

*Adam Łajczak*

**REGULACJA RZEKI  
A ZAGROŻENIE POWODZIOWE,  
NA PRZYKŁADZIE WISŁY  
MIĘDZY SKOCZOWEM I PUŁAWAMI**

**Streszczenie**

Wisła stanowi przykład rzeki o zróżnicowanym zaawansowaniu prac regulacyjnych, rozpoczętych w XIX w. i mających m.in. na celu jej przygotowanie jako drogi wodnej. Przedmiot badań stanowi przedgórski bieg Wisły, między Skoczowem i Puławami, którego koryto – przed regulacją o charakterze meandrowym, sinusoidalnym lub roztokowym – uległo w wyniku prac regulacyjnych skróceniu, zwężeniu i pogłębieniu (rys. 1, rys. 2). Wykazano duże różnice w poredulacyjnym przemodelowaniu koryta badanego biegu Wisły, czego konsekwencją jest zmniejszenie zagrożenia powodziowego wzdłuż odcinków rzeki o najbardziej pogłębionym korycie i zwiększenie tego zagrożenia wzdłuż odcinka rzeki poniżej Zawichostu o najpóźniej rozpoczętych pracach regulacyjnych. Morfologicznym skutkiem prac regulacyjnych, w największym stopniu wpływającym na reżim odpływu wody, jest zwiększona zawartość koryta, szczególnie w odcinku rzeki o biegu meandrowym (rys. 3). Pogłębieniu koryta towarzyszy zwiększanie wysokości brzegów rzeki, które od rozpoczęcia regulacji osiągnęło średnio ponad 3,5 metra. Zmiany w morfologii koryta sprzyjają zwiększaniu prędkości przepływu (tab. 1), co oznacza, że w odcinkach rzeki o znacznie pogłębionym korycie i nadbudowanych brzegach szybko zwiększa się przepływ pełnokorytowy. Wzrost przepływu pełnokorytowego zachodzi znacznie wolniej w odcinkach rzeki, gdzie koryto uległo niewielkiemu pogłębieniu, a w długim odcinku koryta agradującego (poniżej Zawichostu) przepływ pełnokorytowy prawie nie ulega zwiększaniu (ryc. 4). Przyrost przepływu pełnokorytowego, jaki zaznaczył się od rozpoczęcia prac regulacyjnych do 1990 r., wykazuje z biegiem Wisły przedgórskiej „zwiérciadlane” odbicie

z przebiegiem pionowych zmian koryta, jakie zaszły w analogicznym okresie (rys. 5). Poregulacyjne przemodelowanie koryta badanego biegu Wisły znajduje skutek w postaci bardzo zróżnicowanego z biegiem rzeki czasu zatapiania powodziowego równiny zalewowej w międzywalu, a także różnej liczby zdarzeń, kiedy obszar ten ulega inundacji (rys. 6). Odcinki strefy międzywala z najmniej pogłębionym korytem są zatapiające kilka razy dłużej, a odcinek z korytem agradującym nawet kilkadziesiąt razy dłużej, niż odcinki międzywala z najbardziej pogłębionym korytem. Wzdłuż badanego biegu rzeki, z wyjątkiem jej ostatniego odcinka, zaznacza się rozpoczęta w różnym okresie i o różnym nasileniu tendencja do skracania czasu trwania ponadpełnokorytowych stanów wody, niezależna od wieloletnich fluktuacji przepływu (rys. 7). Na zasygnalizowane zmiany w zagrożeniu powodziowym nakładają się skutki hydrologiczne wynikające ze zwężenia strefy zatapiania powodziowego (międzywale) i budowy zapór wodnych na Wiśle i dopływach górskich. Jednym ze skutków regulacji rzeki jest zwiększona koncentracja fal powodziowych, wyrażona m.in. przez tendencję do wzrostu maksymalnych powodziowych stanów wody, jaka została zaobserwowana w ciągu XX w. Stoi to w sprzeczności z wyrażoną opinią o zmniejszaniu zagrożenia powodziowego w dolinie Wisły przedgórskiej. Ten efekt prac regulacyjnych można częściowo zniwelować poprzez efektywne spełnianie przez zbiorniki zaporowe ich funkcji przeciwpowodziowej. Innym sposobem spłaszczania fal powodziowych w Wiśle może być utworzenie polderów w niektórych obszarach równiny zalewowej na zawału.

**Słowa kluczowe:** Wisła, powódzie, procesy korytowe, regulacja rzeki

## WSTĘP

W XIX w. w wielu rzekach rozpoczęto na dużą skalę prace regulacyjne, mające na celu m.in. ich uszlusowanie. Prace te były kontynuowane z różnym nasileniem w XX w. Zakres przeprowadzonych prac regulacyjnych, prowadzących do przygotowania rzek jako dróg wodnych, objął skracanie ich biegu, a także zwężanie koryt w celu zwiększenia ich głębokości. Choć cel tych zabiegów został osiągnięty, to ujawniły się uboczne ich skutki, na ogół nie brane wcześniej pod uwagę, które postrzegane są jako negatywne. Prace regulacyjne na rzekach często dają impuls do systematycznego pogłębiania koryta w odcinkach o jego większym spadku, a w odcinkach koryta o zmniejszonym spadku do jego wypłykania [Brookes 1990; Wyżga 1993; Łajczak 1995a]. Skutkuje to przyspieszeniem spływu wód korytowych, a w warunkach obwałowania rzeki zwiększoną amplitudą wahań stanów wody [Łajczak 1995a]. W rzece o zwiększonej prędkości przepływu zmniejsza się zdolność wody do samooczyszczania. W odcinkach rzeki o szybko pogłębianym korycie zagrożenie powodziowe może

ulegać zmniejszeniu. Z kolei zbyt mała pojemność międzywała zwiększa amplitudę wahań stanów wody. W odcinkach rzek o ustabilizowanym pionowo korycie, występujących poniżej odcinków z pogłębianym korytem, a zwłaszcza w odcinkach wypływanych koryt, bez względu na pojemność międzywała, zagrożenie powodziowe jest duże i może nadal się zwiększać. Sytuacja powodziowa na uregulowanych rzekach może podlegać efektywnej kontroli, jeżeli występują na nich większe zbiorniki zaporowe, spełniające funkcję przeciwpowodziową. Jednak na wielu rzekach funkcjonujących jako drogi wodne brak takich zbiorników, a istniejące niskie stopnie piętrzące praktycznie nie redukują dużych fal wezbraniowych.

Wisła stanowi przykład rzeki o zróżnicowanym zaawansowaniu prac regulacyjnych wzdłuż jej biegu [Jędrzyk, Rusak 1982]. Konsekwencją tego stanu jest odmiennie kształtujące się zagrożenie powodziowe w jej poszczególnych odcinkach, uwarunkowane nie tylko cechami zlewni dopływów, ale także poregulacyjnym przemodelowaniem koryta rzeki i wynikającymi stąd zmianami w reżimie odpływu wód [Łajczak 1995a, 1999]. Celem pracy jest wskazanie skali zmian w przemodelowaniu koryta przedgórskiego biegu Wisły (między Skoczowem i Puławami) od rozpoczęcia generalnych prac regulacyjnych na rzece, i na tym tle wyjaśnienie zmian w reżimie odpływu wody, ze szczególnym zwróceniem uwagi na okresy ze stanami wody ponadpełnokorytowymi. Opracowanie jest oparte na analizie danych udostępnionych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, odnoszących się do wszystkich posterunków wodowskazowych w tym biegu rzeki i pochodzących od początku obserwacji wodowskazowych do 1990 r. Z powodu utrudnień w uzyskaniu danych, które pojawiły się w późniejszych latach, niemożliwe było wydłużenie okresu badawczego o ostatnie 15-lecie. Zanalizowano także wszystkie dostępne mapy wielkoskalowe ukazujące badany bieg Wisły począwszy od 1782 r., jak również dane dotyczące zbiorników zaporowych w dorzeczu [Łajczak 1995a, 1995b, 1999].

## OBSZAR BADAŃ

Długość przedgórskiego odcinka Wisły, umownie ograniczonego posterunkami wodowskazowymi w Skoczowie i Puławach, stanowi 39% całego biegu rzeki (1047 km). Ten odcinek Wisły jest zasilany przez dopływy górskie, wyżynne i w znikomym stopniu przez nizinne. Największy udział w dostawie wody i materiału unoszonego do tego odcinka rzeki mają dopływy karpackie, odpowiednio około 70 i 90% [Łajczak 1999]. Średnie sumy opadów w dorzeczu Wisły przedgórskiej

wynoszą od około 600 do ponad 2000 mm, z czego 50–70% występuje w postaci deszczu i przypada na okres maj-sierpień. Rzeka jest zasilana w największym stopniu w wyniku szybkiego odpływu powierzchniowego (dopływy karpackie), co powoduje, że największe wezbrania występują wczesną wiosną (zasilanie roztopowe) i zwłaszcza latem (zasilanie deszczowe). W tych okresach występuje największe zagrożenie powodziowe w dolinie rzeki. Średni przepływ Wisły zwiększa się od  $6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  w Skoczowie do  $450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  w Zawichoście poniżej ujścia Sanu. Maksymalne zaobserwowane przepływy, przypadające wyłącznie na okres letni, szybko zwiększają się z biegiem rzeki i w Zawichoście osiągają  $7450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . O dużym potencjale powodziowym badanego biegu rzeki w sezonie letnim świadczy przebieg przepływów maksymalnych wzdłuż całej Wisły w tym okresie, które szybko rosną do Zawichostu, by w dalszym biegu rzeki nawet maleć. W przypadku największych wezbrań roztopowych przyrost przepływu wzdłuż całego biegu Wisły jest już bardziej wyrównany [Soja, Mrozek 1990]. Amplituda wahań stanów wody osiąga w tym biegu rzeki 9 m i jest obecnie 2-krotnie większa niż przed utworzeniem wałów przeciwpowodziowych.

Koryto badanego odcinka Wisły miało przed regulacją zróżnicowany przebieg. Do ujścia Dunajca było meandrowe, dalej do ujścia Sanu miało przebieg sinusoidalny, a w dalszym biegu roztokowy. Stopień krętości koryta malał z biegiem rzeki od około 2,0 w Kotlinie Oświęcimskiej do 1,1 w przełomie rzeki przez Wyżyny Polskie [Łajczak 1995a, 1999]. Strefa zatapiania powodziowego przed wybudowaniem wałów przeciwpowodziowych przekraczała nawet 10 km szerokości.

## **PRZEBIEG I ZAKRES PRAC REGULACYJNYCH**

Regulację omawianego odcinka Wisły aż do Zawichostu rozpoczęto, pomijając lokalnie wykonane wcześniej prace, około 1840 r., które zostały zintensyfikowane po wielkiej powodzi w 1884 r. [Starkel 1982]. Poniżej Zawichostu regulację rzeki rozpoczęto później i w znacznie mniejszym zakresie niż na odcinkach śląskim i krakowskim rzeki [Jędrzyk, Rusak 1982]. Celem regulacji rzeki i dopływów było objęcie kontrolą odpływu wody, zabezpieczenie dolin przed powodzią, wyprofilowanie biegu rzeki i uzyskanie odpowiedniej głębokości koryta Wisły jako planowanej drogi wodnej. Prace objęły:

a) ścinanie zakoli, a nawet prostowanie biegu krótkich odcinków rzeki (do ujścia Raby, głównie druga połowa XIX w., w niektórych odcinkach rzeki do lat 80. XX w.),

b) budowę kamiennych ostróg w celu zwężenia strefy nurtu i pogłębienia koryta (od około 1840 r. z największym nasileniem w ciągu XX w., poniżej Zawichostu od lat 50. XX w.),

c) budowę kamiennych opasek brzegowych (XIX–XX w.),

d) budowę wałów przeciwpowodziowych, wzdłuż długich odcinków rzeki od około 1880 r. Z biegiem rzeki do Puław zakończenie budowy wałów następowało coraz później (lata 30.–70. XX w.). Naprawa i nadbudowywanie wałów trwa nadal,

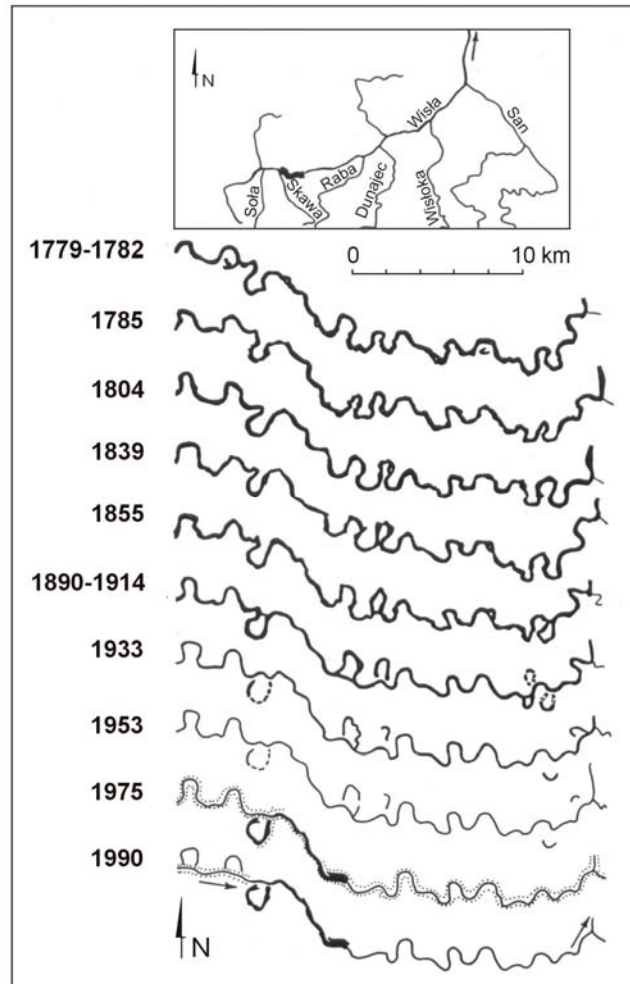
e) budowę zapór i stopni wodnych (lata 50.–80. XX w.). Największym obiektem na Wiśle przedgórskiej jest zaporą w Goczałkowicach oddana do użytku w 1956 r. Niskie stopnie wodne są zlokalizowane tylko w okolicach Krakowa,

f) budowę lateralnych kanałów (kanał doprowadzający wodę do elektrowni w Skawinie – lata 50. XX w., niedokończony kanał w okolicach Oświęcimia z lat 70.)

## WYNIKI BADAŃ

W efekcie skrócenia długości omawianego odcinka Wisły o 71,8 km współczynnik rozwinięcia koryta zmalał z 1,38 do 1,16. Z biegiem rzeki o malejącej pierwotnej krętości koryta stopień skrócenia jej biegu zmniejsza się (rys. 1, rys. 2). Dlatego największe lokalne wzrosty nachylenia koryta Wisły przedgórskiej zaznaczyły się do ujścia Dunajca, na największą skalę w Kotlinie Oświęcimskiej przed ujściem Przemszy. W odcinkach rzeki o pierwotnym sinusoidalnym lub roztokowym przebiegu koryta, jego długość uległa co najwyżej minimalnemu skróceniu.

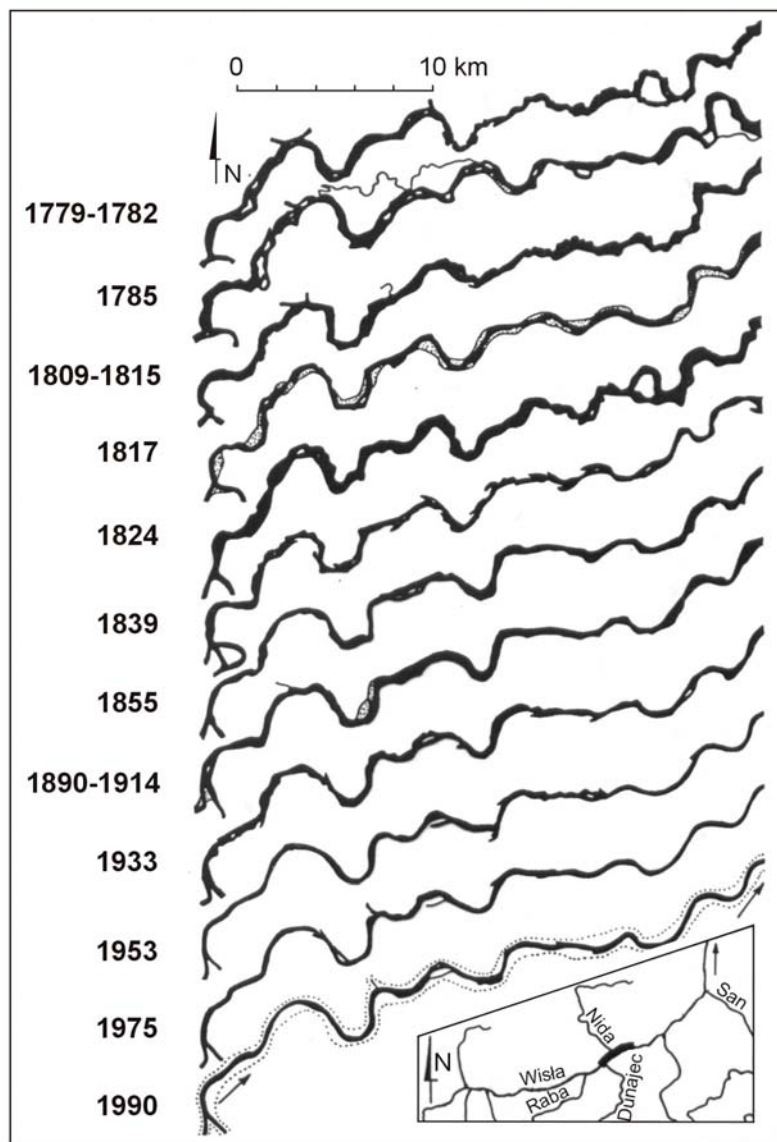
Zmiany te dały impuls do pogłębiania koryta, które objęło prawie cały bieg omawianego odcinka rzeki. Tylko na krótkim odcinku Wisły w Kotlinie Oświęcimskiej (powyżej ujścia Przemszy) i dłuższym odcinku od Zawichostu do Puław, lokalnie koryto rzeki nie pogłębia się lub nawet ulega wypłycaaniu. Ostrogi brzegowe, zwężając strefę nurtu rzeki, efektywnie przyczyniają się do zmniejszania szerokości koryta. W ciągu XX w. szerokość koryta rzeki zmniejszyła się średnio dwukrotnie, najbardziej w odcinkach o krętym i sinusoidalnym biegu, a najmniej w odcinku o biegu roztokowym. Głębokość koryta, z wyjątkiem



*The River Vistula features various stages in the development of training measures that started in the 19<sup>th</sup> c. and aimed to convert it into a waterway. This study focuses on a foreland stretch Figure 1*

**Rysunek 1.** Zmiany biegu koryta Wisły przedgórskiej poniżej ujścia Skawy w okresie przed pracami regulacyjnymi i po ich zakończeniu. Rysunek pokazuje skrócenie i zwężenie koryta rzeki począwszy od końca XIX w. Pokazano zasięg cofki niskiego stopnia wodnego w Łączanach (lata 1975 i 1990)

**Figure 1.** Changes in the channel pattern of the foreland Vistula downstream of the River Skawa confluence before and after the river training measures. The figure shows the shortening and narrowing of the channel as a result of engineering that began in the late 19<sup>th</sup> century, as well as the extent of backwater of a short dam at Łączany (in 1975 and 1990)



**Rysunek 2.** Zmiany biegu koryta Wisły przedgórskiej poniżej ujścia Dunajca w okresie przed pracami regulacyjnymi i po ich zakończeniu.

Rysunek pokazuje zwężenie koryta rzeki począwszy od połowy XIX w.

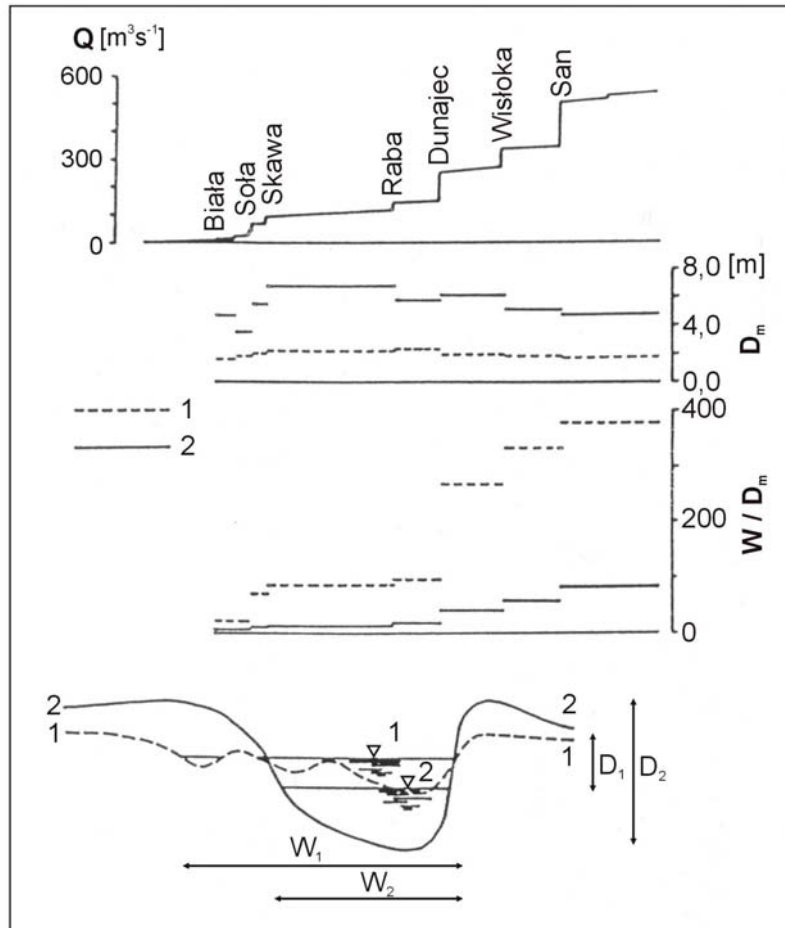
**Figure 2.** Changes in the channel pattern of the foreland Vistula downstream of the River Dunajec confluence before and after the river training measures. The figure shows the narrowing of the channel as a result of engineering that began in the mid 19<sup>th</sup> century

wymienionych dwóch odcinków rzeki, uległa średnio trzykrotnemu zwiększeniu. W efekcie dużym zmianom uległ parametr geometryczny koryta rzeki, zwany współczynnikiem zwartości (iloraz szerokości i średniej głębokości koryta), decydujący o prędkości przepływu wód korytowych (rys. 3). Przed regulacją Wisły, z uwagi na płytkie i szerokie koryto, jego wielkość szybko zwiększała się z biegiem rzeki: w odcinkach o krętym biegu koryta osiągała 100, a w odcinku koryta roztokowego nawet 400. Obecnie współczynnik ten jest średnio pięciokrotnie mniejszy i najbardziej został zredukowany w odcinku rzeki o pierwotnym bardzo krętym biegu.

Innym elementem zmian w geometrii koryta Wisły przedgórskiej jest zwiększająca się wysokość brzegów rzeki, będąca skutkiem nie tylko pogłębiania się koryta, ale także nadbudowywania lateralnej strefy koryta z ostrogami i strefy równiny zalewowej z wałami brzegowymi. W odcinku Wisły między Skoczowem i Puławami średnie rozmiary pogłębienia koryta rzeki od rozpoczęcia prac regulacyjnych oszacowano na około 1,5 metra, a maksymalne w rejonie Krakowa na 3–4 metry. Średnią miąższość osadów zdeponowanych we wskazanym przedziale czasu w basenach międzyostrogowych w lateralnej strefie dawnego szerokiego koryta rzeki i na równinie zalewowej w strefie wałów brzegowych, oszacowano na tym odcinku rzeki na ponad 2 metry. Największe rozmiary tak rozumianej depozycji materiału, przekraczające nawet 3 metry, zaznaczyły się wzdłuż Wisły przedgórskiej od ujścia Dunajca do przełomu rzeki przez Wyżyny Polskie. Oznacza to, że źródłem zdeponowanego materiału w strefie pozakorytowej badanego odcinka Wisły jest nie tylko cały obszar dorzecza, ale także w znaczącym stopniu pogłębiane koryto rzeki i koryta dopływów, zwłaszcza karpackich [Łajczak 1999]. Wysokość brzegów Wisły przedgórskiej zwiększyła się, w stosunku do średniego stanu wody w rzece, w okresie od rozpoczęcia prac regulacyjnych średnio o ponad 3,5 metra. Na krótszych odcinkach pierwotnie krętej rzeki lub wzdłuż jej sinusoidalnego biegu, zmiany te przekroczyły nawet 4–5 metrów.

Hydrologicznym skutkiem zwiększonego spadku koryta, a zwłaszcza jego zwiększonej zwartości wzdłuż prawie całego biegu Wisły przedgórskiej, jest wyraźnie zaznaczająca się od początku XX w. tendencja do wzrostu średniej prędkości przepływu w przekroju poprzecznym rzeki. Zmiany te zilustrowano na przykładzie wartości odnoszących się do średniego wysokiego stanu wody i do stanu pełnokorytowego (tab. 1). Oznacza to, że w odcinkach rzeki o pogłębianym





**Rysunek 3.** Typowe zmiany przekroju poprzecznego koryta Wisły przedgórskiej zainicjowane pracami regulacyjnymi. Zaznaczono średnią głębokość koryta  $D_m$  i współczynnik jego zwartości  $W/D_m$  dla odcinków rzeki między głównymi dopływami karpackimi.

Stan rzeki: 1 – przed rozpoczęciem prac regulacyjnych, 2 – około 1990 r.

$D_1$ ,  $W_1$  – głębokość i szerokość koryta przed regulacją rzeki,

$D_2$ ,  $W_2$  – około 1990 r.  $Q$  – średni przepływ w profilu podłużnym rzeki

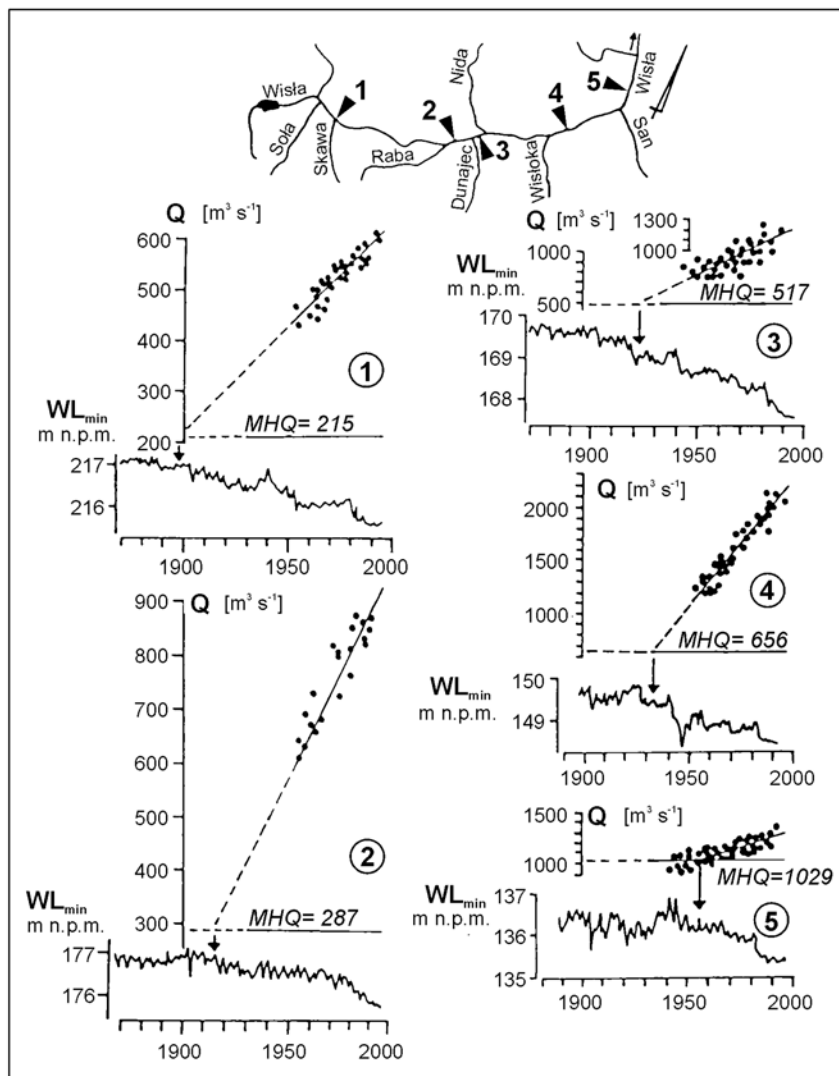
**Figure 3.** Typical changes in the cross-section of the Vistula foreland channel initiated by the river training. Average channel depths  $D_m$  and its compactness coefficients  $W/D_m$  indicated for the main Carpathian tributaries. River: 1) prior to the training project, 2) ca. 1990;  $D_1$ ,  $W_1$ : channel depth and width prior to river training;  $D_2$ ,  $W_2$  ca. 1990.  $Q$ ) average discharge along the longitudinal profile

**Tabela 1.** Zmiany średniej prędkości przepływu,  $m s^{-1}$ , w korycie Wisły przedgórskiej, na przykładzie wybranych posterunków wodowskazowych, w ciągu XX w. Średnią prędkość przepływu odniesiono do charakterystycznych objętości przepływu w rzece: średniego wysokiego MHQ i pełnokorytowego  $Q_{bf}$

**Table 1.** The 20<sup>th</sup> c. change of mean flow rate,  $m s^{-1}$ , in the Vistula foreland channel using the example of certain water gauge posts compared to characteristic discharge parameters, mean high and bankfull discharge  $MHQ$  and  $Q_{bf}$

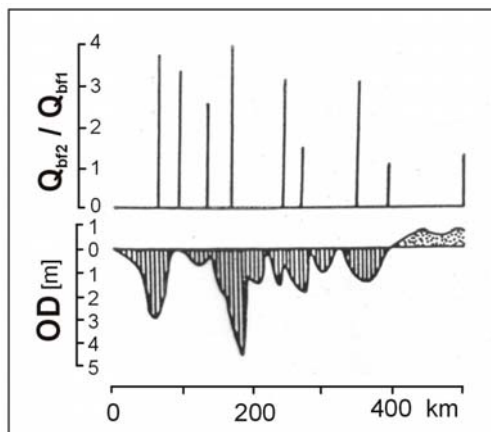
Posterunek pomiarowy	MHQ			Q <sub>bf</sub>		
	1931–1990	1961–1990	1900	1930	1960	1990
Smolice	1,10	1,30	1,10	1,40	1,50	1,60
Popędzynka	0,95	1,05	0,95	0,95	1,25	1,30
Karsy	1,10	1,15	1,10	1,20	1,30	1,40
Koło	1,00	1,05	1,00	1,00	1,30	1,45
Zawichost	1,00	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
Puławy	0,95	0,95	0,95	0,95	1,10	1,15

korycie i szybko nadbudowywanych brzegach zwiększa się przepływ pełnokorytowy, co prowadzi do skracania czasu występowania stanów wody ponadpełnokorytowych. Tendencja do wzrostu przepływu pełnokorytowego została udokumentowana we wszystkich posterunkach wodowskazowych począwszy od lat 1945–1950 do 1990 r. i zaprezentowana jest na rysunku 4 na przykładzie wybranych posterunków. Można przyjąć, że obowiązywała ona w następnych latach. Przyjmuje się, że przepływ pełnokorytowy w warunkach naturalnego koryta jest zbliżony do średniego wysokiego przepływu, a w warunkach koryta zwężanego i pogłębianego jest od niego większy. W 1990 r. różnica między tymi wartościami przepływu była w posterunkach wodowskazowych położonych wzdłuż pogłębianego koryta Wisły przedgórskiej około 2- lub nawet ponad 3-krotna i tylko poniżej Zawichostu była nieco większa od 1,0. Przyrost przepływu pełnokorytowego, jaki zaznaczył się w okresie od rozpoczęcia generalnych prac regulacyjnych do 1990 r., wykazuje wzdłuż przedgórskiego biegu Wisły „zwierciadlane” odbicie z przebiegiem pionowych zmian koryta, jakie zaszły w analogicznym okresie (rys. 5). Biorąc pod uwagę dane uzyskane z większej liczby posterunków wodowskazowych, wyraźnie widoczna jest tendencja do większego wzrostu  $Q_{bf}$ , na ogół dwu- lub nawet czterokrotnego, w odcinkach rzeki o największym poregulacyjnym pogłębieniu koryta. Z kolei w odcinkach rzeki o stabilnym pionowo korycie lub z korytem agradującym, przepływ pełnokorytowy uległ w tym czasie minimalnemu zwiększeniu.



**Rysunek 4.** Zmiany wartości przepływu pełnokorytowego,  $Q_{bf}$ , w wybranych posterunkach wodowskazowych na Wiśle przedgórskiej, na tle wielkości przepływu średniego wysokiego,  $MHQ$ , z lat 1931–1990 oraz przebiegu minimalnych rocznych stanów wody,  $WL$ . Posterunki wodowskazowe: 1 – Smolice, 2 – Sierosławice, 3 – Karsy, 4 – Koło, 5 – Zawichost

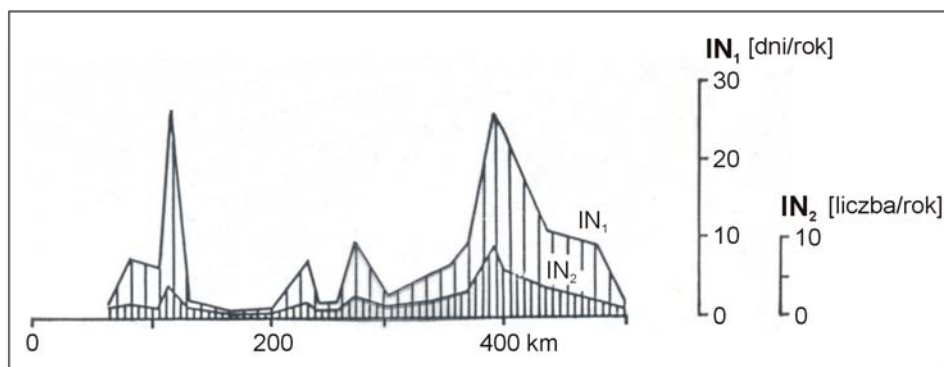
**Figure 4.** Changing bankfull discharge,  $Q_{bf}$ , at certain water gauges on the foreland Vistula against mean high discharge,  $MHQ$ , during 1931–1990 and against annual minimum water levels,  $WL$ . Water gauges: 1) Smolice, 2) Sierosławice, 3) Karsy, 4) Koło, 5) Zawichost



**Rysunek 5.** Wzrost wielkości przepływu pełnokorytowego w wybranych posterunkach wodowskazowych na Wiśle przedgórskiej w okresie od rozpoczęcia generalnych prac regulacyjnych do 1990 r.,  $Q_{bf2} / Q_{bf1}$ , na tle pionowych zmian koryta w analogicznym okresie,  $OD$

**Figure 5.** Growing bankfull discharge at certain water gauges on the foreland Vistula,  $Q_{bf2} / Q_{bf1}$ , against vertical channel development,  $OD$ , between the start of general engineering project and the 1990 s

Efektom zróżnicowanego poregulacyjnego przemodelowania koryta w profilu podłużnym Wisły przedgórskiej, są bardzo duże różnice w czasie trwania stanów wody ponadpełnokorytowych (rys. 6). Przebieg krzywej ilustrującej czas trwania takich stanów wody z biegiem rzeki, wskazujący na czasokres zatapiania powodziowego równiny zalewowej (w międzywalu),  $IN_1$ , a także przebieg krzywej ilustrującej liczbę zdarzeń powodziowych, kiedy dochodzi do zatapiania tego obszaru,  $IN_2$ , wykazuje przeciwieństwo „zwierciadlanego” odbicia z przebiegiem krzywych obrazujących rozmiary poregulacyjnych pionowych zmian koryta,  $OD$ , a także zmian wielkości  $Q_{bf}$ . Odcinki strefy międzywala rzeki z najmniej pogłębionym korytem są zatapiane kilka razy dłużej niż odcinki międzywala z najbardziej pogłębionym korytem rzeki, a odcinki międzywala towarzyszące korytu agradującemu nawet kilkadziesiąt razy dłużej. Uwagę zwraca relatywnie długi odcinek Wisły w przełomie przez Wyżyny Polskie o największym zagrożeniu powodziowym. Czas trwania stanów wody ponadpełnokorytowych ulega jednak wzdłuż tego odcinka rzeki znacznemu skróceniu, co oznacza, że największe zagrożenie powodziowe w całym biegu Wisły na przedpolu Karpat występuje bezpośrednio poniżej ujścia Sanu.



**Rysunek 6.** Zróżnicowanie średniego czasu występowania ponadpełnokorytowych stanów wody w posterunkach wodowskazowych na Wiśle przedgórskiej, informujące o czasokresie zatapiania równiny zalewowej w międzywalu wzdłuż tego biegu rzeki,  $IN_1$ , na tle średniej liczby zdarzeń powodziowych, kiedy zachodzi zatapianie tego obszaru,  $IN_2$

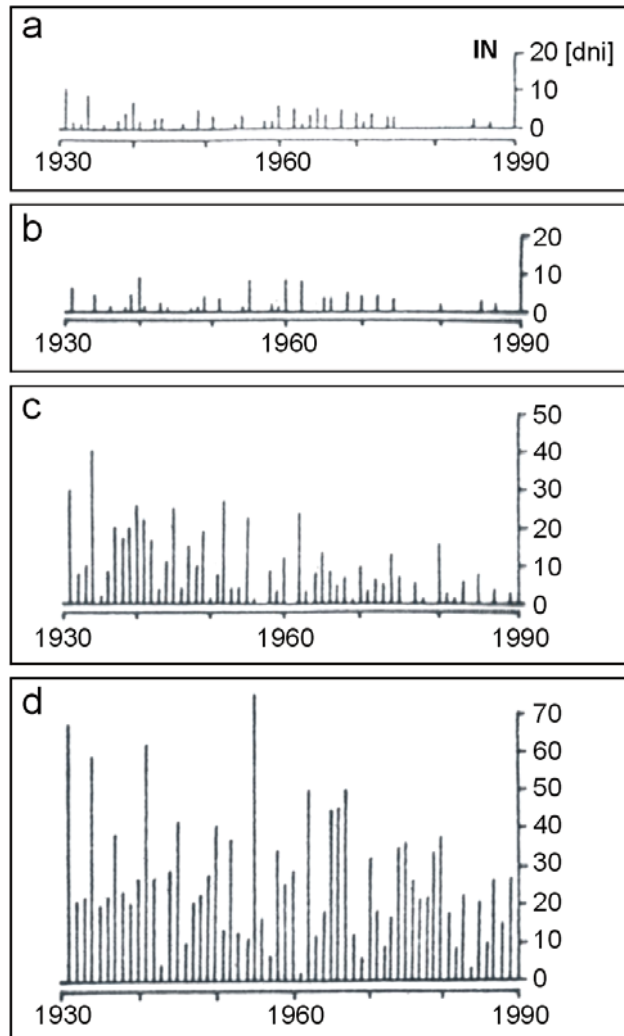
**Figure 6.** Variability of average duration of bankfull water stages at water gauge stations on the foreland Vistula, as an indication of inter-embankment flooding duration,  $IN_1$ , against the average number of flood events that produced the inter-embankment flooding,  $IN_2$

W odcinkach rzeki z pogłębionym korytem zagrożenie powodziowe występuje obecnie tylko podczas wezbrań letnich, gdyż maksymalne stany wody podczas spływu wód roztopowych są zbyt niskie, by doszło do przekroczenia stanów wody pełnokorytowych. Z kolei w odcinkach rzeki z minimalnie pogłębionym korytem lub z korytem ulegającym intensywnej agradacji, zagrożenie powodziowe może wystąpić także w miesiącach pozaletnich. Można przypuszczać, że przed rozpoczęciem regulacji Wisły wzdłuż jej całego biegu powodzie zdarzały się także podczas spływu wód roztopowych. Jednym ze skutków przeprowadzonej regulacji Wisły jest więc wyeliminowanie zagrożenia powodziowego podczas gwałtownego topnienia pokrywy śniegu wzdłuż jej odcinków z zaawansowanym pogłębieniem koryta. W przypadku powodzi deszczowych doszło jedynie do skrócenia czasu trwania stanów wody ponadpełnokorytowych w takich odcinkach rzeki. Drastyczne zwężenie strefy zatapiania powodziowego, lokalnie nawet kilkudziesięciokrotne, na skutek utworzenia zbyt blisko położonych wałów przeciwpowodziowych, wywołało jednak zwiększenie amplitudy wahań stanów wody w Wiśle poprzez wzrost stanów maksymalnych. Zagrożenie powodziowe w okresie letnim wzdłuż odcinków Wisły przedgórskiej

ze znacznie pogłębionym korytem, zmalało więc tylko z uwagi na skrócenie czasu trwania stanów wody ponadpełnokorytowych. W odcinkach tego biegu rzeki z minimalnie pogłębionym korytem lub z korytem ulegającym agradacji, zagrożenie powodziowe wzrosło na skutek wymienionych prac regulacyjnych, zarówno w sezonie letnim, jak i zimowo-wiosennym.

W odcinkach Wisły przedgórskiej o najbardziej pogłębionym korycie czas trwania ponadpełnokorytowych stanów wody wykazywał w latach 1931–1990 nieznaczną tendencję malejącą, przy ogólnie niewielkich wartościach parametru IN, maksymalnie do około 10 dni w roku (rys. 7). Stany wody ponadpełnokorytowe zdarzały się w takich odcinkach Wisły średnio w co drugim roku, wystąpiły także długie okresy, nawet 10-letnie, kiedy stany wody w rzece nie osiągnęły takich wartości. W dalszym biegu Wisły o mniej pogłębionym korycie tendencja do skracania czasu zatapiania równiny zalewowej w międzywalu jest bardziej wyraźna. Parametr IN zmniejszył wartość od około 30 dni w roku w latach 1931–1960 do kilku dni w latach 90. W tym odcinku Wisły stany wody ponadpełnokorytowe zdarzały się w latach 1931–1990 prawie każdego roku. Poniżej ujścia Sanu takie stany wody w Wiśle przedgórskiej wystąpiły już każdego roku, osiągając nawet 50–70 dni w roku między 1931 r. i połową lat 60. W następnych latach zaznaczyła się tendencja do powolnego zmniejszania liczby dni w roku ze stanami wody ponadpełnokorytowymi, maksymalnie do 30 dni w roku w latach 90.

Brak wyraźnej tendencji do zmniejszania liczby dni w roku ze stanami wody ponadpełnokorytowymi w latach 1931–1990 w odcinku Wisły przedgórskiej o najbardziej pogłębionym korycie, może wskazywać, że taka sytuacja wystąpiła znacznie wcześniej przed 1930 r., czyli w latach, kiedy tempo pogłębiania koryta było już zaawansowane. W dalszym biegu rzeki, gdzie proces pogłębiania się koryta rozpoczął się później, tendencję do szybkiego skracania czasu zatapiania równiny zalewowej w międzywalu stwierdzono dopiero w latach 1931–1990. W Wiśle poniżej ujścia Sanu tendencja do zmniejszania liczby dni w roku ze stanami wody ponadpełnokorytowymi jest, z uwagi na najpóźniej rozpoczętą regulację rzeki w jej przedgórskim biegu, w niewielkim stopniu zaawansowana i rozpoczęła się dopiero w latach 60. XX w.



**Rysunek 7.** Czas trwania ponadpełnokorytowych stanów wody, *IN*, w wybranych posterunkach wodowskazowych na Wiśle przedgórskiej, reprezentujących odcinki rzeki o zróżnicowanym poregulacyjnym przemodelowaniu koryta, w latach 1931–1990. Posterunki wodowskazowe: a – Smolice, b – Jagodniki, c – Szczucin, d – Zawichost

**Figure 7.** Duration of overbankfull water stages, *IN*, at certain water gauges on the Vistula foreland, representing reaches with various stages of channel development after the training project, during 1931–1990. Water gauge posts: a) Smolice, b) Jagodniki, c) Szczucin, d) Zawichost

## DYSKUSJA WYNIKÓW

Wykazana w pracy naprzemianległość odcinków koryta przedgórskiego biegu Wisły z tendencją do ich pogłębiania lub wypłykania, zainicjowana regulacją rzeki i przekładająca się na skutki hydrologiczne – zwłaszcza w odniesieniu do zagrożenia powodziowego, znajduje potwierdzenie w całym biegu tej rzeki [Łajczak 1995a, 1995c]. Odcinek Wisły poniżej ujścia Sanu o największym nasileniu depozycji materiału wyróżnia się pod względem zagrożenia powodziowego w skali całego biegu rzeki [Jędrzyk, Rusak 1982] co należy uznać przede wszystkim za konsekwencję poregulacyjnego przemodelowania wyżej położonego długiego odcinka rzeki. Tym samym potwierdzam wcześniej wyrażony pogląd Punzeta [1991] o dużym wpływie szeroko pojętej regulacji omawianego biegu Wisły na proces formowania fal powodziowych w tej rzece. Skrócenie biegu Wisły, a także zwężenie i pogłębienie jej koryta, wywołało efekt w postaci wzrostu koncentracji fal powodziowych, co wykazuje ścisły związek ze zwiększoną prędkością przepływu stwierdzoną w całym zakresie wahań stanów wody w rzece [Łajczak 1991, 1995a; Punzet 1991]. Według Punzeta [1991], na przykładzie wyników obserwacji wodowskazowych w Krakowie (Tyniec), ustalono tendencję do skracania czasu trwania fal powodziowych i wzrostu ich wysokości w ciągu XX w., a także do wzrostu częstości pojawiania się wybitnych kulminacji wezbrań. Efektem tego jest skracanie czasu przemieszczania się fal powodziowych wzdłuż Wisły przedgórskiej, który według Punzeta [1991] zmalał na odcinku rzeki między Goczałkowicami i Zawichostem o 1/3, a między Smolicami (ujście Skawy) i Sierosławicami (ujście Raby), czyli wzdłuż odcinka rzeki o najbardziej pogłębionym korycie – ponad dwukrotnie. Na przyspieszone przemieszczanie się fal powodziowych wzdłuż odcinków Wisły przedgórskiej o pogłębionym korycie, znaczący wpływ wywiera zwiększona koncentracja fal powodziowych w dolnych odcinkach dopływów karpackich, wywołana analogicznymi przyczynami [Punzet 1991; Wyżga 1992, 1993]. W wyniku poregulacyjnego przemodelowania koryta Wisły przedgórskiej zaznacza się - w efekcie koncentracji fal powodziowych – tendencja do zmniejszania objętości tych fal [Punzet 1991]. Zjawisko to można częściowo tłumaczyć zwiększającą się, od rozpoczęcia generalnych prac regulacyjnych, objętością przepływu pełnokorytowego, co prowadzi do zmniejszania się przepływu w zakresie stanów wody ponadpełnokorytowych [Łajczak 1995a]. Tendencja do efektywnego skracania czasu trwania ponad-



pełnokorytowych stanów wody, zaznaczająca się wzdłuż odcinków rzeki o znacznie pogłębionym korycie i rozpoczęta w różnych okresach XX w., jest niezależna od wieloletnich fluktuacji przepływu Wisły [Łajczak 1995c].

Wybudowanie wałów przeciwpowodziowych, prowadzące do drastycznego zwężenia strefy zatapiania powodziowego, wywołało – łącznie z wyżej podanymi przyczynami – wzrost amplitudy maksymalnych rocznych stanów wody w badanym biegu Wisły, zwłaszcza w okresie po 1920 r. [Osuch 1991; Punzet 1991]. Amplituda wahań stanów wody jest obecnie dwukrotnie większa niż przed utworzeniem wałów przeciwpowodziowych i osiąga w tym biegu rzeki 9 metrów [Soja, Mrozek 1990].

Bardziej aktywne oddziaływanie na przepływ fal powodziowych w międzywalu badanego biegu Wisły zapewnia sterowanie odpływem ze zbiorników zaporowych, prowadzące najczęściej do spłaszczenia fal i właściwego przesuwania ich w czasie [Punzet 1991]. Dobrą ilustrację tego zjawiska może stanowić prawie trzykrotna redukcja maksymalnego przepływu powodziowego poniżej zapory w Goczałkowicach w 1958 r.

## WNIOSKI

Znaczne różnice w poregulacyjnym przemodelowaniu koryta przedgórskiego biegu Wisły znajdują wyraz w zmniejszeniu zagrożenia powodziowego wzdłuż odcinków rzeki o najbardziej pogłębionym korycie i zwiększeniu tego zagrożenia wzdłuż odcinka rzeki poniżej Zawichostu o najpóźniej rozpoczętych pracach regulacyjnych. Na te efekty nakładają się skutki hydrologiczne wynikające ze zwężenia strefy zatapiania powodziowego (międzywale) i budowy zapór wodnych na rzece i dopływach. Wzdłuż odcinka rzeki do ujścia Sanu zmniejszenie zagrożenia powodziowego wyraża się przez tendencję do skracania czasu trwania ponadpełnokorytowych stanów wody, co częściowo wynika z oddziaływania zbiorników zaporowych. Przyspieszone przemieszczanie się fal powodziowych o zwiększonej koncentracji wzdłuż długiego odcinka Wisły o zwężonym i pogłębionym korycie, daje efekt ich spłaszczenia w agradującym odcinku koryta rzeki poniżej Zawichostu, gdzie nie stwierdzono wyraźnej tendencji do skracania ponadpełnokorytowych stanów wody. Równoległe zaznaczająca się tendencja do zwiększania maksymalnych powodziowych stanów wody stoi w sprzeczności z wyrażoną opinią o zmniejszaniu zagrożenia powodziowego w dolinie Wisły przedgórskiej. Ten efekt prac regula-

cyjnych (przemodelowanie koryta i utworzenie wąskiego międzywala) można częściowo zniwelować poprzez efektywne spełnianie przez zbiorniki zaporowe ich funkcji przeciwpowodziowej. Innym sposobem spłaszczania fal powodziowych w Wiśle może być, sygnalizowane w literaturze, utworzenie polderów w rejonie ujścia Skawy i na długim odcinku równiny zalewowej między Krakowem i Sandomierzem.

## BIBLIOGRAFIA

- Brookes A. *Channelized rivers: Prospectives for Environmental Management*. Wiley, Chichester, 1990, s. 326.
- Jędrysiak M., Rusak M. *Kompleksowe zagospodarowanie Wisły*. [w:] A. Piskozub (red.) *Wisła*. Monografia rzeki. Warszawa 1982.
- Łajczak A. *Zróżnicowanie prędkości przepływu w profilu podłużnym Wisły*. Wiad. IMGW, 1991, z. 1–4.
- Łajczak A. *The Impact of River Regulation, 1850–1990, on the Channel and Floodplain of the Upper Vistula River, Southern Poland*. [In:] E.J. Hickin (ed.) *River Geomorphology*. Wiley, Chichester, 1995a, s. 209–233.
- Łajczak A. *Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły*. Monografie Kom. Gosp. Wodn. PAN, 1995b, z. 8.
- Łajczak A. *Potential rates of the present-day overbank sedimentation in the Vistula valley at the Carpathian foreland, Southern Poland*. Quaest. Geogr., 1994c, v. 17/18.
- Łajczak A. *Współczesny transport i sedymentacja materiału unoszonego w Wiśle i głównych dopływach*. Monografie Kom. Gosp. Wodn. PAN, 1999, z. 15, s. 215.
- Osuch B. *Stany wód*. [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.) *Dorzecze górnej Wisły*, cz. I. PWN, Warszawa-Kraków, 1991, s. 159–166.
- Punzet J. *Przepływy charakterystyczne*. [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.) *Dorzecze górnej Wisły*, cz. I. PWN, Warszawa-Kraków, 1991, s. 167–215.
- Soja R., Mrozek T. *Hydrological characteristics of the Vistula River*. Geogr. Stud., Special Issue, No 5, 1990, s. 45–62.
- Starkel L. *Wisła Małopolska*. [w:] A. Piskozub (red.) *Wisła*. Monografia rzeki. Warszawa 1982.
- Wyżga B. *Współczesne pogłębianie koryt karpaccich dopływów Wisły (na przykładzie Raby)*. Wierchy. 1992, t. 56.
- Wyżga B. *Funkcjonowanie systemu rzecznej środkowej i dolnej Raby w ostatnich 200 latach*. Dokument. Geogr., 1993, z. 6.

Dr hab. inż. Adam Łajczak, prof. UŚ  
Uniwersytet Śląski  
Wydział Nauk o Ziemi  
ul. Będzińska 60  
41-200 Sosnowiec  
E-mail: alajczak@o2.pl

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Bednarczyk

*Adam Łajczak*

## **RIVER TRAINING VS. FLOOD EXPOSURE. THE EXAMPLE OF THE RIVER VISTULA BETWEEN SKOCZÓW AND PUŁAWY, POLAND**

### **SUMMARY**

The River Vistula features various stages in the development of training measures that started in the 19<sup>th</sup> c. and aimed to convert it into a waterway. This study focuses on a foreland stretch between the towns of Skoczów and Puławy where the channel, originally meandering, sinuous or braided, has been shortened, narrowed and deepened as a result of engineering projects (Fig. 1, Fig. 2). Big differences were identified in the reshaping of the channel studied following the training measures, resulting in a reduced flood risk along those reaches where the channel depth was increased the most and in a considerable increase of this risk below Zawichost, where the measures were carried out last. The one morphological effect of the engineering that has the greatest impact on the discharge regimen is the increased channel compactness, especially along the originally meandering reaches (Fig. 3). The bank height along the deepened channel reaches increased by 3.5 metres on average since the project started. The changes in the channel morphology are conducive to faster flow rates (Tab. 1), which means that the bankfull discharge increases fast along the considerably deepened channel reaches with built-up banks. This rate is much slower along reaches with less deepening, while the long aggrading reach below Zawichost recorded virtually no increase of the bankfull discharge (Fig. 4). Between the beginning of the river training project and 1990s, the profiles of the bankfull discharge increase and of the vertical channel modifications are mirror images of each other (Fig. 5). The post-engineering reshaping of the Vistula channel studied has produced a great variety of the duration of inter-embankment flooding and a change in the number of events when the zone alongside the river is subject to inundation (Fig. 6). The inter-embankment zones along the least deepened channel reaches remain submerged several times longer, and those of the aggrading channel even several dozen times longer, than those zones where the channel depth has increased the most. The duration of bankfull water stages tends to shorten along the entire channel studied, with the exception of the final reach, regardless of the long-term discharge fluctuation, a trend that has begun at different times and has different intensities (Fig. 7). The changes in the flood risk mentioned above coincide with hydrological effects resulting from the narrowing of the flooding zone (inter-embankment zone) and from the erection of dams on the Vistula itself and on its mountain tributaries. The river engineering also resulted in a greater concentration of flood waves, as expressed by an increasing trend in the maximum flood water stages observed during the 20<sup>th</sup> c. This remains at odds with a manifested opinion claiming a reduced flood risk in the foreland Vistula valley. This effect, however, can be partly compensated for by effective flood control operation of dam-retained lakes. Another way to flatten the Vistula flood waves could be to assign certain areas of the floodplain outside the embankments as flood storage.

**Key words:** Vistula, floods, fluvial processes, river training