projektantom wyznaczanie wielkości wody kształtującej koryto.

Istnieje kilka metod określania przepływu brzegowego. Można je podzielić na biologiczne, określane za pomocą roślinności i zwierząt związanych ze środowiskiem wodnym na terasach rzecznych, oraz empiryczne, oparte na morfometrycznych parametrach określających koryto (rys. 2).



Rys. 2. Metody obliczania przepływu brzegowego
Fig. 2. Bankfull discharge determination methods

Metody empiryczne obejmują formuły Wolmana (1955) i Lambora (1971).

Na procesy korytotwórcze składają się: transport rumowiska, prędkość przepływu i procesy biologiczne. Te ostatnie stają się podstawą w metodach obserwacji opartych na czynnikach środowiskowych. Woodyer (1968) doszedł do wniosku, że typ roślinności obecnej na terenach zalewowych jest związany z pojawieniem się przepływu wody o pewnym prawdopodobieństwie. Przepływ brzegowy może być ustalony na dwa sposoby: na podstawie geometrii niecki lub jako objętość przepływającej wody.

Metoda Wolmana

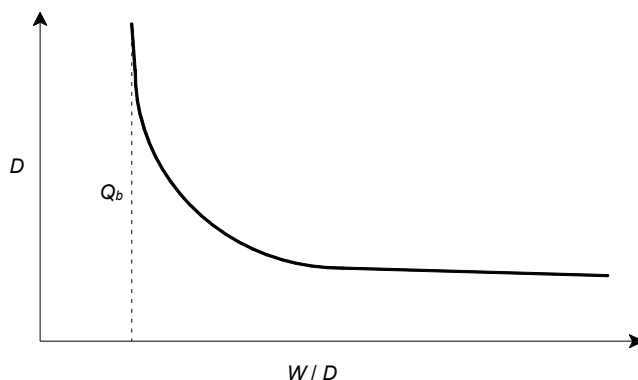
Wolman (1955) do obliczenia przepływu brzegowego zaproponował metodę zwaną minimalnym współczynnikiem szerokości. Metoda ta bazuje na określeniu parametrów morfometrycznych koryta rzeki. Poziom wody brzegowej jest wyznaczany w miejscu minimalnej szerokości kanału na danej głębokości, czyli gdy wartość liczbowa ciągu R_w osiąga wartość minimalną (rys. 3):

$$R_w = \frac{W_i}{D_i} (-), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n - 1 \quad (2)$$

gdzie:

W_i – szerokość koryta rzeki na określonym poziomie odpowiadająca danej głębokości (m),

D_i – głębokość wody na określonym poziomie (m).



Rys. 3. Schemat ideowy wyznaczania przepływu brzegowego metodą Wolmana; D – głębokość wody (m), Q_b – przepływ brzegowy ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), W – szerokość koryta rzeki (m)

Fig. 3. Wolman method bankfull discharge determination scheme; D – water depth (m), Q_b – bankfull discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), W – riverbed width (m)

Podstawiając do powyższego równania kolejne wartości głębokości koryta rzeczno- go i odpowiadające im szerokości koryta, otrzymujemy ciąg liczb, z których jedna osią-

ga wartość minimalną. Na podstawie uzyskanej w ten sposób najmniejszej wartości parametru R_w określamy przepływ brzegowy, obliczając parametry hydrauliczne koryta rzeki, podobnie jak w metodzie Wołoszyna. Odstępy pomiędzy poszczególnymi głębokościami koryta rzecznego wykorzystywane we wzorze na minimalny współczynnik szerokości R_w powinny być dobierane na podstawie znajomości warunków terenowych, jednak nie rzadziej niż co 1 m. Wartość liczbowa przepływu brzegowego wyznaczona tą metodą jest poprawna w przypadku koryt prostokątnych, natomiast niedostatecznie dokładna dla koryt o kształtach trapezowych o łagodnie pochyłonych brzegach.

Wolman (1955) stwierdził, że podczas przepływu brzegowego średnia prędkość maleje, natomiast głębokość i nachylenie wzrastają. Określił także, że przepływ brzegowy występuje z częstością od 2 do 2,7 razy w roku.

Metoda Lambora

Według Lambora (1971) przepływ brzegowy powinien być zdefiniowany jako przepływ wody występujący między przepływem średnim rocznym z wielolecia (SSQ) a średnim z maksymalnych z wielolecia (SWQ). Aby go ustalić, potrzebna jest krzywa objętości przepływu i krzywa częstotliwości przepływu.

Metoda Wołoszyna

Przepływ brzegowy proponowany przez Wołoszyna i in. (1994) jest definiowany jako stan napełnienia głównego koryta rzeki do krawędzi brzegów (rys. 4). Powyżej tego poziomu woda zaczyna się rozlewać na okoliczne tereny.



Rys. 4. Zaznaczony poziom wody brzegowej w korycie rzeki Białej Tarnowskiej

Fig. 4. Marked bankfull stage level in the Biała Tarnowska river channel

W celu określenia punktów brzegowych należy wykonać pomiary geodezyjne przekrojów poprzecznych i dobrze znać warunki lokalne cieków wodnych (lokalizacja teras zalewowych, warunki klimatyczne, glebowe, wielkość i ukształtowanie zlewni, budowa geologiczna cieków, materiał denny, występowanie form korytowych). Na podstawie wielkości powierzchni przekroju i natężenia przepływu można obliczyć wartości przepływu brzegowego za pomocą wzorów znanych z hydrauliki.

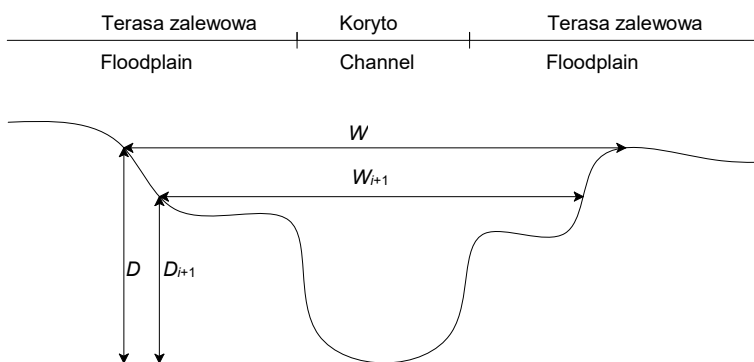
Metoda Riley'a

Riley (1972) zmodyfikował wzór Wolmana i zaproponował formułę do obliczania przepływu brzegowego na podstawie tzw. indeksu terasowego BI , który uwzględnia naturalne terasy rzeczne (rys. 5):

$$BI = \frac{W_i - W_{i+1}}{D_i - D_{i+1}} (-), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n - 1 \quad (3)$$

gdzie:

- BI – wartość indeksu terasowego Riley'a,
- W_i – szerokość koryta rzeki na określonym poziomie odpowiadająca danej głębokości (m),
- D_i – głębokość wody na określonym poziomie (m),
- W_{i+1} – szerokość koryta rzeki na określonym poziomie przy głębokości pomniejszonej o wartość przyjętą za skok ciągu (m),
- D_{i+1} – głębokość wody pomniejszona o wartość skoku ciągu (m).



Rys. 5. Schemat ideowy wyznaczania przepływu brzegowego metodą Riley'a; D – głębokość koryta (m), W – szerokość koryta (m)

Fig. 5. Riley method bankfull discharge determination scheme; D – depth of the channel (m), W – width of the channel (m)

Na podstawie powyższego wzoru oblicza się wartość przepływu brzegowego, który wyznacza się do poziomu wody, przy którym ciąg liczbowy BI osiąga pierwsze maksimum. Ponadto metoda ta umożliwia obliczenie lokalnych maksimum występujących

w obrębie badanego przekroju (np. nagła zmiana kształtu przekroju) (Wałęga i in., 2013). Proponowane przez Rileya (1972) wyznaczenie poziomu linii brzegowej wody jest dość dokładne w przekroju trapezoidalnym, z łagodnymi krawędziami stoku. Dodatkowo pomocna w obliczeniach może być znajomość roślinności wysokiego brzegu (Radecki-Pawlik i in., 2000).

Metoda Schumma, Browna i Warnera

Schumm, Brown i Warner (Chow Ven, 1959) określają przepływ brzegowy, opierając się na modelu Gaucklera-Manninga uwzględniającym parametry geometryczne koryta, takie jak: powierzchnia przekroju, szerokość i spadek zwierciadła wody oraz współczynnik szorstkości:

$$Q_b = \left(\frac{1,0}{n} \right) \cdot A_b \cdot D_b^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4)$$

gdzie:

- n – współczynnik szorstkości,
- A_b – powierzchnia przekroju poprzecznego obliczana jak dla terasy rzeki, co do którego decydujemy, że jest on (ten przekrój) pierwszym dobrze wykształconym brzegiem (m^2),
- D_b – średnia głębokość w przekroju pomiarowym, obliczana ze wzoru:

$$D_b = \frac{A_b}{W_b} \quad (\text{m})$$

gdzie W_b – szerokość zwierciadła wody w przekroju (m),

- I – spadek dna do przekroju pomiarowego.

Metoda Williamsa

Williams (1978) opracował wzór, za pomocą którego można obliczyć przepływ brzegowy:

$$Q_b = 4,0 \cdot A_b^{1,21} \cdot I^{0,28} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (5)$$

gdzie:

- A_b – powierzchnia przekroju poprzecznego obliczana jak dla terasy rzeki, co do którego decydujemy, że jest on (ten przekrój) pierwszym dobrze wykształconym brzegiem (m^2),
- I – spadek dna do przekroju pomiarowego.

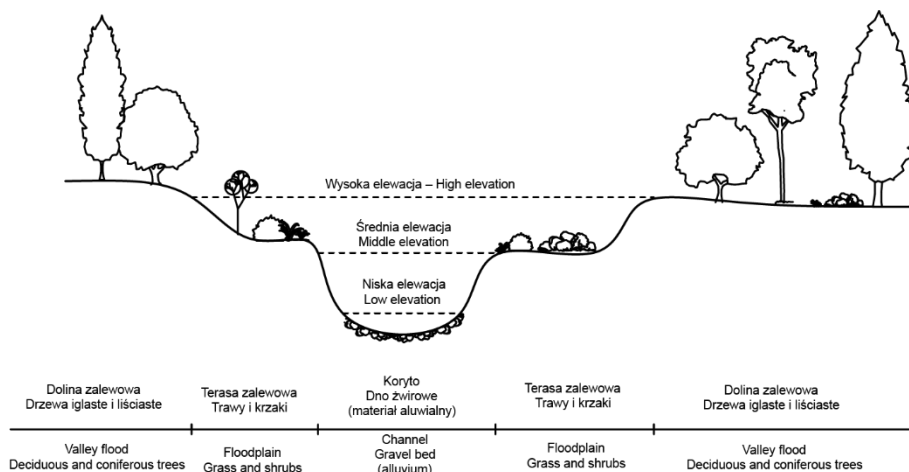
Powyższa formuła została opracowana na podstawie danych z 51 różnych pod względem morfologicznym rzek i potoków górskich. Według wielu naukowców metoda ta jest najlepsza dla rzek, gdzie nie prowadzi się stałych pomiarów wodowskazowych (Williams, 1978).

Metoda Pickupa i Warnera

Według Pickupa i Warnera (1976) przepływ brzegowy występuje z częstością co 4–10 lat, stąd jest to przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia mieszczącym się w przedziale 10–25%. Wartość przepływu brzegowego określa się na podstawie obliczeń charakterystycznych przepływów o określonym prawdopodobieństwie pojawienia się, gdzie wybór odpowiedniej metody jest uzależniony od wielu lokalnych czynników, takich jak: warunki klimatyczne, glebowe, wielkość i ukształtowanie zlewni. Metoda ta może być także stosowana w rzekach, w których są prowadzone pomiary wodowskazowe.

Metoda Woodyera

Metoda Woodyera (1968) należy do grupy metod biologicznych określania przepływu brzegowego. Polega ona na wyznaczeniu trzech pięter roślinności na brzegach teras zalewowych, które zostały nazwane: elewacją niską, średnią i wysoką (rys. 6).



Rys. 6. Schemat ideowy wyznaczania przepływu brzegowego metodą Woodyera

Fig. 6. Woodyer method bankfull discharge determination scheme

Metoda ta jest oparta na analizie obecności roślin w rzece i na terasach zalewowych w obrębie cieku. Roślinność przedstawia zależność charakterystyki przepływu z pewnym prawdopodobieństwem wystąpienia. W sposobie tym istnieją trzy roślinne terasy (ławki). Metoda ta ma zastosowanie, gdy roślinność jest dobrze wykształcona na różnych poziomach zalewowych.

W przekrojach poprzecznych dokonuje się obserwacji indeksów biotycznych. Przy określaniu rodzajów teras należy wykonywać dokumentację fotograficzną roślin oraz zbierać i suszyć ich kwiatostany, które pojawiają się pod koniec wiosny (Łapuszek i Lenar-Matyas, 2013). Metoda ta może być pomocna w porównywaniu wyników uzyskanych za pomocą metod empirycznych. Na podstawie wskaźników roślinnych można dokonywać obliczeń przepływu brzegowego w zlewniach niekontrolowanych, ale tylko tam, gdzie jest bogata roślinność (Radecki-Pawlik i in., 2000).

Woodyer (1968) opisał trzy typy teras zalewowych (rys. 6). Najniższa terasa zalewowa charakteryzuje się brakiem roślinności lub roślinnością wodolubną, jak np. porosty (w okresach suszy). Może także być pokryta cienką warstwą trawy. Niższa część elewacji jest pokryta osadami koryta, takimi jak: piaski, żwiry i głązy. Linia elewacji niskiej, często niewidoczna, jest pomijana przy wyznaczaniu przepływu brzegowego (Woodyer, 1968).

Średnia terasa zalewowa charakteryzuje się dobrze wykształconą roślinnością o cechach podmokłych terenów. Do flory występującej na średniej elewacji można zaliczyć trawy i krzewy, które dobrze reagują na okresowe zalewania. Według Woodyera (1968) woda na tej terasie pojawia się z częstotliwością 1,02–1,21 roku.

Elewacja wysoka jest porośnięta przez drzewa i roślinność wyższą. Najczęściej terasa ta jest najszerza i obejmuje tereny zalewowe. Woda na tej elewacji pojawia się co 1,24–2,69 roku.

W metodzie Woodyera przepływ brzegowy określa się do poziomu elewacji wysokiej. Gdy ustalenie granic elewacji wysokiej jest niemożliwe i problematyczne, wówczas za poziom wody brzegowej można przyjąć poziom elewacji średniej lub niskiej.

Metoda Radeckiego-Pawlika i Skalskiego

Kolejną metodą biologiczną wyznaczania przepływu brzegowego jest metoda zaproponowana przez Radeckiego-Pawlika i Skalskiego (2008). Jest ona oparta na indeksie *IBA* (ang. *Invertebrate Bankfull Assessment*), który jest związany z długością ciała makrobezkręgowców z rodziny Coleoptera: Carabidae (Radecki-Pawlik, 2011; Skalski i in., 2008). Bierze się pod uwagę niektóre gatunki bezkręgowców odpornych na szczególne warunki przepływu wody w rzece. Metoda opiera się na podejściu interdyscyplinarnym (geohydrobiologicznym) i pozwala na pełniejsze zbadanie przepływu brzegowego (Radecki-Pawlik i Skalski, 2008). Należy jednak uznać, że sposób ten jest tylko pomocniczy i jego wyniki należy porównać z wynikami innych metod abiotycznych, biotycznych, a nawet empirycznych. Metoda polega na umieszczeniu w podłożu, w pobliżu rzeki, 120 pułapek Barbera (12 rzędów po 10 pułapek w odstępach co 5 m) na różnych powierzchniach. Lokalizacja rzędów zależy od właściwości fizycznych odcinka ciekłu, takich jak: średnia wysokość roślin, częstość występowania powodzi i kolejnych teras zalewowych. Badanie wykonuje się w ciągu miesiąca w okresie wegetacji. Zebrane próbki konserwuje się w 70-procentowym alkoholu i poddaje dalszej analizie (obfitość gatunków, długości ciała).

W swoich badaniach Radecki-Pawlik (2002) stosował analizę redundancji oraz metody selekcji postępującej. Pod uwagę brano takie parametry, jak: liczebność, bogactwo gatunków, różnorodność gatunków, współczynnik jednorodności i współczynnik zmodyfikowanej biomasy. Stwierdzono, że wielkość badanych gatunków chrząszczy z rodziny Carabidae zależy od stabilności warunków środowiskowych, konkurencji i dostępności żywności. Wykazano, że czynnikiem ograniczającym jest dostępność do zasobów w czasie przepływu. Gdy częstotliwość występowania przepływów wezbraniowych jest duża, wówczas przeważają małe zwierzęta, a wraz ze spadkiem częstości powodzi obserwuje się korzystne warunki siedliskowe (żeńskie osobniki mają więcej czasu, aby zebrać jedzenie dla jaj wylęgowych) i w konsekwencji wzrost konkurencji międzygatunkowej.

Badania wykazały, że średnia długość ciała chrząszczy jest najmniejsza na pierwszej terasie zalewowej (mało stabilne warunki). Na następnych terasach, rzadko zalewanych przez wody (pokrytych lasami, łąkami), liczba osobników wzrasta. Stwierdzono ponadto wzrost rozmiarów ciała organizmów na wysokich terasach, co jest spowodowane koniecznością wzrostu wydatku na energię wykorzystywaną do poruszania się. Wskaźnik *IBA* można więc zapisać jako:

$$IBA = \text{liczba osobników o wielkości 1-6 mm} / \text{liczba osobników o wielkości 18-24 mm}$$

Zgodnie z powyższym równaniem dla terasy wysokiej $IBA < 1$, dla terasy średniej $IBA \geq 1$ oraz dla terasy niskiej $IBA \gg 1$.

Metoda, ze względu na swoją prostotę (należy tylko zebrać makrobezkręgowce i zmierzyć długość ich ciała), może być wykorzystywana do badania przepływów brzegowych na rzekach górskich. Dzięki obecności żywych chrząszczy, tolerujących stany zalewania wody lub nietolerujących ich, można określić wartość granicy przepływu brzegowego (Radecki-Pawlik i Skalski, 2008).

Studium przypadku przepływu brzegowego dla rzeki karpackiej

Poniżej przedstawiono studium przypadku przepływu brzegowego dla rzeki Ochotnicy w polskich Karpatach. Jest to rzeka znajdująca się w południowej części Gorców, o długości całkowitej 24 km i powierzchni zlewni 108 km². Ochotnica wypływa spod Kiczory (1200 m n.p.m.), jej ujście zaś znajduje się w miejscowości Tyłmanowa na wysokości około 350 m n.p.m. Rzeka jest prawobrzeżnym dopływem Dunajca. Opad w zlewni wynosi do 900–1000 mm. Przekrój badawczy znajdował się w 12 km rzeki, zamykając zlewnię o wielkości 55 km². Rumowisko denne ma następujące parametry: $d_{50} = 31$ mm i $d_{90} = 88$ mm. W miejscu pomiarów koryto rzeczne było roztokowe, a strumień wody płynął kilkoma kanałami.

W tabeli 1 przedstawiono wartości przepływu brzegowego obliczone różnymi metodami empirycznymi i biologicznymi.

Jak wcześniej wspomniano, należy się spodziewać przepływu brzegowego tylko między wartościami przepływów, które zostały obliczone metodami empirycznymi i biologicznymi (Radecki-Pawlik, 2002, 2015).

W przypadku badanej rzeki trzeba wziąć pod uwagę tylko niektóre uzyskane z obliczeń wartości przepływu brzegowego. Należy odrzucić najmniejsze wartości przepływu brzegowego uzyskane metodą Wolmana oraz metodą Rileya. Przepływy te są zbyt małe ($Q_b = 4,10$ m³·s⁻¹), aby mogły powodować zmiany w morfologii rzeki, a stan wody odpowiadający tak niskiemu przepływowi spowodowałby zalanie tylko żwirowych łąch korytowych znajdujących się w korycie cieku i jego wysokość nie osiągnęłaby brzegów rzeki. Również naprężenie ścinające i średnia prędkość przepływu wody w tych warunkach są zbyt małe, aby zainicjować ruch ziaren w korycie rzeki. Żadna z tych metod nie może być stosowana w rzekach wielonurtowych, roztokowych, a taka jest rzeka Ochotnica. Uzyskiwane wartości indeksów R_w i BI nie informują o wylewie wody na łąkę korytową czy terasę zalewową, w związku z tym na wykresach odnoszących się do metod Wolmana i Rileya powstaje kilka ekstremów, z których jedne odpowiadają zalewaniu poszczególnych łąch, a inne – zalewaniu teras zalewowych. Obydwie metody

Tabela 1. Wartości przepływu brzegowego dla rzeki Ochotnicy
Table 1. Bankfull discharge values for the Ochotnica river

Metoda Wołoszyna Wołoszyn method	Metoda Wolmana Wolman method	Metoda Rileya Riley method	Metoda Schumma, Browna i Warnera (model Gaucklera-Manninga) Schumm, Brown and Warner method (Gauckler-Manning model)	Metoda Williamsa Williams method	Metoda Pickupa i Warnera Pickup and Warner method	Metoda Woodyera Woodyer method	Metoda Radeckiego-Pawlika i Skalskiego (IBA) Radecki-Pawlik and Skalski method (IBA)
Terasa zalewowa Floodplain $Q_b = 13,88$ $m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_b = 4,10$ $m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_b = 4,10$ $m^3 \cdot s^{-1}$	Dla / For $n_{min} = 0,020$ $Q_b = 23,37$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Dla / For $n_{sr} = 0,025$ $Q_b = 18,67$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Dla / For $n_{max} = 0,030$ $Q_b = 15,58$ $m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_b = 19,94$ $m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_b =$ $Q_{50\%} \div Q_{25\%}$ $Q_{50\%} =$ $11,30 m^3 \cdot s^{-1}$ $Q_{25\%} =$ $21,20 m^3 \cdot s^{-1}$	Wysoka elewacja High elevation $Q_b = 40,47$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Średnia elewacja Average elevation $Q_b = 11,10$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Niska elewacja Low elevation $Q_b = 3,20$ $m^3 \cdot s^{-1}$	Terasa wysoka High elevation $IBA > 1$ $Q_b = 38,40$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Terasa średnia Average elevation $IBA \leq 1$ $Q_b =$ $11,10 \div 38,40$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Wartość średnia Average value $Q_{b,sr} = 24,75$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Terasa niska Low elevation $IBA \ll 1$ $Q_b = 4,10 \div 11,10$ $m^3 \cdot s^{-1}$ Wartość średnia Average value $Q_{b,sr} = 7,60$ $m^3 \cdot s^{-1}$

mają zastosowanie tylko w korytach jednonurtowych, uregulowanych oraz o prostej geometrii koryta.

W metodzie Wołoszyna na poziomie pierwszej terasy zalewowej otrzymano przepływ brzegowy $Q_b = 13,88 m^3 \cdot s^{-1}$.

Uśredniona (z wszystkich wymienionych wyżej metod) wartość $Q_b = 17,7 m^3 \cdot s^{-1}$ jest zbliżona do wartości $Q_b = 18,67 m^3 \cdot s^{-1}$ uzyskanej metodą Schumma, Browna i Warnera dla średniego współczynnika szorstkości Manninga $n_{sr} = 0,025$. Jego wartość jest najbardziej odpowiednia do użycia, co stwierdzono na podstawie obserwacji terenowej. Ponadto, zgodnie z metodą Williamsa, przepływ brzegowy $Q_b = 19,94 m^3 \cdot s^{-1}$, co świadczy o dużym podobieństwie obydwu metod opartych na modelu Gaucklera-Manninga.

Uzyskany ostatecznie wynik $Q_b = 17,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ potwierdza obecną sytuację hydrologiczną w tej części Karpat, gdzie występowały wezbrania i znaczne powodzie w 1997, 2000 i 2003 roku, kiedy wartość przepływu była zbliżona do obliczonej lub większa. Wezbrania te charakteryzowały się przepływem $Q_{\text{max}20\%} = 40,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co zostało odnotowane na stacji pomiarowej w Tylmanowej. Na przekroju badawczym wartość przepływu wezbraniowego ($Q_{\text{max}20\%} = 23,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) została obliczona na podstawie analogii hydrologicznej metodą Fal (Stachy i Fal, 1986) z wykorzystaniem wartości przepływu zaobserwowanej na wodowskazie w Tylmanowej. Wartość ta jest zbliżona do średniej wartości przepływu brzegowego obliczonej ze wszystkich analizowanych metod ($Q_b = 17,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Wyniki uzyskane za pomocą metody roślinnej Woodyera pokazują, że wartość przepływu brzegowego $Q_b = 11,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Porównując tę wartość z wynikiem uzyskanym metodą geometryczną Wołoszyna ($Q_b = 13,88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), możemy wnioskować, że rośliny przekroczyły dolną granicę terasy – elewacji średniej i powoli wkraczają na niżej położone tereny. Może to świadczyć o braku w ostatnich latach znaczącego wezbrania, które mogłoby tę sukcesję zatrzymać lub przynajmniej spowolnić.

Zgodnie z metodą biologiczną IBA Radeckiego-Pawlika i Skalskiego przepływ Q_b na średniej terasie zalewowej mieścił się w zakresie 11,10–38,40 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średnia wartość przepływu brzegowego na tej terasie wyniosła zatem 24,75 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Reasumując, można stwierdzić, iż wartość przepływu brzegowego w zależności od wykorzystanej metody obliczeniowej zawiera się w przedziale od $Q_b = 11,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $Q_b = 24,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co odpowiada zalewaniu średniej terasy. Jeżeli potrzebna jest informacja o jednej wartości przepływu, to można uśrednić wartości uzyskane poszczególnymi metodami, ale tylko tymi, których wartości są miarodajne (w tym przypadku – gdy zalewana jest terasa średnia). Stąd wartość przepływu brzegowego $Q_b = 17,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ obliczona w przekroju badawczym na podstawie uśrednionych wartości uzyskanych metodami empirycznymi i abiotycznymi wydaje się najlepsza. Wartość ta powinna być wyjściowa dla geomorfologów, ekologów i hydrotechników, którzy chcieliby podejmować prace w korycie rzeki Ochotnicy w miejscowości Ochotnica Górna.

Podsumowanie

Z wcześniejszych informacji wynika, że istnieje wiele metod służących do określania przepływu brzegowego. Wyniki uzyskiwane za pomocą poszczególnych metod są zróżnicowane, dlatego najbardziej słuszny wydaje się dobór metody do lokalnych warunków geometrycznych, hydrologicznych i biologicznych.

W przypadku potoku górskiego przepływ brzegowy wypełnia stabilne koryto aluwialne do wysokości aktywnego obszaru zalewowego. Często bardzo trudno jest określić rozmiar granicy przepływu, dlatego scharakteryzowano kilka najbardziej popularnych metod określania przepływu brzegowego, które mogą być używane do rzek i potoków górskich.

Metody biologiczne pozwalają na ustalenie przepływu brzegowego z wykorzystaniem flory i fauny nadrzecznej. Występowanie stref porośniętych charakterystyczną roślinnością oraz obserwacje występowania i rozmiarów chrząszczy z rodziny Coleoptera: Carabidae powodują, iż możemy dokonywać obliczeń przepływu z uwzględnie-

niem lokalnych siedlisk zwierzęcych i zgrupowań roślinnych. Metody biologiczne powinny jednak być używane jako uzupełnienie metod empirycznych, co stwierdzają w swoich pracach Woodyer (1968) oraz Radecki-Pawlik i Skalski (2008).

W literaturze są rozpowszechnione również metody oparte na formule Gaucklera-Manninga, gdzie decydującymi parametrami są: geometria koryta, spadek zwierciadła wody oraz współczynnik szorstkości Manninga, który powinien być bardzo starannie określany w terenie.

Metody empiryczne – geometryczne Wolmana i Rileya nadają się tylko do koryt – odpowiednio – prostokątnych oraz trapezowych o łagodnie nachylonych skarpach. Jednakże dno tych kanałów nie może się charakteryzować złożoną geometrią, czyli zbyt dużą liczbą form korytowych. W takim przypadku, obliczając indeksy R_w i BI , otrzymujemy bowiem wiele ekstremów, które odpowiadają wylewaniu wody na łachy korytowe.

W przypadku przekroju badawczego rzeki Ochotnicy wartość przepływu brzegowego Q_b mieściła się w zakresie 11,10–24,75 m³·s⁻¹, a jego wartość uśredniona 17,7 m³·s⁻¹.

Literatura

- Brzeziński, J., Ozga-Zielińska, M. (1997). *Hydrologia stosowana*. Warszawa: PWN.
- Chow Ven, T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Darley, L. (1996). *L'Écoulement a plein bord dans les rivières alluviales. Méthodes d'estimation du niveau et du débit*. Département Gestion des Milieux Aquatiques, Division Hydrologie-Hydraulique.
- Lambor, J. (1971). *Hydrologia inżynierska*. Warszawa: PWN.
- Łapuszek, M., Lenar-Matyas, A. (2013). *Utrzymanie i zagospodarowanie rzek górskich*. Kraków: Wyd. PK.
- Nakayamaa, K., Fielding, Ch. R., Alexander, J. (2002). Variations in character and preservation potential of vegetation-induced obstacle marks in the variable discharge Burdekin River of north Queensland, Australia. *Sediment. Geol.*, 149, 199–218.
- Nixon, M. (1959). A study of bankfull discharge of rivers in England and Wales. *Proc. Inst. Civil Eng.*, 12, 157.
- Pickup, G., Warner, R. (1976). Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. *J. Hydrol. (Amst.)*, 29, 51–75.
- Pleus, A. E., Schuett-Hames, D. (1998). *Method manual for the reference point survey*. Olympia, WA: TFW Monitoring Program.
- Radecki-Pawlik, A. (2002). Bankfull discharge in mountain streams: theory and practice. *Earth Surf. Process. Landforms*, 27, 2, 115–123.
- Radecki-Pawlik, A. (2011). *Hydromorfologia rzek i potoków górskich*. Kraków: Wyd. UR.
- Radecki-Pawlik, A. (2015). Why do we need bankfull and dominant discharges? W: P. Rowiński, A. Radecki-Pawlik (red.), *Rivers – physical, fluvial and environmental processes* (s. 497–518). Switzerland: Springer.
- Radecki-Pawlik, A., Bichoński, A., Latoń, J. (2000). Metoda wskaźników roślinnych Woodyera jako sposób określania wartości przepływu brzegowego w potoku górskim. *Zesz. Nauk. AR Krak.*, 370, Inż. Środ., 20, 129-144.
- Radecki-Pawlik, A., Skalski, T. (2008). Bankfull discharge determination using the new Invertebrate Bankfull Assessment Method. *J. Water Land Dev.*, 12, 145–153.
- Radecki-Pawlik, A., Tyrka, M., Radecki-Pawlik, B., Zasępa, P. (2005). Wyznaczenie wielkości przepływu brzegowego w dwóch zróżnicowanych zlewniach górskich. *Infrastrukt. Ekol. Ter. Wiej.*, 1, 69-82.

- Riley, S. J. (1972). A comparison of morphometric measures of bankfull. *J. Hydrol. (Amst.)*, 17, 23–31.
- Skalski, T., Kędzior, R., Radecki-Pawlik, A. (2008). Czynniki kształtujące strukturę zgrupowań biegaczowatych (*Coleoptera: Carabidae*) na terenach zalewowych rzek górskich. *Infrastrukt. Ekol. Ter. Wiej.*, 3, 13-21.
- Stachy, J., Fal, B. (1986). Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych. *Pr. Inst. Bad. Dróg Mostów*, 3–4, 91–147.
- Wałęga, A., Radecki-Pawlik, A., Kaczor, G. (2013). Naturalne sposoby zagospodarowania wód opadowych. Kraków: Wyd. UR.
- Williams, G. (1978). Bankfull discharge for rivers. *Water Resour. Res.*, 4, 1141–1153.
- Wolman, M. (1955). The natural channel of Brandywine River. *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 271.
- Wołoszyn, J., Czamara, W., Eliasiewicz, R., Krężel, J. (1994). Regulacja rzek i potoków. Wrocław: Wyd. AR.
- Woodyer, K. D. (1968). Bankfull frequency in rivers. *J. Hydrol. (Amst.)*, 6, 114-142.

BANKFULL DISCHARGE METHODS IN MOUNTAIN STREAMS: BASIC CHARACTERISTICS

Summary. The article provides an overview of the most commonly used in the world and in Poland methods of determining the bankfull discharge. Bankfull value should be the main criterion for the selection of issues related to hydrological calculations and additionally to hydraulic calculations of river channel shape in river engineering works and designing chosen hydraulic structures, as it is in some Western European countries. The knowledge of the value of this parameter is also important for environmentalists and hydrobiologists. Thus, the reader can find along the paper different approaches of bankfull discharge based on morphological and biotic (plant, animal) methods. The paper presents not only the theoretical descriptions of selected methods, their advantages and disadvantages, but above all practical examples of the determination of the bankfull discharge values for one of the Carpathian rivers.

Key words: bankfull discharge, mountain streams, the Ochotnica river

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Wiktoria Czech, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kolltataja w Krakowie, Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, Poland, e-mail: laszek.w@gmail.com

Zaakceptowano do opublikowania – Accepted for publication:

16.02.2016

Do cytowania – For citation:

*Czech, W., Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A. (2016). Charakterystyka metod wyznaczania przepływu brzegowego w rzekach górskich. *Nauka Przyr. Technol.*, 10, 2, #19. DOI: 10.17306/J.NPT.2016.2.19*