

## ANALIZA PRZEPUSTOWOŚCI RZEKI WISŁY NA OBSZARZE CHRONIONYM

Leszek Książek✉, Jacek Florek, Maciej Wyrębek

Faculty of Environmental Engineering and Land Surveying, University of Agriculture in Krakow, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Krakow

### ABSTRAKT

Nadzwyczajne zdarzenia powodziowe wywołują dyskusje o skuteczności ochrony przeciwpowodziowej. Składają się na nią między innymi pytania o przepustowość koryta i międzywala czy też o priorytety w ochronie mienia i życia ludzi oraz w ochronie przyrody. Dotychczasowy model rozstrzygnięcia tych kwestii wymaga nowego spojrzenia uwzględniającego zasady zrównoważonego rozwoju. W pracy podjęto się sprawdzenia, czy potencjalny konflikt pomiędzy ochroną przeciwpowodziową a ochroną przyrody możliwy jest do rozstrzygnięcia przy wykorzystaniu metod inżynierskich bez naruszania siedlisk cennych z przyrodniczego punktu widzenia.

### Materiały i metody

W pracy poddano analizie wpływ wysp w korycie na przepustowość oraz wyznaczono strefę aktywną przekrojów poprzecznych w celu zapewnienia minimalnej przepustowości koryta wielkiej wody z jednoczesnym ograniczeniem wpływu na obszary cenne przyrodniczo. W tym celu wykorzystano wyniki modelowania numerycznego (1D) w połączeniu z metodą Pasche.

### Wyniki i wnioski

W związku z zagrożeniem bezpieczeństwa wywołanym powodzią wykazano nieznaczny wpływ wysp na przepustowość oraz wskazano obszary do udrożnienia i obszary chronione. Wyniki metody Pasche pokazują, że dla różnego pokrycia terenu aktywny przekrój zmniejszył się do 50% wartości pierwotnej powierzchni przekroju poprzecznego. Wynikiem zastosowania metody Pasche jest strefa  $b_{II}$ , która obejmuje tylko część przykorytową cieku, tj. wyznaczona strefa ingerencji pokrywa się z zakresem oddziaływania obszaru ruchu wody. Takie podejście do udrożnienia koryta jest niewystarczające, ponieważ nie zapewnia zminimalizowania ingerencji w pokrycie terenu przy uzyskaniu maksymalnych efektów zwiększenia przepustowości koryta wielkiej wody. Ponadto implementacja metody Pasche do dużych rzek i długich odcinków wymaga poszukiwania rozwiązania w każdym przekroju metodą kolejnych przybliżeń.

**Słowa kluczowe:** ochrona przeciwpowodziowa, ochrona przyrody, metoda Pasche, przepustowość koryta

### WSTĘP

Udrażnianie teras zalewowych jako metoda poprawy ochrony przeciwpowodziowej jest bardzo złożonym procesem, który stwarza wieloaspektowe wyzwania dla osób podejmujących decyzje i kierowników projektów (Knight, 2013a). Z hydraulicznego punktu wi-

żenia wynika to z interakcji między rzeką a terasami zalewowymi (Moss, 2010) oraz koniecznością zachowania siedlisk w związku z ochroną przyrody.

Dotychczasowy rozwój społeczeństw, który wiązał się ze zwiększaniem presji wywołanej przez aktywność człowieka na środowisko, ignorował ekologiczny i społeczny wymiar kosztów rozwoju. Koncepcja

✉e-mail: [leszek.ksiazek@urk.edu.pl](mailto:leszek.ksiazek@urk.edu.pl)

zrównoważonego rozwoju zakłada (Trzepacz, 2012 za: Poskrobko, 2009) prewencyjne wyeliminowanie, albo przynajmniej ograniczenie nierównowagi między wzrostem gospodarczym i rozwojem społecznym, a stanem środowiska przyrodniczego. Uniwersalność zasad składających się na koncepcję zrównoważonego rozwoju sprawiła, że od chwili ich zaprezentowania (WCED Raport, 1987) stosuje się je jako podstawę do budowy rozwiązań konkretnych problemów rozwojowych, m.in. koncepcje krajobrazu zrównoważonego (Solon, 2004), zrównoważonej turystyki (Huijbens, 2010), transportu (Mikłaszewski, 2000), energetyki (Kassenberg, 2009), gospodarki leśnej i rolnej (Symonides, 2008), urbanizacji (Baranowski, 2001; Sołtyś, 2010; Alberti, 1996 za: Mierzejewska, 2008), czy też zarządzania gruntami (Kuryltsiviin, 2018). Koncepcja zrównoważonego rozwoju odnosi się również do gospodarki wodnej.

Obok bezpieczeństwa państwa – społecznego, kulturowego, militarne – należy wyróżnić bezpieczeństwo ekologiczne i hydrologiczne (Abgarowicz i in., 2015). Bezpieczeństwo hydrologiczne obejmuje zagadnienia: suszy (Tokarczyk i Szalińska, 2018), zanieczyszczenia rzek (Vadde i in., 2018), nieodpowiednich przepływów wymaganych ekologicznie, braku impulsu wezbraniowego dla obszarów mokradłowych (pożądane wezbranie) (Książek i in., 2019), znaczenia starorzeczy (Stred'anský i in., 2013; Strużyński i in., 2015), ale przede wszystkim ryzyka powodzi (Sayers i in., 2015; Lucas i Kibler, 2015). Niekorzystne skutki powodzi obejmują skutki bezpośrednie – niszczenie mienia, wpływ na zdrowie, dobrostan i produktywność oraz pośrednie, które odczuwalne są w rolnictwie,

transporcie, zaopatrzeniu w wodę, ochronie zdrowia, przemyśle, infrastrukturze energetycznej, komunikacyjnej, telekomunikacyjnej oraz turystyce (Kundzewicz i in., 2017; Sowiński, 2008). Negatywne skutki powodzi mogą być odczuwalne długo i obejmować obszary znacznie większe od dotkniętych bezpośrednio zalaniem, np. wzrost cen żywności, spadek cen nieruchomości na terenach zalewowych, konieczność ograniczenia produkcji pociągającą za sobą spadek konkurencyjności wybranych branż lub regionów, ograniczenie popytu na rynku dotkniętym powodzią (Sowiński, 2008 za Smith i Ward, 1998). Jedną z form ochrony przyrody (art. 5 Ustawy o ochronie przyrody Dz. U. z 2020 r. poz. 55 ze zmianami) są ostoje „Europejskiej Sieci Ekologicznej NATURA 2000”. Obecność gatunków (dyrektywa ptasia) (2009/147/WE) lub siedlisk (dyrektywa habitatowa) (92/43/EWG) stanowiących podstawę do tworzenia sieci NATURA 2000 często związana jest z prowadzeniem działań z zakresu rolnictwa, leśnictwa lub innych form gospodarowania. Nie są to więc rezerваты, ale obszary zrównoważonego współistnienia walorów przyrodniczych i człowieka. Warunkiem jest jednak utrzymanie we właściwym stanie ochrony gatunków i siedlisk, dla których utworzono dany obszar. W tabeli 1 zestawiono obszary objęte ochroną oraz formę i przedmiot ochrony na odcinku Wisły w rejonie ujścia Sanu.

Dla form ostoi ustawodawca nie określił, tak jak dla parków narodowych i rezerwatów przyrody, zamkniętej listy zakazów (art. 33 Ustawy o ochronie przyrody Dz. U. z 2020 r. poz. 55 ze zmianami), a jedynie ograniczył się do zaleceń o wysokim stopniu ogólności. W przypadku działań służących realizacji

**Tabela 1.** Obszary objęte ochroną, Wisła, regiony Kotliny Sandomierskiej i Przełomu przez Wyżyny

**Table 1.** Protected areas, The Vistula River, The Sandomierska Basin and The Gorge through the Highlands regions

Obszary objęte ochroną Protected areas	Kod Code	Obszar Natura 2000 Natura 2000 site	Podmiot ochrony Protected targets
Tarnobrzeska Dolina Wisły	PLH180049	7 siedlisk i 14 gatunków	Lasy łęgowe: wierzbowe, topolowe, olszowe i jesionowe; Muliste, okresowo zalewane brzegi rzek; Starorzecza i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne ze zbiorowiskami Nymphaeion i Potamion; Rybitwy: rzeczna <i>Sterna hirundo</i> i białoczelna <i>Sternula albifrons</i> ; Kumak nizinny; Ryby
Dolina Dolnego Sanu	PLH180020	14 siedlisk i 19 gatunków	
Przełom Wisły w Małopolsce	PLH 060045	11 siedlisk i 14 gatunków	
Małopolski Przełom Wisły	PLB 140006	14 gatunków ptaków, 4 z PCK	
Wisła pod Zawichostem	–	Rezerwat ptaków, rzadkie rybitwy	

ważnego interesu społecznego i wobec braku rozwiązań alternatywnych, zarówno prawo wspólnotowe, jak i polskie ustawodawstwo dopuszcza działania mogące doprowadzić do pogorszenia stanu ochrony gatunków i siedlisk (Dz. U. z 2020 r. poz. 55 art. 34). Zezwolenie na realizację planu lub działań mogących znacząco negatywnie oddziaływać na cele ochrony obszaru Natura 2000 lub obszary znajdujące się na liście, może zostać udzielone wyłącznie w celu: a) ochrony zdrowia i życia ludzi; b) zapewnienia bezpieczeństwa powszechnego; c) uzyskania korzystnych następstw o pierwszorzędym znaczeniu dla środowiska przyrodniczego; d) wynikającym z koniecznych wymogów nadrzędnego interesu publicznego, po uzyskaniu opinii Komisji Europejskiej (Bartnik i in., 2017).

Bezpośrednim impulsem do podjęcia tematyki ochrony przeciwpowodziowej na obszarach objętych ochroną przyrody były wnioski lokalnych samorządów z rejonu objętego powodzią w 2010 roku. Wnioski te dotyczyły zarówno potrzeby opracowania koncepcji udrożnienia koryta Wisły, jak i likwidacji rezerwatu przyrody „Wisła pod Zawichostem” (Bartnik i in., 2017). Według wnioskodawców obowiązujące na terenie rezerwatu zakazy przyczyniają się do wzrostu zagrożenia powodziowego ze względu na brak możliwości wycinki drzew i krzewów z międzywala oraz możliwości usuwania osadów dennych z koryta głównego. Również wiele inicjatyw gospodarczych było blokowanych już na etapie przyznawania koncesji ze względu na zasadę ostrożności i brak realnych podstaw naukowych do wnioskowania o szkodliwości tego rodzaju przedsięwzięć dla ptaków.

Różnica w ocenie sytuacji dotyczyła łęgów rybitw białoczelnej i rzecznej zlokalizowanych na wyspach w korycie głównym. Problem, postrzegany też jako konflikt, polega na tym, że populacje rybitwy białoczelnej zajmujące ten rezerwat należą do najcenniejszych w Europie, zaś łęgi porastające międzywale to siedlisko priorytetowe dla Unii Europejskiej (Kaszyński i Szczukowska, 2012). Dla zobrazowania prezentowanych opinii przeprowadzono ankietę wśród mieszkańców (N = 128), która dotyczyła ochrony przeciwpowodziowej oraz ochrony przyrody (Bartnik i in., 2017). Prezentowane opinie wyrażały bardzo szerokie spektrum wiedzy i zapatrywań na poruszane tematy oraz często bardzo skrajne poglądy: z jednej strony wskazywały na konieczność prowadzenia prac

regulacyjnych w korycie rzeki (49% ankietowanych) i poprawę przepustowości przez wycinkę drzew i zarośli na terasach zalewowych (41%) przy jednoczesnej świadomości obecności chronionych gatunków na omawianym terenie. Wskazuje to na wyższy priorytet ochrony przeciwpowodziowej nad ochroną przyrody wśród interesariuszy.

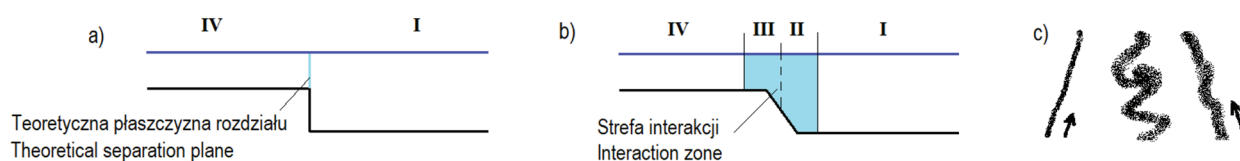
Celem artykułu jest analiza przepustowości obwałowanej doliny rzecznej na obszarach chronionych Natura 2000 na odcinku rzeki Wisły jako przykład zastosowania koncepcji zrównoważonego rozwoju w gospodarce wodnej. Badając przepustowość koryta dwudzielnego na odcinku Przełomu Wisły, przeanalizowano dwa zagadnienia: 1. wpływ wysp w korycie głównym na przepustowość w czasie przepływów powodziowych, 2. wskazanie lokalizacji obszarów wycinki lasu na terasach zalewowych przy ograniczeniu kolizji z obszarami cennych lasów zgodnie z programem Natura 2000.

## MATERIAŁY I METODY

Ocena przepustowości koryta wymaga określenia warunków przepływu od stanów niskich do wysokich, z uwzględnieniem pokrycia terenu. Do oszacowania wpływu wysp na kształtowanie się warunków przepływu oraz wyznaczenia strefy aktywnej przekrojów poprzecznych wykorzystano wyniki modelowania jednowymiarowego (1D) w połączeniu z metodą Pasche.

### Interaktywność terenów zalewowych i koryta głównego

Zróznicowanie wartości prędkości w przekroju złożonym związane jest z problemem przekazywania pędu w strefie pomiędzy korytem głównym a terasą zalewową. W przypadku cieczy idealnej przekazywanie pędu odbywa się w płaszczyźnie pionowej (rys. 1a). W cieczy rzeczywistej (rys. 1b) obszary I i IV obejmują, odpowiednio, niezakłócone przepływy w korycie głównym oraz na terenie zalewowym. Obszar III jest to obszar z przepływem na terenie zalewowym przyspieszonym przez przepływ w korycie głównym, natomiast obszar II z przepływem opóźnionym w korycie głównym przez przepływ na terenie zalewowym. W obszarze II i III następuje proces wymiany pędu wraz z tworzeniem się struktur wirowych, który okre-



**Rys. 1.** Obszar wymiany pędu w korycie złożonym; a) ciecz idealna, b) ciecz rzeczywista, c) duże wiry w strefie interakcji widoczne w warunkach laboratoryjnych (na podstawie: Devi and Khatua, 2016 za: Van Prooijeniin., 2005); I–IV – strefy przepływu

**Fig. 1.** Momentum exchange area in a compound channel; a) ideal liquid, b) real liquid, c) large coherent structures in mixing layer made visible by dye injection (based on: Devi and Khatua 2016 after Van Prooijen et al. 2005); I–IV – flow zones

ślono jako efekt kinematyczny (Żeleźniakow, 1950), a współcześnie interakcją strumieni (Kubrak i in., 2019). Obszar ten charakteryzuje się znacznym gradientem prędkości wody oraz trójwymiarową strukturą przepływu, którą cechują zróżnicowane wartości prędkości w pionach hydrometrycznych i na szerokości koryta, wielkoskalowe wiry o pionowej osi (van Prooijen i in., 2005) (rys.1c) oraz ruch spiralny (Kubrak i Nachlik, 2003; Knight, 2013b).

Zróżnicowanie chropowatości powierzchni koryta głównego i terenów zalewowych związane między innymi z występującą tam roślinnością (Bretschneider i Schulz, 1985; Nepf, 2012; Järvelä, 2010; Aberle i Järvelä, 2013) intensyfikuje proces tworzenia wirów i przepływów wtórnych w korycie głównym, co wpływa na przepustowość koryta o złożonym przekroju (Shiono i Knight, 1991; Tominaga i Nezu, 1991; van Prooijen i in., 2000). Ponadto wartości prędkości przepływu wody w korycie głównym i na terenach zalewowych są uzależnione od głębokości wody, spadku dna, rodzaju pokrycia dna i skarp, koryta głównego i terenów zalewowych (Kubrak, 2019). Peltier i in. (2013) podkreślają wpływ budowli hydrotechnicznych (ostróg) na prędkość przepływu w strefie brzegowej, w której prędkość poprzeczna może dochodzić do 50% wartości prędkości w korycie głównym.

Interakcja koryta głównego i terenów zalewowych w korytach o złożonym przekroju powoduje, że szybko płynące masy wody z koryta głównego przemieszczają się w kierunku terenów zalewowych o mniejszej prędkości przepływu, a wolniej płynące masy wody na terenie zalewowym przemieszczają się w kierunku koryta głównego. Wskutek interakcji i transferu pędu przepustowość koryta o złożonym

przekroju ulega zmniejszeniu o 10÷20% w stosunku do koryta po wyeliminowaniu wymiany pędu (Evers, 1983). Opory ruchu uwzględnione są współczynnikiem oporów liniowych Darcy-Weisbacha (Hin i in., 2008) lub współczynnikiem Manninga „n” z korektą o współczynnik reprezentujący stosunek oporu terasy zalewowej i koryta głównego (Smart, 1992). Na końcowy wynik obliczeń układu zwierciadła wody ma też wpływ sposób podziału przekroju koryta dwudzielnego w modelu (Zahiri i Najafzadeh, 2018).

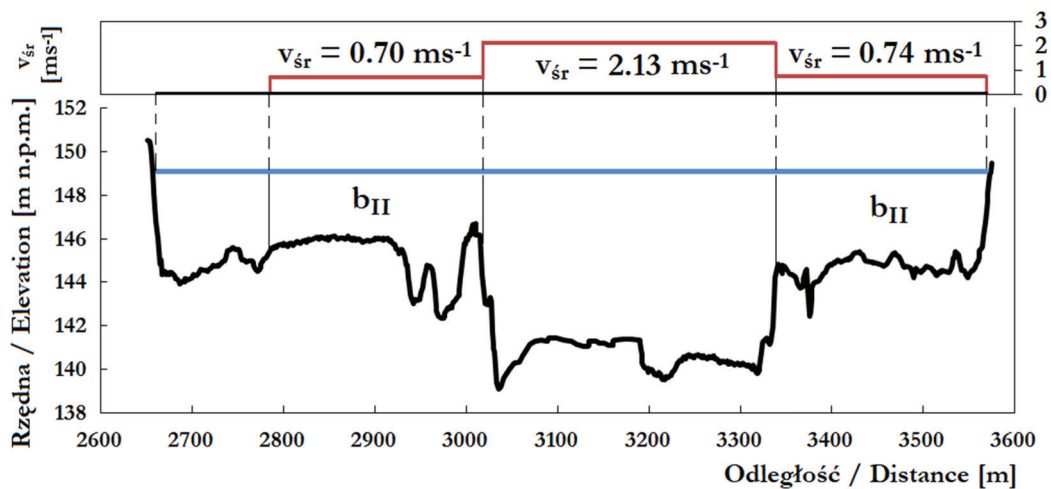
### Metoda Pasche

Wpływ interaktywności roślinności i koryta głównego na warunki przepływu opisany został przy wykorzystaniu metody Pasche (1984), która wprowadza pojęcie przekroju aktywnego. Przekrój aktywny  $A_c$  obejmuje koryto główne oraz strefy interakcji koryta głównego  $b_{II}$  i terenów zalewowych wyznaczone z zależności:

$$b_{II} = \frac{R_{hz}^{4/3}}{8gn_z^2(0.068e^{0.56C_T} - 0.056)} \quad (1)$$

gdzie:

- $b_{II}$  – szerokość strefy interakcji [m] (rys. 2),
- $R_{hz}$  – promień hydrauliczny terenu zalewowego [m],
- $n_z$  – współczynnik szorstkości terenów zalewowych,
- $C_T$  – parametr określający tzw. prędkość poślizgu („slip-velocity”) w metodzie Pasche (1984) (Kałuża, 2000; Kałuża i Laks, 2005). Wartość parametru  $C_T$  zwiększa się wraz ze wzrostem stopnia zarośnięcia koryta (tab. 2) (Bartnik i in., 2011).



**Rys. 2.** Szerokość przekroju aktywnego  $b_{II}$ , Wisła, km 658+631, przepływ  $Q_{1\%} = 7338 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Źródło: opracowanie własne)  
**Fig. 2.** Width of active cross-section  $b_{II}$ , The Vistula River, km 658+631 for discharge  $Q_{1\%} = 7338 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Source: own study)

**Tabela 2.** Współczynniki szorstkości  $n$  oraz parametr  $C_T$  dla różnych form pokrycia terenu  
**Table 2.** Roughness coefficients  $n$  and factor  $C_T$  for various forms of land cover

	Pokrycie terenu/Land cover	$n$	$C_T$
Koryto Main channel	ziemia, muł, piasek; soil, mud, sand	0,020–0.022	1.6
	żwir, kamienie; gravel, stones	0.026–0,027	1.6
Skarpy I terasa zalewowa River banks and floodplain	trawa niska/wysoka; low/high grass	0.030/0.040	1.6/2.0
	uprawy zbożowe; cereal crops	0.040	2.2
	las rzadki/gęsty; rare / dense forest	0.045/0.100	2.5/3.2
	zakrzaczenia niskie/wysokie; low / high bushes	0.053/0.130	4.4/6.4
	nieużytki; barren	0.053	2.2
	drogi asfaltowe/gruntowe; asphalt / dirtroads	0.015/0.031	0.8/1,6
	obiekty kubaturowe; cubature objects	0.040-0.045	6.4

### Modelowanie numeryczne

**HEC-RAS** jest jednowymiarowym modelem służącym do obliczeń ustalonego i nieustalonego przepływu w korytach otwartych i przewodach zamkniętych (HEC-RAS, 2016). Program ten bazuje na wzorze Chezy na średnią prędkość przepływu

$$v = C \cdot R_h^{1/2} \cdot S_f^{1/2}, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

gdzie:

$C$  – współczynnik prędkości [ $\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $R_h$  – promień hydrauliczny [m],  $R_h = F/O_z$ ,

$O_z$  – obwód zwilżony [m],

$F$  – pole przekroju poprzecznego [ $\text{m}^2$ ],

$S_f$  – spadek hydrauliczny (linia energii) [–].

Układ zwierciadła wody wyznaczany jest z zasady zachowania energii, która ma postać:

$$Zd_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Zd_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e \quad (2)$$

$$h_e = \bar{S}_f \cdot L_p + C_d \left[ \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right] \quad (3)$$



gdzie:

- $\bar{S}_f$  – spadek tarcia między dwoma sąsiednimi przekrojami,
- $L_p$  – średnia ważona odległość między przekrojami,
- $C_d$  – współczynnik kontrakcji lub dyfuzji w zależności od kształtu strumienia w planie.

Błąd bezwzględny określenia rzędnej zwierciadła wody przez program HEC-RAS wynosi  $\Delta h = 0,003$  m, spadku linii energii  $\Delta J = 1 \cdot 10^{-6}$ , a powierzchni przekroju przepływu  $\Delta F = 0,01$  m<sup>2</sup> (Michalik i Książek, 2009). Etapy powstawania modelu i procedura jego kalibracji zostały opisane w pracy Książka i in. (2010b oraz 2010a). Kryterium najtrudniejszym do spełnienia ze względu na zmiany morfologiczne koryta był błąd kulminacji fali  $\Delta h_{\max}$  dla przepływu korytowego  $Q = 869$  m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> (16.05.2014 r.) oraz dla warunków występujących podczas powodzi w przekrojach powyżej (km 658 + 592) i poniżej (km 657 + 338) na odcinku przerwania wału dla przepływu, tj.  $Q = 6048$  m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> oraz  $Q = 5270$  m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> (Kądziołka i in., 2011). Wartość błędu kulminacji wynosiła  $\Delta h_{\max} = 0,04$  m w przekro-

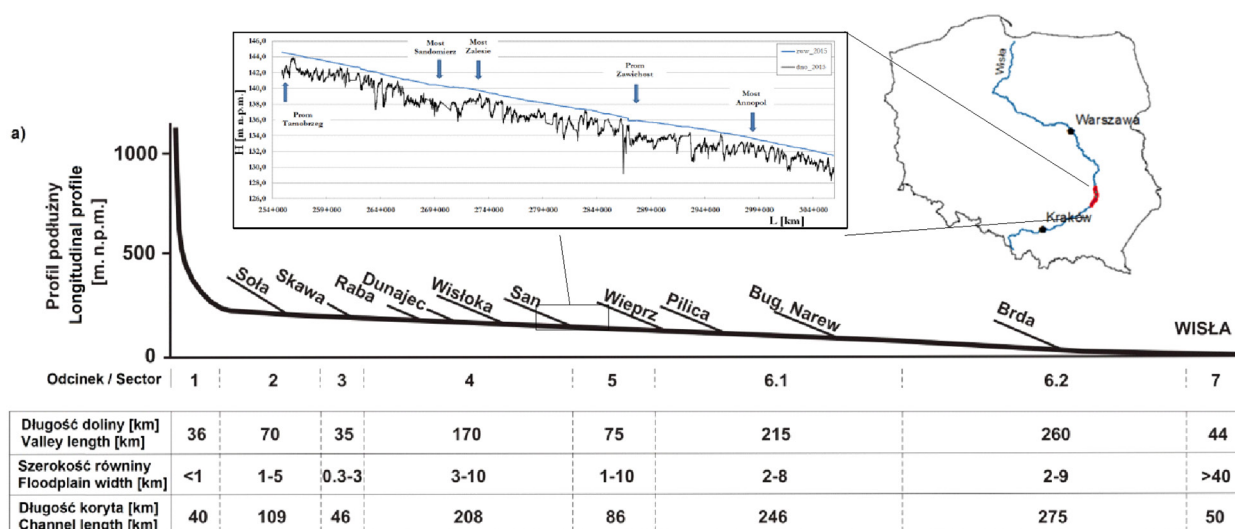
ju km 658 + 592, co na podstawie oceny miar zgodności pozwala ocenić model jako znakomity, natomiast w przekroju km 657 + 338  $\Delta h_{\max} = 0,09$  m jako bardzo dobry (Bartnik i in., 2017).

### Analizy przestrzenne

Przestrzenne złączenie warstw obejmowało powierzchnię strefy aktywnej  $b_{II}$  oraz form ochrony przyrody, takich jak obszary Natura 2000 oraz rezerwaty (Portal GDOŚ, 2020). Warstwa obszaru objętego ochroną, gdzie czynności prowadzące do udrożnienia mogą być przeprowadzone wyłącznie w określonych warunkach, w połączeniu z warstwą strefy aktywnego ruchu wody  $b_{II}$  wyznacza obszar konfliktu pomiędzy potrzebami ochrony środowiska i konieczności zapewnienia bezpiecznego przejścia fali powodziowej.

### Opis badanego odcinka

Analizę przepustowości koryta wykonano na odcinku rzeki Wisły obejmującym Małopolski Przełom Wisły (km 667 + 963 ÷ 616 + 754). Długość odcinka badawczego wynosi 51,2 km i rozpoczyna się w miejscowości Tarnobrzeg (rys. 3). Wisła w swoim



**Rys. 3.** Rzeka Wisła, a) charakterystyka odcinków doliny Wisły na tle profilu podłużnego, 1 – Karpaty, 2 – Kotlina Oświęcimska, 3 – Brama Krakowska, 4 – Kotlina Sandomierska, 5 – Przełom przez Wyżyny, 6 – Niż Polski: 1 – mazowiecki, 2 – kujawsko-pomorski, 7 – Delta Wisły (wg: Starkel 1990, zmienione), b) konfiguracja dna oraz układ zwierciadła wody, jesień 2015 r.  
**Fig. 3.** The Vistula River, a) characteristics of sections of the Vistula valley against the background of the longitudinal profile, 1 – Carpathians, 2 – Oswiecim Basin, 3 – Krakowska Geate, 4 – Sandomierska Basin, 5 – Gorge through the Highlands, 6 – Lowlands of Poland: 1 – Masovian, 2 – Kuyavian-Pomeranian, 7 – Vistula Delta (according to: Starkel 1990, modified), b) the bottom of the channel and water surface level, autumn 2015

środkowym biegu, mimo że przepływa przez gęsto zaludnione tereny, w dużym stopniu zachowała charakter naturalnej rzeki nizinnej. Unikatowy charakter Wisły znalazł odzwierciedlenie w „Paneuropejskiej strategii ochrony różnorodności biologicznej i krajobrazowej”, w której Dolinę Wisły zaliczono do 10 systemów rzek Europy o priorytecie ochrony naturalnych walorów. Na omawianym terenie znajdują się dwie ostoje NATURA 2000 „Przełom Wisły w Małopolsce” (PLH 060045) oraz „Małopolski Przełom Wisły” (PLB 140006).

Przedmiotem ochrony są siedliska i gatunki (tab. 1.), tj. zbiorowiska łągów, muliste, okresowo zalewane brzegi rzek, starorzecza, rybitwy: rzeczna *Sterna hirundo* – w Polsce występuje 2,5% populacji UE i białoczelna *Sternula albifrons* – w Polsce 4,4% populacji UE, kumak nizinny oraz ryby. Analiza części omawianego odcinka wykazała brak większych form dennych oraz ujednolicenie warunków hydraulicznych z dominującymi wielkościami napełnień w zakresie stanów niskich na obszarach zwiężeń i aż 25% pokrycie nimi obszaru całego koryta (Florek i in., 2020).

Aktualizację modelu koryta rzeki wykonano na podstawie pomiarów terenowych zrobionych w 2015 roku, które obejmowały profil podłużny dna w nurcie głównym o długości 52,4 km na odcinku od Tarnobrzegu (przeprawa promowa) do Słupii Nadbrzeżnej. Przekroje poprzeczne (ponad 100) i układ zwierciadła wody pomierzono za pomocą sondy ADCP (Nowak i Książek, 2018) i systemu GPS RTK. Przepływy charakterystyczne oraz prawdopodobne w przekrojach wodowskazowych zestawiono w tabeli 3. Symulacje wykonano dla warunków ustalonych, przyjmując większe wartości przepływów  $Q_{1\%}$  (Drezińska, 2011), tj. górny warunek brzegowy  $Q_{1\%} = 7338 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , poniżej ujścia Sanu  $Q_{1\%} = 8475 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

## ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki obliczeń posłużyły do analizy wpływu wysp na przepustowość koryta Wisły oraz możliwość zmiany pokrycia terenu poprzez określenie rozmieszczenia obszarów wycinki lasu na terasach zalewowych przy ograniczeniu kolizji z obszarami cennych lasów.

**Wpływ wysp na przepustowość koryta** – symulacje numeryczne ruchu wody przeprowadzono w zakresie od stanów niskich do korony wału dla dwóch wariantów: S1 – model z wyspami: I-1, Kępa Chwałowska, km 641 i I-2, Opoka Duża, km 628 oraz S2 – hipotetyczny, bez wysp.

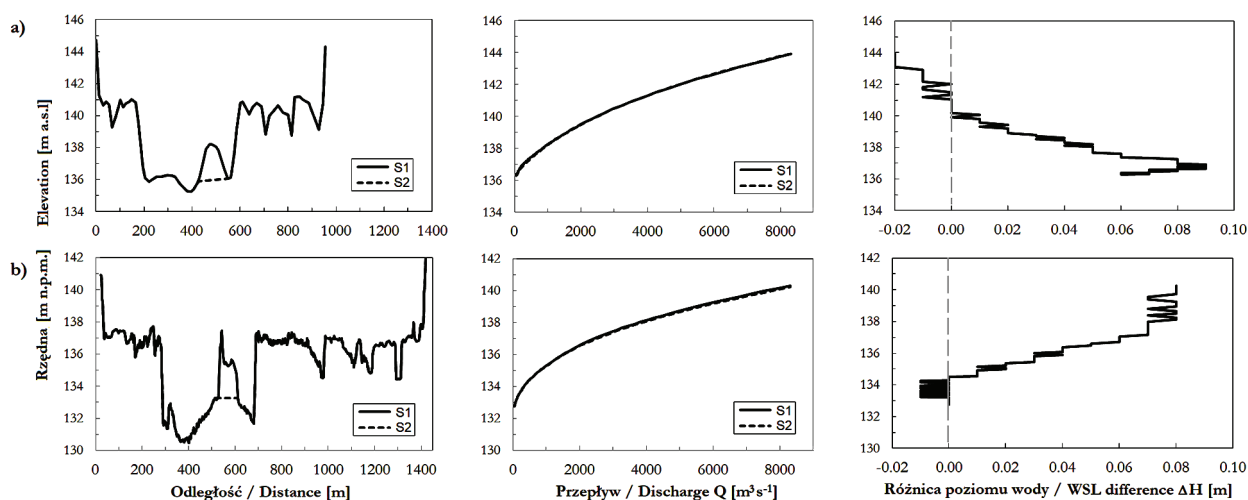
Rysunek 4 przedstawia przekroje poprzeczne, krzywe przepływu oraz różnice poziomu zwierciadła wody  $\Delta H$  dla całego zakresu przepływu. Maksymalna wartość  $\Delta H_{\text{max}}$  w przypadku obu wysp dochodzi do 0,08–0,09 m, lecz kształtowanie się zjawiska przebiega w obu przypadkach różnie. W przypadku wyspy I-1 wartość  $\Delta H_{\text{max}}$  występuje przy przepływie  $Q = 250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  co odpowiada przepływowi średniemu rocznemu SQ i oddziaływanie wyspy maleje wraz ze wzrostem przepływu. Wyniki te potwierdzają zmiany parametrów hydraulicznych zachodzące pomiędzy przepływem  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $435 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , polegające na dwukrotnym zmniejszeniu się powierzchni dominujących głębokości w obszarze koryta szerokiego w rejonie wyspy (Florek i in., 2020). W przypadku wyspy I-2 przy niskim stanie oddziaływanie jest niezauważalne i wzrasta wraz z przepływem. Jest to nietypowy układ spowodowany morfologią koryta poniżej (rys. 5). W odległości ok. 1 km w dół cieku występuje znaczne (dwukrotne) zawężenie koryta głównego cieku połączone z wypłycciem (rzędna w przekroju 1,82 km poniżej jest o ok. 1.5 m wyższa od rzędnej w przekroju z wyspą). Sprawia to, że przy niskich przepływach odcinek rzeki, na którym znajduje się wyspa,

**Tabela 3.** Przepływy charakterystyczne i prawdopodobne z wielolecia 1951–2010 (Raport MZP i MRP, 2013)

**Table 3.** Characteristic and annual exceedance probability discharges from the years 1951–2010 (Report MZP I MRP, 2013)

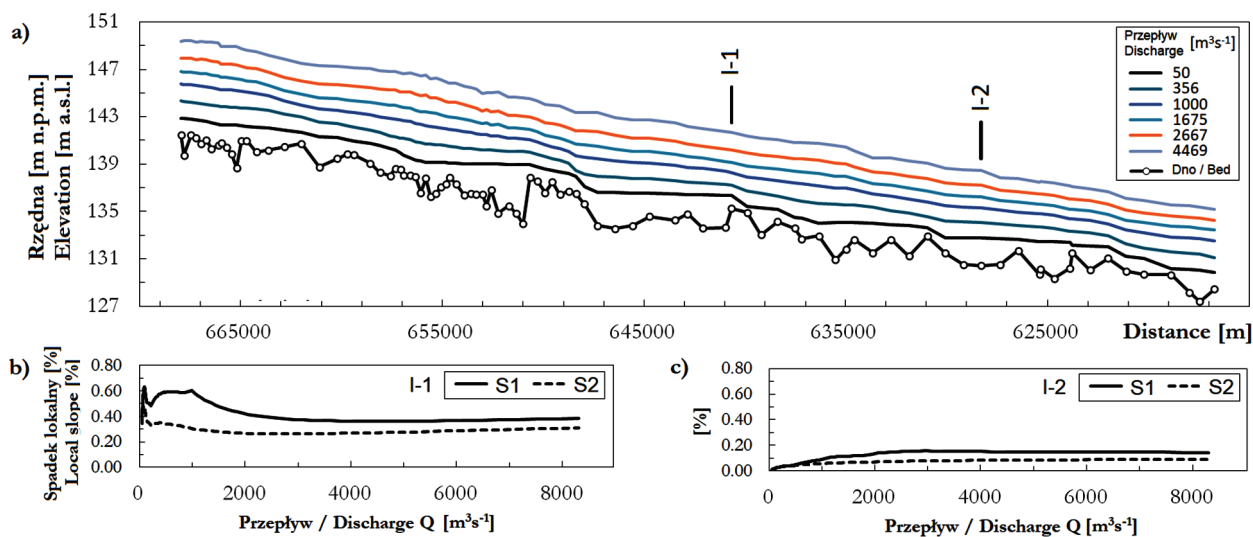
Wodowskaz Gaugingstation	Kilometraż Chainage	Zlewnia [km <sup>2</sup> ] Basinarea [km <sup>2</sup> ]	WWQ	SWQ	SQ	SNQ	NNQ	Q <sub>10%</sub>	Q <sub>1%</sub>	Q <sub>0,2%</sub>
Sandomierz	654 + 350	31809,90	5690	2719	291	95,2	57,0	4140	7180/73381)	9270
Zawichost	634 + 960	50654,57	6160	2895	436	135,0	84,0	4750	7440/84751)	9220
Annapol	624 + 920	51498,57	6200	2870	437	138,2	92,0	4740	7460/–	9260

<sup>1)</sup> za Drezińska (2011), after Drezińska (2011)



**Rys. 4.** Oddziaływanie wysp na warunki przepływu wody: przekrój poprzeczny, krzywa przepływu oraz zmiana rzędnych zwierciadła wody: a) Wisła, I-1, Kępa Chwałowska km 640 + 672, b) Wisła, I-2, Opoka Duża km 628+270 (Źródło: opracowanie własne)

**Fig. 4.** Influence of the islands on hydraulics parameters: cross section, flow rate and changes of the water surface level (WSL): a) The Vistula River, I-1, Kępa Chwałowska km 640 + 672, b) The Vistula River, I-2, Opoka Duża km 628+ 270 (Source: own study)



**Rys. 5.** Warunki hydrauliczne przepływu wody: a) obliczony układ zwierciadła wody, b) spadek lokalny wyspa I-1, Kępa Chwałowska km 640+672, c) spadek lokalny I-2, Opoka Duża km 628+172 (Źródło: opracowanie własne)

**Fig. 5.** Hydraulic parameters of water flow: a) calculated water surface level (WSL), a) local WSL slope island I-1, Kępa Chwałowska km 640 + 672, b) local WSL slope I-2, Opoka Duża km 628 + 172 (Source: own study)



położony jest w cofce. Dopiero przy zwiększającym się przepływie efekt ten ulega zmniejszeniu, co objawia się zwiększoną różnicą poziomu zwierciadła wody dla większych przepływów. Warunki takie wpłynęły również na powstanie wyspy w tym miejscu, ponieważ w fali opadającej wytwarzają się warunki hydrauliczne sprzyjające procesowi sedymentacji.

Przy przepływie  $Q_{1\%}$  obecność wysp wpływa na zmianę wartości przepływu o 2,4% w przypadku Opoki Dużej oraz o 0,5% w przypadku Kępy Chwałowskiej.

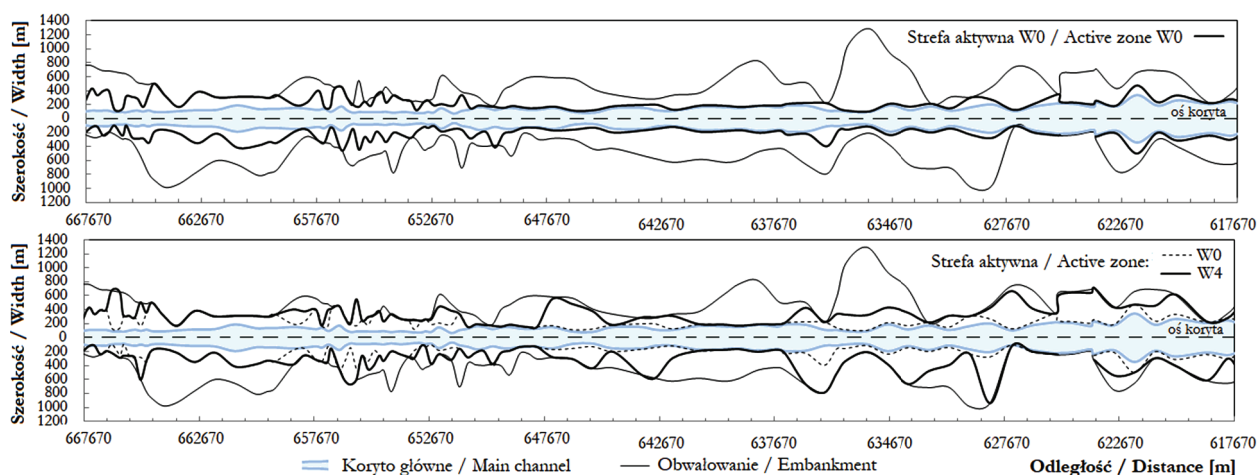
### Analiza możliwości zwiększenia przepustowości teras zalewowych

Wykorzystując metodę Pasche wyznaczono przekrój aktywny w 95 przekrojach poprzecznych dla przepływu  $Q_{1\%} = 7338 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na rys. 2 przedstawiono przykładowy przekrój poprzeczny z wyznaczoną strefą aktywną oraz rozkład prędkości w przekroju km 658 + 631. Profil prędkości dla przepływu wysokiego wypełniającego koryto główne i terasy zalewowe można podzielić na strefy przepływu a) – koryto główne, gdzie średnia prędkość przepływu wynosi  $v_k = 2,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , b) – strefa interakcji koryta głównego i terasy zalewowej – strefa  $b_{II}$ , na lewej i prawej terasie zalewowej średnie prędkości wody wynoszą odpowiednio  $v_L = 0,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  i  $v_P = 0,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , oraz c) obszar znajdujący się poza strefą  $b_{II}$ .

Identyfikacja obszarów potencjalnie do udroźnienia Modelowanie hydraulicznych warunków przepływu przeprowadzono dla wartości przepływu  $Q_{1\%}$  dla następujących wersji obliczeniowych: sytuacja obecna – wariant W0, zabiegi pielęgnacyjne w wybranych przekrojach poprzecznych dla  $C_T = 1$  – wariant W1, dla  $C_T = 2$  – wariant W2, dla  $C_T = 3$  – wariant W3 oraz zabiegi pielęgnacyjne w wybranych przekrojach poprzecznych dla różnej wartości  $C_T$  – wariant W4.

Na rys. 6a i 6b przedstawiono szerokości koryta głównego (kolor niebieski) i terasy zalewowej (linia ciągła) oraz szerokość strefy aktywnej przepływu składającej się z koryta głównego i strefy  $b_{II}$  (linia pogrubiona) dla wariantu obecnego W0 oraz ostatecznego W4.

W pierwszym kroku w celu zwiększenia szerokości strefy aktywnej  $b_{II}$  w wybranych przekrojach poprzecznych wprowadzono zabiegi pielęgnacyjne polegające na lokalnej wycince obszarów porośniętych roślinnością (wariant W1) dla  $C_T = 1$ , co jest równoznaczne z całkowitym usunięciem drzew i zakrzaczeń w tych przekrojach poprzecznych. Zabiegi te spowodowały znaczne zwiększenie szerokości strefy  $b_{II}$ , co przełożyło się na obniżenie zwierciadła wody i zapewnienie przewyższenia rzędnej korony obwałowania ponad rzędną zwierciadła wody  $Q_{1\%}$  na



**Rys. 6.** Szerokość strefy  $b_{II}$  dla wariantu W0 oraz W4 (ostatecznego), Wisła km 616 + 754 + 667 + 963.

Źródło: opracowanie własne

**Fig. 6.** Width of zone  $b_{II}$  for the variant W0 and W4 (final), Wisła km 616 + 754 + 667 + 963.

Source: own study

badanym odcinku ciek, z wyłączeniem rejonu Sandomierza.

Do zminimalizowania obszarów wycinki lasu na terasach zalewowych w kolejnych iteracjach obliczeniowych uzyskano zasięg strefy obszaru, w którym przepustowość koryta osiąga wartość wystarczającą, tj. przewyższenie korony obwałowania w zakresie 0,5 m i więcej. Zasięg tej strefy wyznacza obszary najskuteczniejszej wycinki (rys. 7), lecz koliduje z obszarami cennych lasów zgodnie z programem Natura 2000 oraz innymi formami ochrony. Ponadto strefa objęta zabiegami utrzymaniowymi zlokalizowana jest wzdłuż brzegów koryta, co z przyrodniczego punktu widzenia jest niekorzystne, ponieważ obejmuje długie nieprzerwane odcinki oraz zajmuje znaczną powierzchnię, a zabiegi ingerować będą w środowisko bytowania gatunków chronionych.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rozbieżność podejść do zachowania terenów w międzywalu Wisły wynika z jednej strony z konieczności zarządzania obszarami chronionymi zapewniającego osiągnięcie celów środowiskowych dla nich przewidzianych i ochrony obszarów o szczególnej wartości środowiskowej, z drugiej strony ograniczenia czy wręcz wyeliminowania zagrożenia powodziowego. Wymaga to wskazania obszarów do udroźnienia oraz sporządzenia wytycznych i możliwych rozwiązań dla obszarów Natura 2000 w celu przygotowania wariantów zarządzania, które ma uwzględnić czynności ochronne w związku z zagrożeniem bezpieczeństwa wywołanego wezbraniem.

Wpływ wysp na przepustowość jest zauważalny w strefie przepływów niskich i średnich. Oddziały-



**Rys. 7.** Potencjalna strefa konfliktu obszaru ochrony przeciwpowodziowej z obszarem siedlisk, odcinek Wisły w rejonie Zawichostu; a) minimalna szerokość aktywnego przekroju poprzecznego  $A_c$  dla przepływu  $Q_{1\%}$ , b) obszar objęty ochroną, c) strefa kolizji

Źródło: opracowanie własne na podstawie Portal, GDOŚ 2020, Geoportal, WMTS

**Fig. 7.** Potential conflict of the area of flood protection with the area of habitats, section of the Vistula River near Zawichost; a) the minimum width of the active cross-section  $A_c$  for discharge  $Q_{1\%}$ , b) protected area, c) collision zone

Source: own study based on Portal GDOŚ, 2020, Geoportal, WMTS

wanie wysp zależy od warunków lokalnych, jednak dla przepływu  $Q_{1\%}$  zmiana wartości przepływu nie przekroczyła 2,4% w przypadku wyspy Opoka Duża oraz 0,5% w przypadku wyspy Kępa Chwałowska.

Wyniki metody Pasche pokazują, że dla różnego pokrycia terenu aktywny przekrój zmniejszył się do 50% wartości pierwotnej powierzchni przekroju poprzecznego. Wartość ta jest porównywalna z wynikami Kałuży (2005), który uzyskał redukcję równą 46% stosunku powierzchni strefy aktywnej do całkowitej powierzchni przekroju rzeki Warty. Implementacja metody do dużych rzek i długich odcinków wymaga poszukiwania rozwiązania w każdym przekroju metodą kolejnych przybliżeń.

Dodatkowo pojawiają się ograniczenia związane z modelowaniem jednowymiarowym – z jednej strony średnia prędkość w przekroju powoduje, że w niektórych jego częściach wartości prędkości średniej są niedoszacowane, a w drugiej przeszacowane. Z tego powodu w całym przekroju, nawet po jego podziale na sekcje (LOB, main Channel, ROB) prędkości są większe od zera. Poza strefą  $b_{II}$  prędkości przepływu są bliskie zero, a przestrzeń ta jest tylko zbiornikiem wody. Wycinka roślinności poza strefą  $b_{II}$  jest nie do zaakceptowania z przyrodniczego punktu widzenia. Przyroda poradziła sobie z tym zagadnieniem inaczej – dostosowując się, tj. tworząc siedliska – lasy łąkowe, które odporne są na czasowe zalanie wodą.

Metoda Pasche daje wytyczne do udrożnienia przekroju poprzecznego tak, aby uzyskać większą przepustowość koryta. Z hydraulicznego punktu widzenia jest to narzędzie odpowiednie, lecz z przyrodniczego punktu widzenia wyniki są trudne do zaakceptowania, ponieważ obejmują tylko strefę wzdłuż brzegów koryta. W przypadku konieczności udrożnienia koryta należy zabiegi zaplanować przestrzennie, tj. na całej terasie zalewowej. Uzasadnione wydaje się więc wykorzystanie możliwości modelowania dwuwymiarowego tak, aby ograniczyć oddziaływanie do obszarów generujących największe opory przepływu.

## PODZIĘKOWANIA

Projekt Zarządzanie kryzysowe obszarem Natura 2000 w warunkach powodzi na przykładzie Małopolskiego Przełomu Wisły (km 254+000 – 307+000) finanso-

wany był z Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego 2009–2014 oraz przez Uniwersytet Rolniczy w Krakowie. Autorzy dziękują Krajowemu Zarządowi Gospodarki Wodnej Wody Polskie Oddział w Krakowie za udostępnienie danych źródłowych odcinka Wisły.

## BIBLIOGRAFIA

- Aberle, J., Järvelä, J. (2013). Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, 51, 1, 33–45, doi:10.1080/00221686.2012.754795.
- Bartnik, W., Książek, L., Leja, M., Wyrębek, M., Strutyński, M. (2011). Evaluation of morphological changes of the Vistula River channel in Sandomierz after the flood in 2010, 15th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, 223–232.
- Bartnik, W., Popek, W., Kanownik, W., Książek, L., Strużyński, A., Zajac, T., Adamski, P., Bielański, W., Florek, J., Stachura, T., Wyrębek, M., Leja, M., Woś, A., Strutyński, M., Nowak, M., Klaczak, A., Szczerbik, P., Szczepka, K., Zajac, K., Kwaśna, D., Lipińska, A., Ćmiel, A., Łaciak, M. (2017). Zarządzanie kryzysowe obszarem Natura 2000 w warunkach powodzi na przykładzie Małopolskiego Przełomu Wisły (km 254 + 000 – 307 + 000), Kraków: Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Ochrony Przyrody PAN, maszynopis.
- Bretschneider, H., Schulz, A. (1985). Anwendung von Fließformeln bei naturnahem Gewässerausbau, DVWK – Schriften, Heft 72.
- Drezińska, B. (2011). Ocena rozmiaru powodzi w zlewni Górnej Wisły na tle powodzi historycznych, *Dorzecze Wisły Monografia powodzi maj-czerwiec 2010*, Maciej Maciejewski, Mieczysław Ostojki, Tomasz Walczykiwicz (eds.), Warszawa, IMGW–PIB.
- Dz.U. 2020 poz. 55, Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 22 listopada 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o ochronie przyrody.
- Florek, J., Wyrębek, M., Woś, A. (2020). Dominant Hydraulic Conditions in the 2-D Model Vistula River from Zawichost to Słupia Nadbrzeżna, In: Kalinowska M., Mrokowska M., Rowiński P. (eds) *Recent Trends in Environmental Hydraulics. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*. Springer, Cham, 53–66, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37105-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37105-0_5).
- HEC-RAS, (2016). Hec-Ras River Analysis System. User's manual, [www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras).



- Hin, L.S., Bessaih, N., Ling, L.P., Ghani, A.A., Zakaria, N.A., Seng, M.Y. (2008). Discharge estimation for equatorial natural rivers with overbank flow, *International Journal of River Basin Management*, 6, 1, 13–21, <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635333>.
- Järvelä, J. (2010). Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation, *International Journal of River Basin Management*, 2, 1, 61–70, <https://doi.org/10.1080/15715124.2004.9635222>.
- Kaszyński, B., Szczukowska, H. (2012). Łęgi, polskie lasy deszczowe, *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 14, 32(3), 104–110.
- Kałuża, T. (2000). Opory ruchu przy przepływie wód wielkich wywołane roślinnością terenów zalewowych. *Rozprawa doktorska*, AR Poznań.
- Kałuża, T., Laks, I. (2005). Uwzględnienie aktywnej strefy przepływu w komputerowym systemie modelowania przepływu nieustalonego, *Determination of the active flow zone in the system of computer modelling of the unsteady flow*, *Gospodarka Wodna*, 1, 24–28.
- Kądziółka, K., Piórecki, M., Radoń, R. (2011). Hydrauliczne aspekty badania przyczyn przerwania wału w Koźmierzowie w czasie powodzi w maju 2010 r., *Zagadnienia ochrony przeciwpowodziowej oraz perspektywy rozwoju żeglugi śródlądowej* Starzec-Wiśniewska K., Bazan E., Szamburska D. (eds.), RZGW Gliwice – Kraków – Wrocław, 49–61.
- Knight, D.W. (2013a). River hydraulics – a view from mid-stream, *Journal of Hydraulic Research*, 51, 1, 2–18, <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.749431>.
- Knight, D.W. (2013b). *Hydraulic Problems in Flooding: From Data to Theory and from Theory to Practice*, P. Rowiński (ed.), *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems*, *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*, Springer, Berlin, Heidelberg, 19–52, doi:10.1007/978-3-642-30209-1\_2.
- Książek, L., Wałęga, A., Bartnik, W., Krzanowski, S. (2010a). Kalibracja i weryfikacja modelu obliczeniowego rzeki Wisłok z wykorzystaniem transformacji fali wezbraniowej, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 8,1, 15–28.
- Książek, L., Woś, A., Florek, J., Wyrębek, M., Młyński, D., Wałęga, A. (2019). Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisłoka river, Poland: case study, *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 254, 1–17, doi:10.1007/s10661-019-7402-7.
- Książek L., Wyrębek M., Strutyński M., Strużyński A., Florek J., Bartnik W. (2010b). Zastosowanie modeli jednowymiarowych (HEC-RAS, MIKE 11) do wyznaczania stref zagrożenia powodziowego na rzece Lubczy w zlewni Wisłoka, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 8,1, 29–37.
- Kubrak, J., Nachlik, E. (red.). (2003). *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*, Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Kubrak, E. (2019). Wpływ chropowatości powierzchni koryta o złożonym przekroju na prędkości przepływu wody, *Impact of the complex cross-section river bed roughness on the waterflow rate*, *Gospodarka Wodna*, 4, 16–20.
- Kubrak E., Kubrak, K., Kuśmierczuk, A., Kozioł, A., Kiczko, P., Rowiński. 2019. Influence of Stream Interactions on the Carrying Capacity of Two-Stage Channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 145(4). doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001585.
- Kundzewicz Z., Pińskwar I., Choryński A., Wyźga B., *Powodzie ciągle groźne, Floods still Pose a Hazard*, *Aura*, 2017, 3, 3–9.
- Kuryltsev, R., Hernik, J., Kryshenyk, N. (2018). Impact of land reform on sustainable land management in Ukraine. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumictus*, 17(2), 105–115. DOI: <http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2018.17.2.105>.
- Lucas, A.M.J, Kibler, K.M. (2016). Integrated Flood Management in developing countries: balancing flood risk, sustainable livelihoods, and ecosystem services, *International Journal of River Basin Management*, 14, 1, 19–31, DOI: 10.1080/15715124.2015.1068180.
- Michalik, A., Książek L. (2009). Dynamics of water flow on degraded sectors of Polish mountain stream channels, *Polish J. of Environ. Stud.*, 18, 4, 665–672.
- Moss, T. (2010). Institutional drivers and constraints of floodplain restoration in Europe, *International Journal of River Basin Management*, 5, 2, 121–130, doi.org/10.1080/15715124.2007.9635312.
- Nepf, H.M. (2012). Hydrodynamics of vegetated channels, *Journal of Hydraulic Research*, 50, 3, 262–279, <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.696559>.
- Pasche, E. (1984). *Turbulenz mechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematischen Erfassung*. Mitteilungen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 52. 61.
- Peltier, Y., Proust, S., Riviere, N., Paquier, A., Shiono, K. (2013). Turbulent flows in straight compound open-channel with a transverse embankment on the floodplain, *Journal of Hydraulic Research*, 51, 4, 446–458, <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.796499>.
- Portal GDOŚ, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, [www.geoserwis.gdos.gov.pl](http://www.geoserwis.gdos.gov.pl), data dostępu: 23.04. 2020.

- Raport MZPiMRP. (2013) Projekt: Informatyczny system osłony kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami, Raport z wykonania Map Zagrożenia Powodziowego i Map Ryzyka Powodziowego, IMGW-PIB, [www.kzgw.gov.pl](http://www.kzgw.gov.pl), data dostępu 07.04.2020 r.
- Shiono, K., Knight, D.W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 617–646.
- Sayers, P., Galloway, G., Penning-Rowsell, E., Yuanyuan, L., Fuxin, S., Yiwei, Ch., Kang, W., Quesne, T., Wang, L., Guan, Y. (2015) Strategic flood management: ten ‘golden rules’ to guide a sound approach, *International Journal of River Basin Management*, 13, 2, 137–151, DOI: 10.1080/15715124.2014.902378.
- Stred'anský, J., Grešová, L., Stred'anská, A. (2013). The importance of wetlands in the basin management, *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 12, 3, 123–129.
- Strużyński, A., Książek, L., Bartnik, W., Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Florek, J., Wyrębek, M., Strutyński, M. (2015). Wetlands in river valleys as an effect of fluvial processes and anthropopression, Stefan Ignar & Mateusz Grygoruk (eds), *Wetlands and Water Framework Directive*, GeoPlanet: Earth and Planetary Science, Springer International Publishing, 69-90, DOI: 10.1007/978-3-319-13764-3\_5.
- Sowiński, M. (2008). Szkody powodziowe jako element wyznaczania ryzyka, *Flood damage as an element of risk evaluation*, *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, Polish Academy of Science, 7, 121–130 (in Polish).
- Smith, K., Ward, R. (1998). *Floods – Physical processes and human impacts*, Chichester.
- Smart, G. M. (1992). Stage-discharge discontinuity in composite flood channels, *Journal of Hydraulic Research*, 30, 6, 817–833, <https://doi.org/10.1080/00221689209498912>.
- Starkel, L. (2001). Historia Doliny Wisły od ostatniego zlodowacenia do dziś, *Evolution Of The Vistula River Valley Since The Last Glaciation Till Present*, Monografie Instytutu Geografii I Przestrzennego Zagospodarowania PAN, 2.
- Trzepacz, P. (2012) Geneza i istota koncepcji rozwoju zrównoważonego, In *Zrównoważony rozwój – wyzwania globalne*, Piotr Trzepacz (ed). Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Tokarczyk, T., Szalińska, W. (2018). Drought hazard assessment in the process of drought risk management, *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 18(3), 217–229. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2018.17.3.217>.
- Vadde, K.K., Wang, J., Cao, L., Yuan, T., McCarthy, A.J., Sekar, R. (2018). Assessment of Water Quality and Identification of Pollution Risk Locations in Tiaoxi River (Taihu Watershed), China, *Water*, 10, 183, 1–18, <https://doi.org/10.3390/w10020183>.
- WCED Report, (1987). *Our Common Future*, Report of the World Commission on Environment and Development, A/RES/42/187, United Nations, <http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>, data dostępu 20.02.2019.
- Zahiri, A., Najafzadeh, M. (2018). Optimized expressions to evaluate the flow discharge in main channels and floodplains using evolutionary computing and model classification, *International Journal of River Basin Management*, 16, 1, 123–132, <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1372448>.

## ANALYSIS OF THE VISTULA RIVER CAPACITY IN THE PROTECTED AREA

### ABSTRACT

#### Aim of the study

Extreme flood events cause discussions about the effectiveness of flood protection. There are a questions about the capacity of the riverbed, as well as priorities in the protection of people's lives and the nature. Resolving these issues requires a new look with accordance to the principles of sustainable development. The study aims to check whether a potential conflict between flood and nature protection can be resolved using engineering methods without disturbing habitats.

#### Materials and methods

The study analyses the impact of islands located in the riverbed on flow capacity and determines the active zone of cross sections to ensure the minimum capacity of the flood with an attempt to reduce the impact on natural and valuable areas. The results of numerical modelling were used in combination with the Pasche method.



### **Results and conclusions**

Due to the threat to the community caused by the floods, the impact of islands was shown and areas designated for deforestation and for protection were indicated. The results of the Pasche method show that for different land cover the active cross-section has decreased up to 50% of the original value. The zone  $b_{II}$  covers only a part of the cross-section mostly close to the river banks. The zone designated for intervention overlaps with the active flow area. This approach to increase the riverbed flow capacity is insufficient because it does not ensure minimization of interference and maximization of water level reduction.

In addition, the implementation of the Pasche method for large rivers and long sections requires iteration method.

**Keywords:** flood protection, nature protection, Pasche method, channel flow capacity