

Zmiany układu koryt Wisły spowodowane funkcjonowaniem stopnia wodnego „Włocławek” na podstawie analizy zdjęć lotniczych*

*Changes of Vistula River channels pattern caused by
Włocławek Dam functioning
based on the analysis of aerial photographs*

PIOTR J. GIERSZEWSKI

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN
87-100 Toruń, ul. Kopernika 19; piotr.gierszewski@geopan.torun.pl

JACEK B. SZMAŃDA

Instytut Geografii, Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej
30-084 Kraków, Podchorążych 2; jszmanda@up.krakow.pl

MAŁGORZATA LUC

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński
30-387 Kraków, ul. Gronostajowa 7; mluc@gis.geo.uj.edu.pl

Zarys treści. Wielokorytowy system fluwialny dolnej Wisły, z korytem głównym typu roztokowego, jest przykładem transformacji z jednokorytowego systemu piaszkodennej rzeki roztokowej do systemu wielokorytowego. Transformacja ta zachodzi obecnie pod silnym wpływem antropopresji wywołanej najpierw przeprowadzoną regulacją koryta, a następnie oddziaływaniem stopnia wodnego we Włocławku. Zarówno powyżej, jak i poniżej zbiornika zaporowego utworzonego w wyniku spiętrzenia rzeki zaobserwowano spadek liczby form korytowych i międzykorytowych. Obszary międzykorytowe w wyniku zanikania bocznych ramion zostały włączone w obszar równiny zalewowej, a utrwalone roślinnością międzykorytowe wyspy zwiększały swoją powierzchnię ewoluując w kierunku obszarów międzykorytowych. Jednocześnie zmniejszyła się liczba i powierzchnia odsypów piaszczystych. Efektem procesów fluwialnych przebiegających w warunkach oddziaływania budowli hydrotechnicznych jest powolne utrwalenie się wielokorytowego systemu fluwialnego, który w odróżnieniu od klasycznej rzeki anastomozującej, której koryta rozdzielają obszary międzykorytowe, można określić jako rzekę rozgałęzioną (*anabranching*).

Słowa kluczowe: system korytowy, zmiany układu koryt, zabudowa hydrotechniczna, dolna Wisła, analiza przestrzenna.

* Badania zostały zrealizowane w ramach projektu MNiSzW N N306 084837 „Kierunki przemian rzeźby i depozycji osadów w wielokorytowych systemach fluwialnych Wisły i Dunaju w warunkach zabudowy hydrotechnicznej – studium porównawcze”.

Wprowadzenie

Ewolucja systemu korytowego dolnej Wisły jest zagadnieniem dyskutowanym przynajmniej od lat 1960. Zdaniem E. Falkowskiego (1967, 1971) dolina dolnej Wisły wykazuje cechy charakterystyczne dla dojrzałej rzeki swobodnej, której dno modelowane jest przez koryto rzeki roztokowej „dzikiej”. Później autor ten modyfikuje swój pogląd na ten temat i uznaje, że na odcinku od Zawichostu do ujścia Wisła miała charakter młodej rzeki roztokowej, której dolina wykorzystywała starsze formy o genezie glacialnej, a na jej dalszą ewolucję duży wpływ miały procesy agradacyjne (Falkowski, 1980). Według E. Falkowskiego roztokowe koryto Wisły na tym odcinku powstało na drodze ewolucji z koryta rzeki meandrującej. Poglądy te przejęte zostały następnie między innymi przez W. Florka i innych (1987, 1990), E. Wiśniewskiego (1987) oraz E. Mycielską-Dowgiałło i J. Chomskiego (2000). Według tych autorów meandrowy przebieg koryta Wisły powyżej Kotliny Płockiej trwał od preboreału do początku subatlantyku. Z badań przeprowadzonych przez A. Tomczak (1982, 1987), E. Wiśniewskiego (1987, 1990), W. Niewiarowskiego (1987, 1997) i Z. Babińskiego (1990) podsumowanych w pracy L. Starkla (2001) wynika, że dolna Wisła poniżej Kotliny Płockiej nigdy nie osiągnęła stadium rzeki meandrującej. W większości prac przyjmowano, że do czasu przeprowadzenia szerszej zakrojonych prac regulacyjnych, które miały miejsce pod koniec XIX wieku, koryto dolnej Wisły miało charakter roztokowy. Nieco inny był pogląd Z. Babińskiego i K. Klimka (1990) – uważali oni, że na odcinku od Warszawy do Torunia koryto wykazywało cechy roztokowo-anastomozujące. Przeważały odcinki charakterystyczne dla krętej rzeki roztokowej o bardziej lub mniej rozwiniętej roztokowości. Wielokorytowy system anastomozujący, który tworzyły zazwyczaj 2 lub 3 koryta, funkcjonował natomiast lokalnie. Po przeprowadzonych w różnych okresach XIX i XX wieku regulacjach koryta dolnej Wisły, układ roztokowo-anastomozujący podlegał w różnym stopniu przekształceniu. Należy podkreślić, że tam gdzie regulacja została przeprowadzona częściowo, np. poniżej Warszawy, układ roztokowo-anastomozujący przetrwał do dzisiaj. Poniżej zapory we Włocławku przekształcenia koryta są jednak duże. Badania Z. Babińskiego (1992, 2002), a ostatnio również M. Habla (2013) wykazały, że początkowo roztokowo-anastomozujące koryto przekształciło się na odcinku 20 km poniżej zapory (Włocławek-Bobrowniki) w koryto o przebiegu wyprostowanym. Poniżej Bobrownik ma ono charakter roztokowy, a podczas wysokich przepływów anastomozujący. Na odcinku uregulowanym w XIX wieku (poniżej Silna) funkcjonuje koryto proste o krętym przebiegu nurtu w czasie niskich przepływów.

Oceniając charakter rozwinięcia koryta dolnej Wisły na odcinku od ujścia Narwi do Nieszawy według typologii zaproponowanej przez D.L. Rosgena (1994) można przyjąć, że reprezentowało ono – zarówno w przeszłości, jak i obecnie –

układ typu 5DA/5D, czyli charakterystyczny dla piaskodennej rzeki rozgałęzionej (wielokorytowej) z przewagą koryt typu roztokowego. Przegrodzenie koryta Wisły w 1968 r. stopniem wodnym zlokalizowanym we Włocławku i utworzenie w wyniku tego w 1970 r. zbiornika zaporowego spowodowało większe lub mniejsze zmiany procesów kształtujących koryto rzeczne powyżej i poniżej zbiornika.

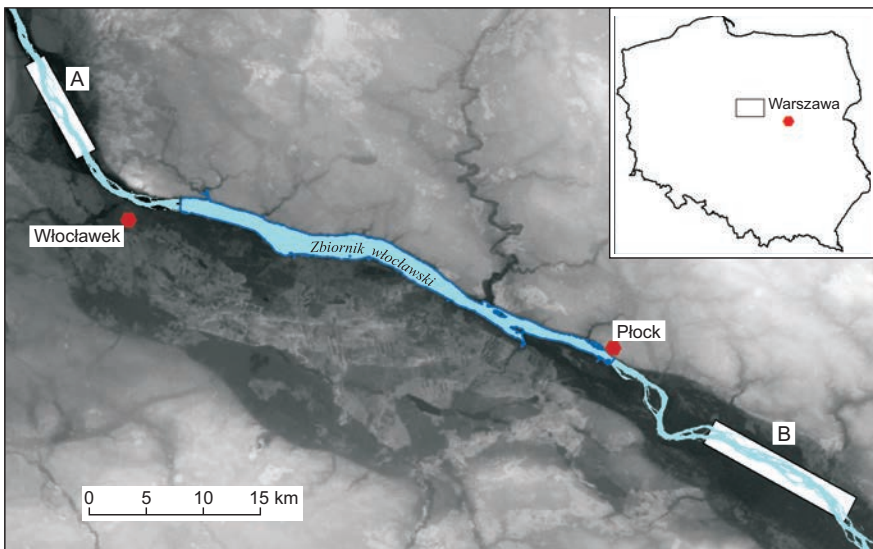
Celem analizy przedstawionej w artykule jest odpowiedź na pytanie, czy i w jakim stopniu zmiana reżimu hydrologicznego Wisły oraz warunków transportu rumowiska klastycznego w okresie 40 lat funkcjonowania stopnia wodnego Włocławek wpłynęła na przekształcenie układu koryta Wisły. Podjęto również próbę ilościowego opisu tych przekształceń. Zostały one prześledzone na dwóch odcinkach Wisły: około 10 km poniżej zapory we Włocławku oraz bezpośrednio powyżej cofki zbiornika. Poza krótkim okresem po wybudowaniu stopnia wodnego na odcinku poniżej zapory w pozanurtowych częściach koryta akumulowane były produkty erozji jego dna. Według Z. Babińskiego (1982) tempo tego procesu było tak duże, że już rok po oddaniu stopnia wodnego do eksploatacji koryta boczne zapełniały się aluwiami wyerodowanymi z dna koryta. Obecnie na opisywanym odcinku panują warunki erozyjno-akumulacyjne z przewagą procesów erozji. W odcinku koryta powyżej cofki zbiornika przez cały czas przeważały procesy agradacyjne.

Obszar badań

Zmiany układu koryta Wisły powyżej cofki zbiornika, która przy średnim dopływie wody sięga do 618 km biegu rzeki, prześledzono na odcinku między miejscowościami Rybaki (606 km) i Nowy Troszyn (619 km) (odcinek B – „Kępa Wykowo”, ryc. 1). W granicach tego fragmentu koryta, który został nazwany „Kępa Wykowo”, występują trzy duże wyspy wiślane (Wykowo, Kamieńska, Świńniary) oraz szereg mniejszych form. Drugi z badanych odcinków o nazwie „Kępa Bógpomóż” położony jest poniżej zapory we Włocławku (674, 8 km), między 685 i 694 km biegu Wisły, tj. między miejscowościami Włocławek-Korabniki i Mikołorzyn (odcinek A – „Kępa Bógpomóż”, ryc. 1). Głównymi formami koryta są tutaj kępy: Korabnicka, Rachcin, Szpica, Sucha i Bógpomóż. Oba analizowane odcinki koryta rozciągają się w przewężeniach doliny Wisły oddzielających: Kotlinę Warszawską od Kotliny Płockiej („Kępa Wykowo”) i Kotlinę Płocką od Kotliny Toruńskiej („Kępa Bógpomóż”). Współczesne koryta w granicach odcinka badawczego „Kępa Wykowo” położone są prawie centralnie w dolinie o szerokości 7-8 km. Dno doliny zajmuje w tym miejscu równina zalewowa o szerokości około 2 km. Na odcinku „Kępa Bógpomóż” koryto przebiega asymetrycznie, w jeszcze węższej dolinie o zmiennej szerokości (5-8 km) z równiną zalewową wykształconą w postaci wąskich listew.

Analizowane odcinki koryt poddane zostały tylko częściowej regulacji, którą prowadzono od początku XX wieku do lat 1960., a w odcinku powyżej zbiornika

włocławskiego zaporowego (Jeziora Włocławek) jeszcze w latach 1980. W tym okresie powstały m.in. ostrogi i przetamowania koryt bocznych (Banach, 1998). Wykonana regulacja doprowadziła do zwężenia i jednocześnie pogłębienia się koryta głównego. Poza pogłębianiem się koryta na linii wyznaczonej trasy regulacyjnej w innych jego częściach obserwowana jest dość intensywna agradacja rumowiska rzeczno (Banach, 1998). Część form korytowych połączyła się z obszarem równiny zalewowej. Ponadto w skład równiny zalewowej włączone zostały fragmenty koryta położone między ostrogami oraz część koryt bocznych zamkniętych przetamowaniami. Obszary te tworzą tzw. poregulacyjną równinę zalewową (Babiński, 1992).



Ryc. 1. Położenie obszaru badań. A – odcinek Kępa Bógpomóż, B – odcinek Kępa Wykowo

Location of study area. A – Kępa Bógpomóż section, B – Kępa Wykowo section

Źródło: dane STRM./ Source: STRM data.

Kolejny ważny etap antropogenicznych przekształceń koryta Wisły rozpoczął się z chwilą wybudowania stopnia wodnego „Włocławek”. Jednym z wielu skutków oddziaływania tego typu budowli na system rzeczny jest zmiana warunków transportu rumowiska rzeczno, która wpływa również na powstanie określonego układu koryta (Babiński, 2002). Spadek prędkości przepływu wody oraz wzrost głębokości akwenu w kierunku zapory sprzyja szybkiej depozycji rumowiska wlezonego, które odkłada się w formie delty stożkowej w górnej części zbiornika. Według szacunków Z. Babińskiego (1997) średnia roczna (1971-1990) wielkość rumowiska wlezonego zatrzymywanego w zbiorniku włocław-

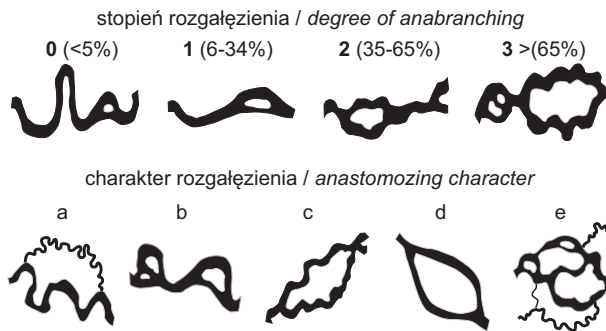
skim wynosi 2300 tys. ton. O dużej akumulacji rumowiska w górnej, rzecznej części zbiornika wrocławskiego, wspominają również M. Bogucka-Szymalska i A. Magnuszewski (2007). Tworząca się delta może być przyczyną lokalnego podniesienia poziomu wody w korycie, co w konsekwencji powoduje sukcesywne przesuwanie się cofki zbiornika, a więc i odcinka akumulacyjnego, w górę rzeki (np. Wang i Hu, 2004). Akumulacyjny charakter koryta Wisły powyżej zbiornika wrocławskiego, w tym również na odcinku testowym „Kępa Wykowo” potwierdza między innymi obecność wielu odsypów piaszczystych. Do tej pory nie ma jednak wyników badań, które wiązałyby bezpośrednio agradację w korycie Wisły powyżej zbiornika z jego funkcjonowaniem. Istotne zmiany układu koryt Wisły powyżej zbiornika dokonują się w okresie zlodzenia rzeki. W warunkach obecności zatorów śrężowo-lodowych, które po utworzeniu zbiornika formują się częściej, dochodzi między innymi do udrażniania koryt bocznych, co utrwała układ wielokorytowy (Grześ, 1991, 1999).

Bardziej wyraziste zmiany morfologii koryt rzecznych, uwarunkowane funkcjonowaniem zbiorników zaporowych, obserwowane są na odcinkach położonych poniżej zapór (por. Babiński, 1992; Brandt, 2000; Petts i Gurnell, 2005). Sedymentacja dużej części klastycznego rumowiska rzeczno-zaporowego jest jedną z przyczyn wzrostu energii wody przepływającej przez zapórę, co przekłada się na silną erozję koryt poniżej stopni wodnych (Morris i Fan, 1998; Babiński, 2002). Produkty tej erozji (dennej i bocznej) odkładają się następnie w korycie oraz na równinie zalewowej w pewnej odległości od zapory. Wpływ stopnia wodnego „Włocławek” na przebieg procesów erozyjnych i akumulacyjnych w korycie Wisły był przedmiotem wieloletnich badań prowadzonych przez Z. Babińskiego (1992, 1997, 2002), kontynuowanych następnie przez M. Habla (2013). Wynika z nich, że po 20 latach funkcjonowania stopnia czoło strefy erozyjnej położone było około 30 km poniżej zapory, co oznacza, że odcinek „Kępa Bógpomóż” leży w całości w jej zasięgu. Na intensywną erozję koryta poniżej stopnia wodnego we Włocławku wpływa reżim pracy hydroelektrowni. Do 2002 roku był to reżim szczytowo-interwencyjny o dużych dobowych zmianach przepływu wody ($450-1600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), których skutkiem były chwilowe przyrosty energii wody (Babiński, 1982). Zmiana reżimu na przepływowo-interwencyjny pod koniec 2002 r. tylko w niewielkim stopniu zmniejszyła negatywny wpływ pracy hydroelektrowni na stan koryta Wisły. Skutkiem tak intensywnej erozji był wzrost głębokości koryta i zmniejszenie jego szerokości. W latach 1969-2009 średnia głębokość koryta między 10 a 20 km poniżej zapory zwiększyła się o około 2,1 m (Habel, 2013). Przejawem erozji koryta na odcinku rozciągającym się do 30 km poniżej stopnia wodnego jest prawie całkowity brak łach piaszczystych. W dnie koryta odsłaniają się tutaj również trudno rozmywalne utwory w postaci żwirowo-kamienistego residuum czwartorzędowego oraz ilastych osadów plioceńskich. Powierzchnie te tworzą podwodne progi, których obecność ogranicza erozję denną w korycie rzeki, jednocześnie sprzyjając jego bocznej

migracji oraz udrażnianiu koryt bocznych (Falkowski, 1990; Habel, 2013). Jeden z takich trudnorozmywalnych progów występuje na kilometrze 690 w granicach odcinka „Kępa Bógpomóż” (Habel, 2013).

Metody i materiały

Do określenia układu analizowanych odcinków koryt Wisły wykorzystano klasyfikację zaproponowaną przez J.C. Brice'a (1975) oraz J.C. Brice'a i J.C. Blodgetta (1978). Dla układów wielokorytowych została ona uzupełniona i zmodyfikowana przez A.K. Teisseyre (1991), a następnie przez J. Szymański i M. Luc (2010) (ryc. 2).



Ryc. 2. Klasyfikacja koryt rozgałęzionych według J.C. Brice'a (1975) i A.K. Teisseyre'a (1992).

a – koryta utworzone głównie przez boczne koryta kręte, b – głównie koryto rozgałęzione złożone, c – koryto rozdwojone z krętymi ramionami rozgałęzionymi, d – koryto rozdwojone z prawie równoległymi ramionami o małej krętości, e – złożone koryto anastomozujące

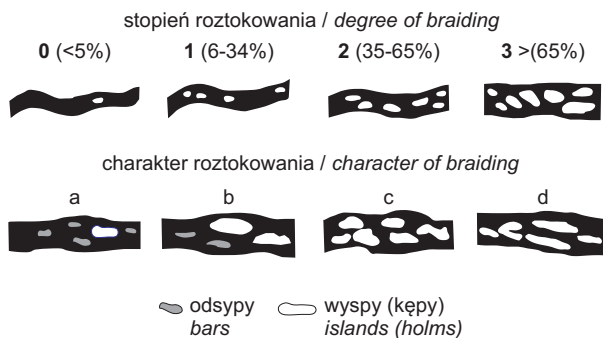
Classification of anabranching multiple channel systems after J.C. Brice (1975) and A.K. Teisseyre (1992).

a – sinuous side channel mainly, b – cutoff loops mainly, c – split channels with sinuous anabranches, d – split channel with sub-parallel anabranches, e – composite anastomosing channel

Analiza układu koryt metodą J.C. Brice'a, oprócz określenia stopnia rozgałęzienia koryt i jego charakteru na podstawie wzorców zamieszczonych na rycinie 2, wymaga wyliczenia wartości bezwymiarowych parametrów długości L/w oraz szerokości w'/w form międzykorytowych (Brice i Blodgett, 1978). W tym celu dokonuje się pomiarów długości formy – L , szerokości koryta – w oraz szerokości formy – w' . Na podstawie wyliczonych wartości bezwymiarowych parametrów J.C. Brice i J.C. Blodgett (1978) rozróżnili dwa typy form międzykorytowych: (1) wyspy, czyli formy, których rozmiary spełniają jednocześnie dwa warunki – $L/w < 7$ i $w'/w < 3$, (2) obszary międzykorytowe spełniające warunki $L/w > 7$ i $w'/w > 3$). A.K. Teisseyre (1991) proponuje nieco inne kryteria wyróżnienia form

międzykorytowych. Jego zdaniem, aby odróżnić wyspy od obszarów międzykorytowych, korzystniejsze jest przyjęcie wartości granicznych bezwymiarowych parametrów na poziomie $L/w=4$ i $w'/w=1$. Badania układu koryta Dunaju, które prowadzili J. Szymańda i M. Luc (2010) wykazały, że niezależnie od przyjęcia jednego z dwóch kryteriów wartości granicznych bezwymiarowych parametrów długości i szerokości, część form nie spełniała jednocześnie obydwu warunków. Był więc problem z zaliczeniem powierzchni międzykorytowych do wysp lub obszarów międzykorytowych. W tym opracowaniu przyjęto graniczne wartości parametrów według propozycji J.C. Brice i J.C. Blodgett (1978). Rezygnacja z wartości granicznych zaproponowanych przez A.K. Teisseyre (1991, 1992) wynikała z tego, że po ich zastosowaniu do obszarów międzykorytowych zaliczone zostałyby nieutrwalone odsypy piaszczyste, które ewidentnie stanowią formy jednokorytowego systemu rzeki roztokowej. Wyklucza to przyjęcie tych wartości jako granicznych w przypadku klasyfikacji układów rzek wielokorytowych. Uwzględniając powyższe problemy przyjęto, że do obszarów międzykorytowych zaliczane będą formy, które spełnią przynajmniej jeden z warunków: $L/w > 7$ lub $w'/w > 3$. Ponadto na podstawie bezwymiarowego parametru kształtu formy (L/w') wyróżniliśmy formy (1) regularne ($L/w' < 2$), (2) wydłużone ($2 < L/w' < 10$) i (3) liniowe ($L/w' > 10$) (Szymańda i Luc, 2010).

Wśród analizowanych form oprócz ustabilizowanych przez roślinność wysp wyróżnione zostały także nieutrwalone piaszczyste odsypy stanowiące formy koryta roztokowego, dlatego trzeba tu krótko omówić klasyfikację układów koryt roztokowych według J.C. Brice'a (1975) (ryc. 3). Podobnie jak w przypadku klasyfikacji rzek rozgałęzionych, wyróżnił on 4 stopnie roztokowania oraz 4 typy



Ryc. 3. Klasyfikacja koryt roztokowych według J.C. Brice'a (1975), zmienione
 a – koryto roztokowe o przewadze odsypów, b – koryto roztokowe z odsypami i wyspami,
 c – koryto roztokowe głównie z wyspami roztokowymi o różnym kształcie, d – koryto roztokowe
 z długimi i wąskimi wyspami

Classification of system of braiding channels after J.C. Brice (1975), as modified
 a – mostly bars, b – bars and islands, c – mostly islands of diverse shape, d – mostly long
 and narrow islands

roztokowania. W klasyfikacji tej odsypy traktowane są jako formy korytowe czasowo wynurzone podlegające ciągłemu przemodelowywaniu, szczególnie podczas wysokich stanów wody. Wyspy zaś – to wynurzone, zwykle utrwalone przez roślinność, względnie stabilne formy równiny zalewowej. A.K. Teisseyre (1992) zaproponował wyróżnienie wśród odsypów form zanurzonych i wynurzonych. W zaprezentowanej poniżej analizie układu koryt Wisły uwzględnione zostały tylko odsypy wynurzone.

Do badań wykorzystano zdjęcia lotnicze, które w całości pokrywały wybrane do analizy odcinki koryta Wisły powyżej i poniżej Jeziora Włocławskiego. W obu przypadkach zdjęcia pochodziły z dwóch okresów, przed i po budowie stopnia wodnego we Włocławku. Dla odcinka „Kępa Bógpomóż” były to lata 1959 i 2010, a dla odcinka „Kępa Wykowo” lata 1961 i 2009. Ze względu na różny czas wykonania zdjęć ich charakterystyka była zróżnicowana (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka zdjęć lotniczych wykorzystanych w badaniach
Characteristics of aerial photographs used in the study

Odcinek <i>Section</i>	Rok wykonania zdjęć <i>Aerial photographs year</i>	Liczba zdjęć <i>Number of photos</i>	Rodzaj zdjęcia <i>Type of photos</i>	Przybliżona skala zdjęć <i>Approximate photo scale</i>
Bógpomóż	1959	12	panchromatyczne	1:10 000
	2010	3	kolorowe	1:26 000
Wykowo	1961	6	panchromatyczne	1:20 000
	2009	3	kolorowe	1:26 000

Zdjęcia nie zostały zortorektyfikowane i wykazują duże zniekształcenia, a skala i wielkość tych zniekształceń zależą od okresu wykonania zdjęć lotniczych. Generalnie im więcej okresów badawczych, tym trudniej nałożyć na siebie materiały teledetekcyjne. Dlatego wykorzystane zostały dodatkowe materiały w postaci map topograficznych oraz wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych pochodzących z portalu GoogleEarth. Materiały te okazały się bardzo przydatne, gdyż na analizowanych zdjęciach lotniczych występuje mało punktów charakterystycznych, według których dokonuje się georektyfikacji. Problemy te spowodowały powstanie dość dużego średniego błędu pomiarowego RMS rzędu kilku metrów, który rzutuje na wyniki końcowe wykonanych pomiarów. Na tak przygotowanych materiałach została przeprowadzona digitalizacja manualna na ekranie. Umożliwiła ona stworzenie graficznej bazy danych koryta Wisły dla różnych okresów badawczych oraz form korytowych i międzykorytowych. Wszystkie operacje geoinformatyczne zostały przeprowadzone w programie ArcGIS 10.1.

Wyniki analizy

Analiza zdjęć lotniczych z roku 1959 wykazała, że na odcinku Kępa Bógpomóż o długości 9 km przed wybudowaniem zapory we Włocławku dominującymi formami w korycie były wyspy (ryc. 4; tab. 2). Ich łączna powierzchnia



Ryc. 4. Zmiany układu koryt Wisły w okolicy „Kępy Bógpomóż”. 1 – koryto rzeczne, 2 – korytowe formy nieutrwalone, 3 – międzykorytowe formy utrwalone

Changes in the configuration of the Vistula channel near “Kępa Bógpomóż”.

1 – river channel, 2 – unstable channel forms, 3 – stable inter-channel forms

Zdjęcie lotnicze / Aerial photo: Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK), Warszawa.

Tabela 2. Wartości bezwymiarowych parametrów form systemu fluwialnego Wisły w okolicy „Kępy Bógpomóż” i „Kępy Wykowo”

Values of dimensionless parameters for forms in the Vistula fluvial system near the Bógpomóż and Wykowska Holms

Typ formy <i>Form type</i>	<i>n</i>	%	<i>L/w</i>		<i>w'/w</i>		<i>L/w'</i>	
			średnia <i>average</i>	odchyl. stand. <i>Std dev</i>	średnia <i>average</i>	odchyl. stand. <i>Std dev</i>	średnia <i>average</i>	odchyl. stand. <i>Std dev</i>
Kępa Bógpomóż 1959								
Odsyp	2	3,8	0,90	0,89	0,47	0,53	2,31	0,72
Wyspa	47	88,7	1,33	1,37	0,52	0,53	3,17	1,64
Obszar	4	7,5	8,03	0,85	2,70	0,45	3,03	0,49
Kępa Bógpomóż 2010								
Odsyp	1	12,5	0,59	–	0,43	–	1,36	–
Wyspa	6	75,0	2,23	1,80	0,68	0,60	2,23	2,78
Obszar	1	12,5	17,25	–	6,75	–	2,56	–
Kępa Wykowo 1961								
Odsyp	17	24,3	1,16	1,29	0,37	0,33	2,96	1,32
Wyspa	51	72,9	1,78	1,43	0,54	0,45	3,65	1,33
Obszar	2	2,9	11,4	1,14	2,87	1,19	4,26	1,37
Kępa Wykowo 2009								
Odsyp	12	23,1	0,81	0,80	0,39	0,40	2,32	0,87
Wyspa	36	69,2	1,70	1,41	0,47	0,45	4,14	1,92
Obszar	4	7,7	9,29	2,69	1,86	0,51	5,38	2,09

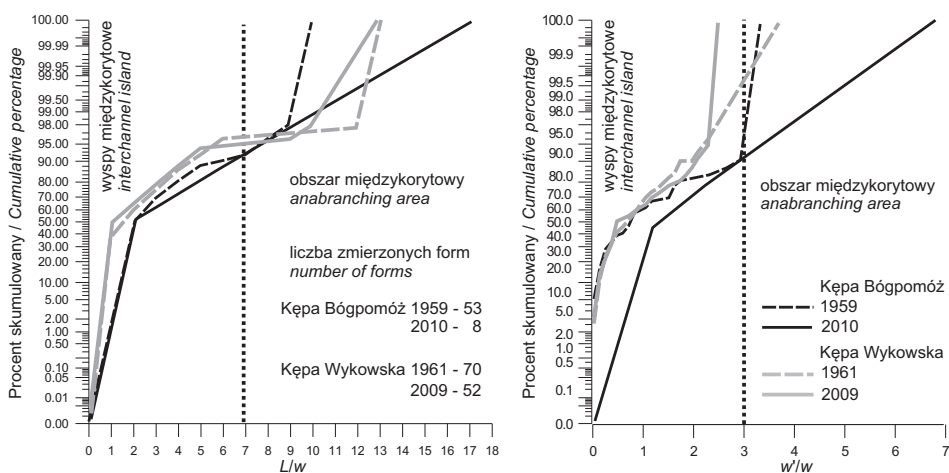
n – liczba form, % – udział, *L/w* – bezwymiarowy parametr długości, *w'/w* – bezwymiarowy parametr szerokości, *L/w'* – bezwymiarowy parametr kształtu.

n – number of forms, % – percentage, *L/w* – dimensionless length parameter, *w'/w* – dimensionless width parameter, *L/w'* – dimensionless shape parameter.

Opracowanie własne. / Author's own elaboration.

chnia stanowiła 79% powierzchni wszystkich form. Najmniejsza wyspa miała powierzchnię 0,03 ha, a największa 50 ha. Największa wyspa była formą wydłużoną ($L/w'=4,64$) i wąską ($w'/w=0,69$), a jej powierzchnia o 13 ha przewyższała powierzchnię największego obszaru międzykorytowego. Mimo tak dużych rozmiarów forma ta spełnia, w odniesieniu do wartości parametrów bezwymiarowych, warunki charakteryzujące wyspy, a nie obszary międzykorytowe. Dla koryta o szerokości 480 m, długości formy 1500 m i szerokości 300 m wyliczone wartości parametrów bezwymiarowych wynoszą $L/w=3,2$ i $w'/w=0,7$. Wśród wysp przeważały formy wydłużone (73%) i wąskie. Dla 83% form bezwymiarowy

parametr szerokości mieścił się w zakresie $0,02 < w'/w < 1,0$. Także obszary międzykorytowe były formami wąskimi – bezwymiarowy parametr szerokości żadnej z form tego typu nie przekroczył granicznej wartości 3 (ryc. 5). Po ponad 40 latach funkcjonowania stopnia wodnego we Włocławku liczba form położonych w korycie poniżej zapory zmniejszyła się prawie siedmiokrotnie (ryc. 4, ryc. 5, tab. 2), a ich łączna powierzchnia zmniejszyła się o połowę z 202 ha do 101 ha. W dalszym ciągu dominują tutaj wyspy, pod względem zarówno liczby, jak i łącznej powierzchni, która stanowiła 73% obszaru wszystkich form. Jednocześnie wyspy stały się nieco krótsze i szersze (tab. 2). Przeciętna powierzchnia wysp wzrosła z 3 ha do 13 ha. W odcinku „Kępa Bógpomóż” średnia szerokość koryt zwiększyła się od 235 m do 295 m.

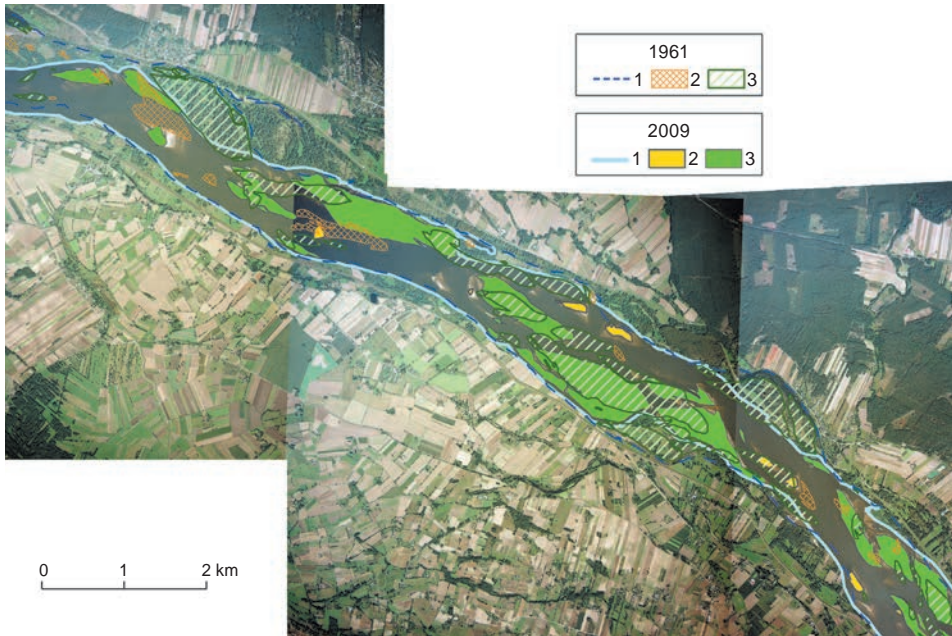


Ryc. 5. Charakterystyka morfometryczna form systemu fluwialnego Wisły w okolicy „Kępy Bógpomóż” i „Kępy Wykowo”. Rozkład parametrów bezwymiarowych długości (L/w) i szerokości (w'/w)

Morphometric characteristics of landforms in the Vistula fluvial system near the “Kępa Bógpomóż” and “Kępa Wykowo” holms. Distribution of dimensionless length (L/w) and width (w'/w) parameters

Analiza zdjęć z odcinka „Kępa Wykowo” położonego powyżej cofki zbiornika wykazała, że przed utworzeniem zbiornika zaporowego dominującymi formami koryta były wyspy (ryc. 6, tab. 2), podobnie jak w odcinku „Kępa Bógpomóż”. Ich łączna powierzchnia stanowiła 54% powierzchni wszystkich form i była mniejsza niż w przypadku odcinka „Kępa Bógpomóż”. Pod względem liczebności form na drugim miejscu były odsypy (tab. 2), natomiast jeśli chodzi o powierzchnię drugie miejsce zajmowały obszary międzykorytowe (32% powierzchni). Większość badanych form niezależnie od typu była formami wydłużonymi. Największa

z wysp miała powierzchnię 30 ha, a największy obszar 76 ha. Po wybudowaniu zapory zmniejszyła się liczba form – z wyjątkiem obszarów międzykorytowych – a ich powierzchnia nieznacznie zmalała z 400 ha do 328 ha. Mimo że liczba wysp się zmniejszyła, to ich udział w powierzchni wzrósł do 87%. Z wyjątkiem odsypów badane formy stały się węższe i bardziej wydłużone (tab. 2, ryc. 6). Przeciętna powierzchnia wysp wzrosła z 4 ha do 8 ha, natomiast średnia powierzchnia odsypów zmniejszyła się z 3 ha do 1 ha. W odróżnieniu od odcinka „Kępa Bógpomóż” średnia szerokości koryt zmniejszyła się na odcinku „Kępa Wykowo” nieznacznie – z 304 m do 291 m (por. ryc. 6).



Ryc. 6. Zmiany układu koryt Wisły w okolicy „Kępy Wykowo”. 1 – woda, 2 – korytowe formy nieutrwalone, 3 – międzykorytowe formy utrwalone

Changes in the configuration of the Vistula channel near “Kępa Wykowo”. 1 – river channel, 2 – unstable channel forms, 3 – stable inter-channel forms

Zdjęcie lotnicze / Aerial photo: Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK), Warszawa

Dyskusja wyników i wnioski

Funkcjonowanie stopnia wodnego Włocławek oraz oddziaływanie cofki utworzonego zbiornika zaporowego na przebieg procesów erozji koryta, transportu i sedymentacji rumowiska klastycznego było na obu analizowanych odcinkach rzeki przyczyną istotnych zmian w układzie koryt. Zarówno powyżej, jak i poniżej zbiornika zmniejszyła się liczba form korytowych (przede wszystkim wysp, ale również nieutrwalonych odsypów) oraz międzykorytowych (obszarów międzykorytowych) – tabela 2. Zdecydowanie większe zmiany, odnoszące się i do liczby, i do kształtu poszczególnych typów form, zaobserwowano na odcinku położonym poniżej stopnia wodnego („Kępa Bógpomóż”). Tak duża skala zmian ma co najmniej trzy przyczyny. Przeprowadzone na tym odcinku Wisły prace regulacyjne, polegające między innymi na budowie przetamowań w korytach bocznych wpłynęły na przyspieszone wypełnienie tych koryt aluwiami. W efekcie tego część wysp oraz obszarów międzykorytowych połączyła się z równiną zalewową (ryc. 4). Zmniejszenie liczby wysp na tym odcinku koryta należy jednak wiązać przede wszystkim z intensywną erozją w korycie Wisły poniżej stopnia wodnego. Erozja powodowała pogłębianie koryta w nurcie oraz zwężanie jego aktywnej części (Babiński, 1992; Habel, 2013). Pośrednim tego skutkiem było zmniejszanie się głębokości wody w pozanurtowych częściach koryta, co powodowało, że niektóre wyspy uzyskiwały połączenie z równiną zalewową. Oczywiście konsekwencją tak silnej erozji było także niszczenie części form. Dostawa dużych ilości materiału pochodzącego z erozji dna koryta sprzyjała również łączeniu się mniejszych wysp w większe, na co wskazuje wzrost powierzchni wysp. Wpływ na zmianę parametrów koryta na odcinku „Kępa Bógpomóż” miało też odsłonięcie się w wyniku erozji utworów trudno rozmywalnych w dnie koryta. Spowodowało to wyhamowanie erozji dennej, ale jednocześnie zwiększyło aktywność procesu erozji bocznej, na co wskazywał M. Habel (2013). Z procesem tym wiązać należy stwierdzone poszerzanie się koryt na tym odcinku o około 15%.

Jak już zaznaczono, zmiany układu koryta na odcinku Kępa Wykowo po ponad 40 latach funkcjonowania stopnia wodnego we Włocławku okazały się zdecydowanie mniejsze niż w korycie poniżej zapory. Przeprowadzona fragmentarycznie regulacja polegająca m.in. na odcinaniu tamami koryt bocznych, spowodowała inkorporację części form korytowych w obszar równiny zalewowej, co przyczyniło się do zmniejszenia ich liczby. Zmniejszenie liczby wysp i odsypów przy jednoczesnym wzroście ilości obszarów międzykorytowych dowodzi, że formy korytowe łącząc się ze sobą tworzyły większe kompleksy; wskazuje na to również zwiększenie się średniej powierzchni wysp. Część odsypów piaszczystych została utrwalona roślinnością i przekształciła się w wyspy. Niewielkie zmniejszenie się szerokości koryt na tym odcinku – to skutek zasypywania części koryt bocznych aluwiami po przeprowadzonej regulacji oraz konsolidacji mniejszych form.

W nawiązaniu do wzorca układu koryt J.C. Brice'a (ryc. 2), na podstawie wyników analizy układu koryt na zdjęciach lotniczych (ryc. 4 i 5) i wartości parametrów bezwymiarowych (tab. 2) proponujemy, aby układ korytowy Wisły poniżej zbiornika włocławskiego w okolicy „Kępy Bógpomóż” i powyżej na odcinku Kępa Polska–Wykowo zaklasyfikować jako system wielokorytowy typu 3d. W celu doprecyzowania określenia typu koryta (3d – rozdwojone z prawie równoległymi ramionami o małej krętości) należy jednak dodać informację, że koryta te mają różną szerokość, a koryto główne reprezentuje typ roztokowania 2d, czyli koryto roztokowe z długimi wąskimi wyspami. Zdaniem A.K. Teisseire'a (1991) ten typ koryta roztokowego jest typem przejściowym do rzeki anastomozującej. Należy jednak zaznaczyć, że w części koryt bocznych w czasie niżówek rzecznych przepływ okresowo zanika. Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o podobnym rozwoju systemów koryt na obydwu badanych odcinkach, mimo pewnych różnic cech środowiska (np. czynników kępujących rozwój koryta), rodzaju i intensywności oddziaływania czynników natury antropogenicznej oraz różnego znaczenia poszczególnych procesów kształtujących koryto rzeczne. Problem ten wymaga bardziej szczegółowych badań.

Uzyskane wyniki badań wykazały, że jednokorytowy – roztokowy system fluwialny Wisły ewoluuje na analizowanych odcinkach w kierunku rzeki wielokorytovej typu anastomozującego. Proces ten przebiega podobnie jak w modelu opisanym przez D.G. Smith i N.D. Smith (1980) na przykładzie rzeki Alexandra. Wyniki badań potwierdzają w ogólnym zarysie pojawiające się już wcześniej w literaturze informacje wskazujące na złożony typ układu koryta dolnej Wisły, które wykazuje cechy zarówno roztokowości, jak i anastomozowania (por. Babiński i Klimek, 1990).

Zdaniem autorów bardziej trafne jest zaklasyfikowanie badanych odcinków dolnej Wisły do rzek o korycie typu rozgałęzionego niż anastomozującego. Jako rozgałęzione były już wcześniej określane podobne układy koryt (Kalicki i Szymańda, 2009; Szymańda i Luc, 2010). Rzeka rozgałęziona, inaczej rzeka typu *anabranching*, różni się według G.C. Nansona i A.D. Knightona (1996) od opisywanej w literaturze rzeki anastomozującej tym, że jej koryta rozdzielone są w większości wyspami, a nie jak w przypadku rzek typu anastomozującego – głównie obszarami międzykorytowymi (Schumm, 1981; Miall, 1985; Teisseyre, 1992; Gradziński i inni, 2003).

Piśmiennictwo / References

- Babiński Z., 1982, *Procesy korytowe Wisły poniżej zapory we Włocławku*, Dokumentacja Geograficzna, 1-2.
- Babiński Z., 1990, *Charakterystyka równiny zalewowej dolnej Wisły*, Przegląd Geograficzny, 62, 1-2, s. 95-117.
- Babiński Z., 1992, *Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 157.
- Babiński Z., 1997, *Procesy erozyjno-akumulacyjne poniżej stopnia wodnego Włocławek, ich konsekwencje i wpływ na morfodynamikę planowanego Zbiornika Nieszawa*, IGiPZ PAN, Top-Kurier, Toruń.

- Babiński Z., 2002, *Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych*, Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz.
- Babiński Z., Klimek K., 1990, *The present-day channel and flood-plain of the Vistula river*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, Geographical Studies, Special Issue, 5, IGiPZ PAN, s. 62-75.
- Banach M., 1998, *Dynamika brzegów dolnej Wisły*, Dokumentacja Geograficzna, 9.
- Bogucka-Szymalska M., Magnuszewski A., 2007, *Zastosowanie modelu NCCHE2D do oceny warunków sedymentacji w Jeziorze Włocławskim*, Prace i Studia Geograficzne UW, 38, s. 105-116.
- Brandt A.S., 2000, *Classification of geomorphological effects downstream of dams*, Catena, 40, s. 375-401.
- Brice J.C., 1975, *Air Photo Interpretation in the Form and Behaviour of Alluvial River*, Final Report to the US Army Research Office, Durham, North Carolina, USA.
- Brice J.C., Blodgett J.C., 1978, *Counter Measures for Hydraulic Problems at Bridges, 1. Analysis and Assessment*, Report No. FHWA-RD-78-162, Federal Highway Administration, Washington.
- Falkowski E., 1967, *Ewolucja holocenijskiej Wisły na odcinku Zawichost–Solec i inżyniersko-geologiczna prognoza jej dalszego rozwoju*, Biuletyn IG, 198, 4, s. 57-131.
- Falkowski E., 1971, *Historia i prognoza rozwoju układu koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski*, Biuletyn Geologiczny UW, 12.
- Falkowski E., 1980, *Problemy genezy i interpretacji ukształtowania doliny środkowej i dolnej Wisły*, Przegląd Geologiczny, 6, s. 345-347.
- Falkowski E., 1990, *Morphogenetic classification of river valleys developing in formerly glaciated areas for needs of mathematical and practical modelling in hydrotechnical projects*, Geographia Polonica, 58, s. 55-67.
- Florek E., Florek W., Mycielska-Dowgiałło E., 1987, *Morphogenesis of the Vistula valley between Kępa Polska and Plock in the Late Glacial and Holocene*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, Geographical Studies, Special Issue, 4, s. 189-205.
- Florek W., Mycielska-Dowgiałło E., Starkel L., 1990, *Lithology and facies of fluvial deposits*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, Geographical Studies, Special Issue, 5, s. 111-126.
- Gradziński R., Baryła J., Doktor M., Gmur D., Gradziński M., Kędzior A., Paszkowski M., Soja R., Zieliński T., Żurek S., 2003, *Vegetation-controlled modern anastomosing system of the upper Narew River (NE Poland) and its sediments*, Sedimentary Geology, 3-4, s. 253-276.
- Grześ M., 1991, *Zatory i powódzie zatorowe na dolnej Wiśle – mechanizmy i warunki*, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Grześ M., 1999, *Rola zjawisk lodowych w kształtowaniu koryta dolnej Wisły*, Acta UNC, Geografia, 29, UMK Toruń, s. 113-128.
- Habel M., 2013, *Dynamics of Vistula River Channel Deformation Downstream of the Włocławek Reservoir*, Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz.
- Kalicki T., Szmańda J.B., 2009, *Litologia, wiek i geneza maci wiślanych w Kotlinie Sandomierskiej i Kotlinie Toruńskiej*, Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych, 5, Seria Geografia, 88, s. 165-186.
- Miall A.D., 1985, *Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits*, Earth-Science Reviews, 22, s. 261-308.
- Morris G.L., Fan, J., 1997, *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw-Hill, New York.

- Mycielska-Dowgiałło E., Chomski J., 2000, *Evolution of the Vistula valley between Kępa Polska and Płock during the Last Glaciation and Holocene*, [w:] A. Magnuszewski, Z. Mikulski, W.L.F. Brinkman (red.), *Floodplain Pollution Control Management (Vistula River, Poland)*, Deutsches IHP/OHP-Nationalkomitee, Koblenz, s. 11-20.
- Nanson G.C., Knighton A.D., 1996, *Anabranching rivers: their cause, character and classification*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, s. 217-239.
- Niewiarowski W., 1987, *Evolution of the lower Vistula valley in the Unistław Basin and the river gap to the North of Bydgoszcz Fordon*, [w:] L. Starkel (red.) *Evolution of the Vistula river valley during the last 15 000 years*, *Geographical Studies, Special Issue*, 4, s. 234-252.
- Niewiarowski W., 1997, *Morfogeneza Basenu Unistławskiego*, [w:] *Procesy, formy i osady fluwialne na obszarze młodoglacjalnym Niziu Polskiego. Warsztaty Terenowe, Toruń-Słupsk, 18-21 czerwca 1997 r.*, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Toruń, s. 53-57.
- Petts G.E., Gurnell A.M., 2005, *Dams and geomorphology: Research progress and future directions*, *Geomorphology*, 71, s. 27-47.
- Rosgen D.L., 1994, *A classification of natural rivers*, *Catena*, 22, s. 169-199.
- Schumm S.A., 1981, *Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implication*, [w:] Ethridge F.G., Flores R.M. (red.), *Recent and Ancient Nonmarine Depositional Environments: Models for Exploration*, Society of Economic Paleontologist and Mineralogist, Special Publications, 31, s. 19-30.
- Smith D.G., Smith N.D., 1980, *Sedimentation in anastomosed river system: example from alluvial valley Near Banff, Alberta*, *Journal of Sedimentary Petrology*, 50, 1, s. 157-164.
- Starkel L., 2001, *Historia doliny Wisły od ostatniego zlodowacenia do dziś*, *Monografie IGiPZ PAN*, 2, Warszawa.
- Szymańda J.B., Luc M., 2010, *Układ wielokorytowy Dunaju pomiędzy Čunovem a Gabčíkove – analiza przestrzenna na podstawie klasyfikacji rzek według Brice’a*, *Landform Analysis*, 13, s. 129-133.
- Teisseyre A.K., 1991, *Klasyfikacja rzek w świetle analizy systemu fluwialnego i geometrii hydraulicznej*, *Prace Geologiczno-Mineralogiczne*, 22, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Teisseyre A.K., 1992, *Rzeki anastomozujące – procesy i model sedymentacji*, *Przegląd Geologiczny*, 4, s. 241-248.
- Tomczak A., 1982, *The evolution of the Vistula river valley between Toruń and Solec Kujawski during the Late Glacial and Holocene*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, *Geographical Studies, Special Issue*, 1, s. 108-129.
- Tomczak A., 1987, *Evolution of the Vistula valley in the Toruń Basin in the Late Glacial and Holocene*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, *Geographical Studies, Special Issue*, 4, s. 207-232.
- Wang Z., Hu C., 2004, *Interactions between fluvial systems and large scale hydroprojects*, [w:] *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, October 18-21, 2004, Yichang, China*, 1, s. 46-64.
- Wiśniewski E., 1987, *Evolution of the Vistula valley between Warsaw and Płock Basin during the last 15 000 years*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, *Geographical Studies, Special Issue*, 4, s. 171-187.
- Wiśniewski E., 1990, *The lower Vistula valley*, [w:] L. Starkel (red.), *Evolution of the Vistula River Valley during the Last 15 000 Years*, *Geographical Studies, Special Issue*, 5, s. 146-153.

PIOTR J. GIERSZEWSKI, JACEK B. SZMAŃDA, MAŁGORZATA LUC

CHANGES OF VISTULA RIVER CHANNELS PATTERN CAUSED BY
WŁOCŁAWEK DAM FUNCTIONING
BASED ON THE ANALYSIS OF AERIAL PHOTOGRAPHS

In line with the classification after Brice (1975), the system of the contemporary Vistula channel may be identified as a complex anabranching (anastomosing) river system, consisting of the main channel of the braided river type with bars and islands, as well as meandering side channels separated by holms. In turn, following the views of Smith and Smith (1980), this system is in a transition phase from a braided to an anastomosing river system. The phase of transformation to an anastomosing one in the central and lower Vistula braided system could have started at the beginning of the Holocene and continued uninterrupted through to the present day (Starkel, 2001). Currently, the Vistula fluvial system changes in the vicinity of the dam on the Włocławek reservoir and is under the strong influence of the anthropogenic impact the functioning of the dam is able to exert.

To analyze the effects of this transformation, we have studied changes in channel structure using a method proposed by Brice and Blodgett (1978), as modified by Szmańda and Luc (2010). Analyzing aerial photographs, we have measured the widths of channels (w), as well as the lengths (L) and widths of bars (w') and inter-channel forms in the bottom of the valley (islands fixed by vegetation and inter-channel areas called holms). Dimensionless parameters of forms were also calculated: L/w – for length, w'/w – for width, and L/w' for shape. Aerial photographs from the area of the two holms located in the Vistula valley – i.e. the Bógpomóż Holm (below the Reservoir) and the Wykowska Holm (above it) were our research material. These photos come in both cases from two periods, before and after the construction of the dam in Włocławek.

The survey allowed the following conclusions to be drawn: (1) In the research period, the average width of the river channels below the dam has increased slightly, while above the barrier there has been a slight decrease. (2) By numbers of given forms, islands fixed by vegetation are found to be in the majority, whereas holms were more frequent in the floodplain inter-channel area. Irrespective of the type of form, most were elongated. (3) Both above and below the Reservoir, there has been a decrease in the number of (channel and valley) forms. The number of bars in the Vistula channel has decreased. The area of the inter-channel islands colonised by vegetation has increased through evolution in the direction of inter-channel and floodplain areas. As a result of the disappearance of the side arms, inter-channel areas have been absorbed by floodplains. (4) These processes have resulted in the slow preservation of the fixed multiple-channel fluvial system. We suggest calling this system an “anabranching river” as opposed to the classical anastomosing river (Smith and Smith, 1980).



