



Roman CIEŚLIŃSKI, Łukasz PIETRUSZYŃSKI, Filip DUDA
Katedra Hydrologii – Uniwersytet Gdański

ZRÓŻNICOWANIE NATĘŻENIA PRZEPŁYWU W WODACH UKŁADU HYDROGRAFICZNEGO ZACHODNIEJ CZĘŚCI MARTWEJ WISŁY I WISŁY ŚMIAŁEJ

DIFFERENTIATION FLOW IN THE WATERS OF THE HYDROGRAPHIC SYSTEM OF WESTERN PART OF THE MARTWA WIŚLA AND WIŚLA ŚMIAŁA

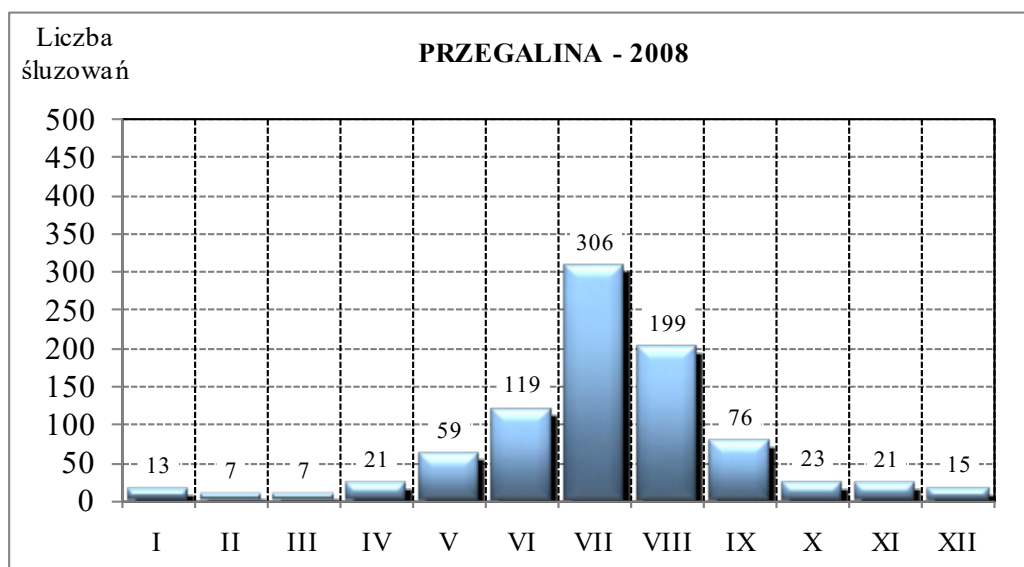
Martwa Wisła jest akwenem o skomplikowanym systemie krążenia wody. Istnieją tu dwa duże cykle obiegu (Jasińska, 1997). Pierwszy z nich prowadzi od ujścia Wisły w Nowym Porcie, poprzez baseny portowe Gdańska, Górki Zachodnie, przełom Wisły pod Górkami Wschodnimi do ujścia. Drugi cykl zaczyna się na Wiśle-Przekopie pod Świbnem i przebiega przez śluzę w Przegalinie, Sobieszewo i przełom Wisły pod Górkami Wschodnimi (rys. 1). Pierwszy cykl jest całkowicie otwarty. Wody mają w nim możliwość swobodnego krążenia w jednym i drugim kierunku. Drugi cykl jest przecięty śluzą w Przegalinie. Śluza ta jest przeważnie zamknięta i jedynie specjalnymi drenami przepływa przez nią w tym czasie znikoma ilość wody. Kiedy poziomy wody po obu jej stronach się wyrównują, wówczas śluza jest otwierana, ale właśnie ze względu na małą różnicę poziomów przepływ jest w tym okresie również minimalny. Brak niestety szczegółowej informacji na temat jakie są to ilości oraz jakiego rzędu jest to przepływ. Jedyna dostępna informacja to ilość śluzowań w ciągu roku. Średnio jest to około 860-900 śluzowań w ciągu roku. Najczęściej odbywa się to w miesiącach letnich (czerwiec, lipiec i sierpień) (rys. 2).

Prądy wody nie mają tu cech prądów rzecznych. Przepływy na Martwej Wiśle charakteryzują się silną zmiennością w czasie, tak, jak i w zakresie kierunków,



Rys. 1. Cykle obiegu wody na Martwej Wiśle

Fig. 1. Cycles of water circulation on the Martwa Wisła



Rys. 2. Liczba śluzowań w Przegalinie w roku 2008

Fig. 2. Number of lockings in Przegalina in 2008

prędkości. Charakteryzują się one rozwarstwieniem w pionie i w całym przekroju poprzecznym koryta. Zmienność prądów w warstwie powierzchniowej Martwej Wisły wynika z lokalnych wiatrów i falowania. Przepływy na Martwej Wiśle cechuje nieustalony charakter, zarówno ze względu na kierunki, jak i prędkości, szczególnie

gdy prędkości są małe, do $0,10 \text{ m s}^{-1}$. Przy małych prędkościach kierunki prądu zmieniają się w zakresie 360° i często są prostopadłe do prawdopodobnego kierunku przepływu (Jasińska, 1991). Maksymalne wartości przepływu na Martwej Wiśle wynoszą $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Jasińska, 1993). Przepływy na Martwej Wiśle charakteryzują się również silną zmiennością w czasie. Ta zmienność prądów jest uzależniona od zmian poziomu wody w ujściach, różnic gęstości wody, lokalnych zmian warunków anemobarycznych i w pewnej tylko części od spływu lądowego wód. Charakterystyczne są przypadki różnych kierunków przepływu w przekroju oraz ich zmiany nawet w trakcie prowadzonych pomiarów.

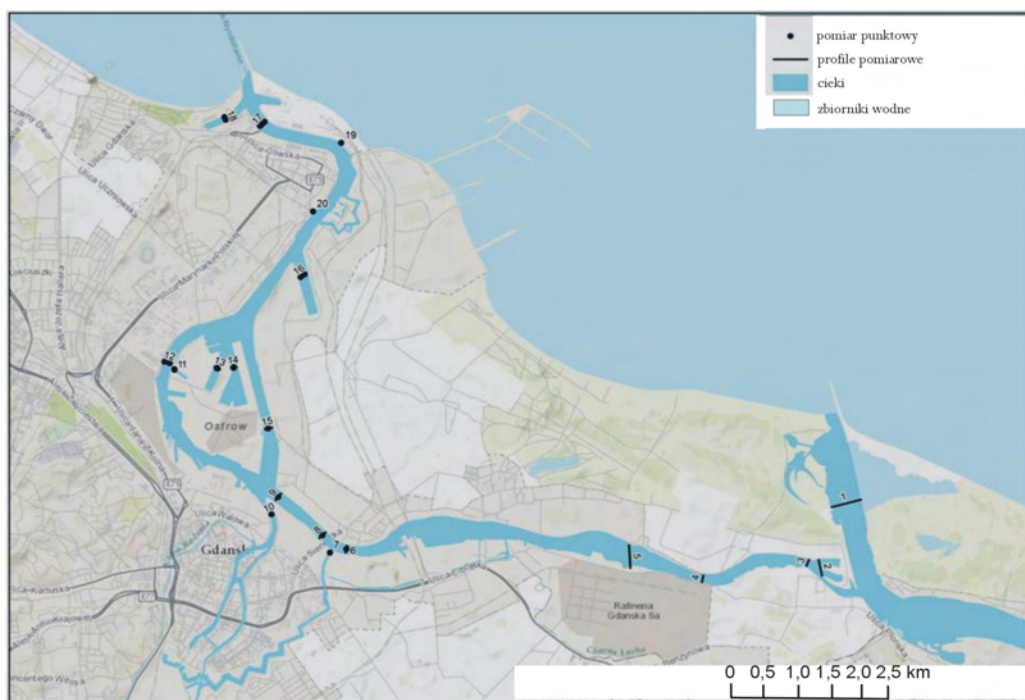
W latach 1889-1895, po wykonaniu sztucznego przekopu Wisły pod Świbnem, nastąpiło odcięcie naturalnych ramion ujściowych Wisły od głównego jej koryta. Od tego czasu cały odcinek Martwej Wisły stanowi nieczynną odnogę niezasilaną wodami Wisły, jeśli pominąć pewną ilość wód przedostającą się podczas śluzowania statków w Przegalinie i wód przeciekających przez wały wiślane. Dopływ wód lądowych występuje głównie, lecz w niezbyt dużych ilościach, z obszaru Żuław Gdańskich, a w szczególności poprzez Motławę zasilaną wodami spływającymi z Wysoczyzny Gdańskiej (Nowak, 1960). Pewne ilości wód dostarczają również kanały odwadniające i przepompownie.

W związku z powyższym celem głównym pracy jest próba określenia wielkości natężenia przepływu na całym zachodnim odcinku Martwej Wisły i Wisły Śmiałej, włącznie z basenami portowymi, oraz określenie głównych uwarunkowań wpływających na uzyskiwane wartości przepływu. Również istotne jest określenie, czy mamy do czynienia z typowym przepływem czy tylko z ruchami wody wynikającymi z falowania wiatrowego. Celem dodatkowym pracy jest ustalenie na podstawie dostępnych materiałów źródłowych zmienności przepływu w czasie oraz w rozkładzie pionowym i poziomym.

Metody badań

Podstawowe prace polegały na badaniach terenowych prowadzonych w okresie pierwszej połowy września 2014 oraz kwerendzie materiałów źródłowych. W trakcie badań terenowych wykonywano pomiary natężenia przepływu. Lokalizację punktów i przekrojów pomiarowych przedstawiono na rys. 3. Dobór punktów pomiarowych podyktowany był chęcią wykonania pomiaru przepływu w miejscach odmiennych hydrologicznie i geograficznie. Dotyczyło to odcinków ujściowych Martwej Wisły i Wisły Śmiałej, basenów portowych, odcinków rzeki, gdzie obserwowany był dopływ potamiczny, a także obszarów naturalnych i przekształconych antropogenicznie.

Pomiaru przepływu dokonano przy użyciu Akustycznego Dopplerowskiego Prądomierza Profilującego (ADCP) River Surveyor firmy Sontek. Metoda ADCP wykorzystywana jest do pomiarów prędkości przepływu, co z równoczesnym pomiarem



Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych i wykonanych transektów na Martwej Wiśle i Wiśle Śmiałej

Fig. 3. Location of measurement points and made transects the Martwa Wisła and Wisła Śmiała

poła przekroju poprzecznego pozwala na obliczenie przepływu. W pomiarach dopplerowskich wynik pomiaru nie jest zależny od toru, po którym porusza się łódź pomiarowa. Metoda ADCP jest metodą wykorzystującą występujące przy propagacji fali dźwiękowej zjawisko Dopplera, polegające na zmianie częstotliwości sygnału odbitego od poruszającego się obiektu. Przyrząd, w którym wykorzystano tę metodę, składa się z głowicy pomiarowej z 5 przetwornikami nadającymi i odbierającymi impulsy fal akustycznych o częstotliwości 1200 kHz oraz komputera, w którym dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu są wykonywane obliczenia i wizualizacja pomiaru.

Pomiar prędkości wody jest realizowany poprzez analizę przesunięcia częstotliwości dźwięku odbitego od zawieszin w roztworze wodnym, przy założeniu, że prędkość takiej cząsteczki odpowiada prędkości strugi w danym momencie. Czujnik urządzenia jest montowany równoległe do płaszczyzny zwierciadła wody i transportowany w poprzek cieku – prostopadle do linii brzegu. Korzystając z czterech nadajników zorientowanych pod kątem 15° od pionu, w ramach emisji jednego pasma fali dźwiękowej, urządzenie dokonuje profilowania głębokości, wyznaczenia „komórek głębokości” w charakterystycznych stożkach. Jednocześnie

jest wykonywany wektorowy opis prędkości w każdej komórce pomiarowej, który odniesiony do prędkości urządzenia względem zlokalizowanego dna ciek, poprzez wielkość kąta daje bezwzględną wartość chwilowej prędkości strugi w poszczególnych komórkach. Prędkość przesuwania czujnika po przekroju pomiarowym umożliwia określenie odległości między kolejnymi stożkami, a tym samym zdefiniowanie „elementarnych komórek” i poszczególnych powierzchni w pionach pomiarowych. Suma iloczynów pól „komórek elementarnych” i przypisanych im prędkości pozwala wyznaczyć wartość przepływu. Ze względu na wykorzystanie nawigacji GPS każdy pion pomiarowy jest zorientowany w układzie współrzędnych, co daje pełną informację o położeniu i kierunku poszczególnych wektorów prędkości w całym przekroju pomiarowym. Utworzenie stożka nakładających się na siebie fal dźwiękowych mieści się w dziesiątych częściach sekundy. Wykorzystana technologia, oprócz do tej pory wyznaczanych prędkości punktowych, umożliwia dokładne zdjęcie przekroju poprzecznego w zakresie rejestracji czujnika. Krótki czas wykonania profilu prędkości w danych pionie pomiarowym pozwala uzyskać o wiele większy zbiór prędkości w całym przekroju pomiarowym. Z poziomu użytkownika istnieje możliwość zdefiniowania wielkości elementarnej komórki pomiarowej poprzez zmianę częstości emisji fal dźwiękowych.

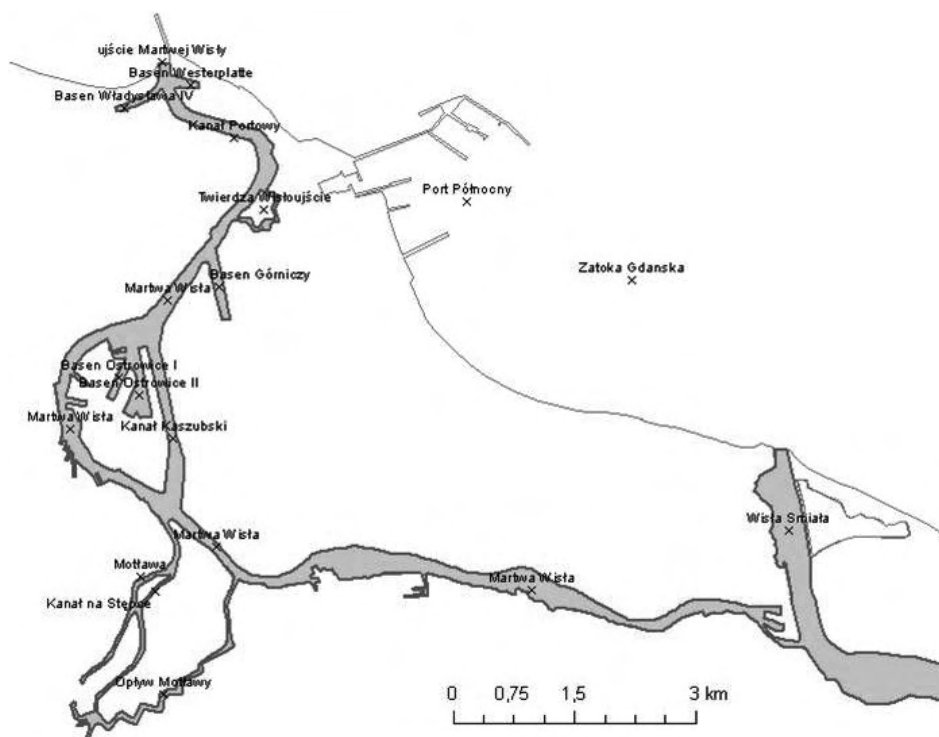
Wartość przepływu w korycie jest obliczana na podstawie całkowitego przepływu zarejestrowanego przez urządzenie oraz estymację obszarów brzegowych, tj. pewnej definiowalnej powierzchni między urządzeniem a brzegami rzeki, oraz w strefach wygaszania fali dźwiękowej przy dnie ciek i w warstwie, w której zanurzony jest czujnik. Estymacja wykonywana jest na funkcji stałej, wykładniczej lub trójstopniowej, wszystkich dostępnych poziomów użytkownika. Dla obszarów ściśle zdefiniowanych istnieje możliwość zastosowania liczbowego współczynnika korygującego przepływ w estymowanym obszarze. Błąd pomiarowy dla tego typu instrumentów nie przekracza 1% (Hejduk, 2008). Współcześnie jest to najdokładniejsza metoda pomiaru natężenia przepływu. Ze względu na wykorzystanie kompasu oraz opcjonalnie nawigacji GPS, każdy pion pomiarowy jest zorientowany w układzie współrzędnych, co daje pełną informację o położeniu i kierunku poszczególnych wektorów prędkości w całym przekroju pomiarowym. Utworzenie stożka nakładających się na siebie fal dźwiękowych mieści się w dziesiątych częściach sekundy, natomiast wykonanie pojedynczego pomiaru w zależności od szerokości ciek zajmuje od kilku do kilkunastu minut. Wykorzystana technologia oprócz do tej pory wyznaczanych wartości prędkości punktowych umożliwia precyzyjne zdjęcie przekroju poprzecznego w zakresie rejestracji czujnika (Wójcik, Wdowikowski, 2015).

Kwerenda materiałów źródłowych dotyczyła instytucji państwowych i prywatnych, m.in. Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Gdyni, Instytutu Morskiego w Gdańsku, Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Gdańsku, Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Gdańskich Melioracji, Wojewódzkiego Zarządu Melioracji i Gospodarki Wodnej w Gdańsku oraz bibliotek

uniwersyteckich. W efekcie zebrano wszelkie możliwe wyniki pomiaru natężenia przepływu na analizowanych obiektach oraz sporządzenie charakterystyki hydrologicznej rzek. W pracy oparto się także na raporcie o oddziaływaniu na środowisko przedsięwzięcia dotyczącego modernizacji wejścia do portu wewnętrznego w Gdańsku wykonanego przez PROEKO (2010) w Gdańsku na zlecenie Urzędu Morskiego w Gdyni. W pracy wykorzystano z raportu dane hydrologiczne i hydrograficzne. Dodatkowo wykorzystano dane z Mapy Hydrograficznej Polski w skali 1:50000 wraz z komentarzami.

Charakterystyka hydrograficzna Martwej Wisły i Wisły Śmiałej

Martwa Wisła (rys. 4) – dolny bieg dawnej Leniwiki, jest położona między ujściem Wisły w Świbnie a Zatoką Gdańską w Nowym Porcie (Mikulski, 1964). Według podziału Polski na mezoregiony fizycznogeograficzne J. Kondrackiego (2000) Martwa Wisła znajduje się na terenie Pobrzeża Półniewobaltyckiego



Rys. 4. Martwa Wisła – część zachodnia wraz z Wisłą Śmiałą

Fig. 4. Martwa Wisła – west part along Wisła Śmiała

i płynie przez Żuławy Wiślane (Żuławy Gdańskie) i Mierzeję Wiślaną. Według *Podziału hydrograficznego Polski* (2005) zlewnia Martwej Wisły sąsiaduje ze strefą Przymorza, zlewniami Wisły, Wierzycy i Wdy oraz na niewielkim odcinku ze zlewiskiem Zalewu Wiślanego.

Stosunki wodne terenów, przez które przepływa Martwa Wisła, są złożone. Wpływ na to wywiera sąsiedztwo Zatoki Gdańskiej, która stanowiąc północno-wschodnią granicę omawianych terenów, tworzy bazę erozyjną dla płynących wód powierzchniowych oraz wpływa na wahania poziomu wód gruntowych na obszarach nisko położonych. Całkowita amplituda wynosi prawie 2,7 m (Szułalski, 1974). Drugim czynnikiem decydującym o kształtowaniu się stosunków hydrograficznych na rozpatrywanym obszarze jest morfologia terenu. Kontrasty krajobrazowe, wynikające z położenia poszczególnych jednostek geomorfologicznych, wpływają nie tylko na wykształcenie i rozkład sieci rzecznej, ale powodują również silne zróźnicowanie w zaleganiu zwierciadła wód gruntowych. Układ sieci rzecznej jest zgodny z konfiguracją powierzchni. Jest ona mało przeobrażona w stosunku do powierzchni pierwotnej, powstałej w wyniku rzeźbotwórczej działalności lądolodu i jego wód (Drwał, Cieśliński, 2007). Trzecim czynnikiem decydującym o stosunkach wodnych badanego terenu, nadającym mu szczególnie silne piętno, jest praca człowieka. Jej morfologicznym efektem są rozległe obszary równiny deltowej Wisły, które przybrały współczesne oblicze krajobrazu kulturowego (Cebulak, 1984). Dominującym elementem hydrograficznym jest tu gęsta sieć kanałów i rowów odwadniających, ograniczona sztucznymi działami wodnymi w postaci wałów zamykających poldery. Takie zmiany regulacyjne, w wyniku których dokonano skrócenia biegu cieków stałych i skierowania ich w sztuczne koryta, wprowadziły wiele nienaturalnych cech w krajobrazie tego terenu (Cebulak, 2010).

Długość całkowita Martwej Wisły wynosi 27 km i ze względu na zróźnicowanie morfometryczne oraz hydrograficzne można podzielić ją na dwie części: wschodnią – od śluzy w Przegalinie do odgałęzienia Wisły Śmiałej oraz zachodnią – od Wisły Śmiałej do ujścia w Nowym Porcie. Część zachodnia między Nowym Portem a ujściem Motławy i dalej do Mostu Siennickiego stanowi obszar portu z licznymi kanałami, basenami, dokami i nabrzeżami (rys. 4). Odcinek od Mostu Siennickiego do ujścia Wisły Śmiałej ma kształt dawnego koryta rzecznej, z częściowo zabudowanymi brzegami wykorzystywanymi dla celów gospodarczych. Odcinek wschodni ma charakter szeroko rozlanego cieku z częściowo zabudowanymi brzegami. Powierzchnia wodna Martwej Wisły wynosi ok. 9 km², a jej objętość przy średnim stanie wody osiąga 0,042 km³. Głębokość średnia cieku wynosi 4,7 m, przy czym głębokości są bardzo zróźnicowane. Koryto zachowało w wielu miejscach cechy dawnego odcinka ujściowego rzeki z przegłębieniami na zakolach. W części zachodniej Martwej Wisły, o szerokości 100-400 m, ze względu na wykorzystanie jej dla celów portowych, głębokości są większe – do 11 m, a brzegi są obudowane. W części wschodniej szerokości wynoszą 200-600 m,

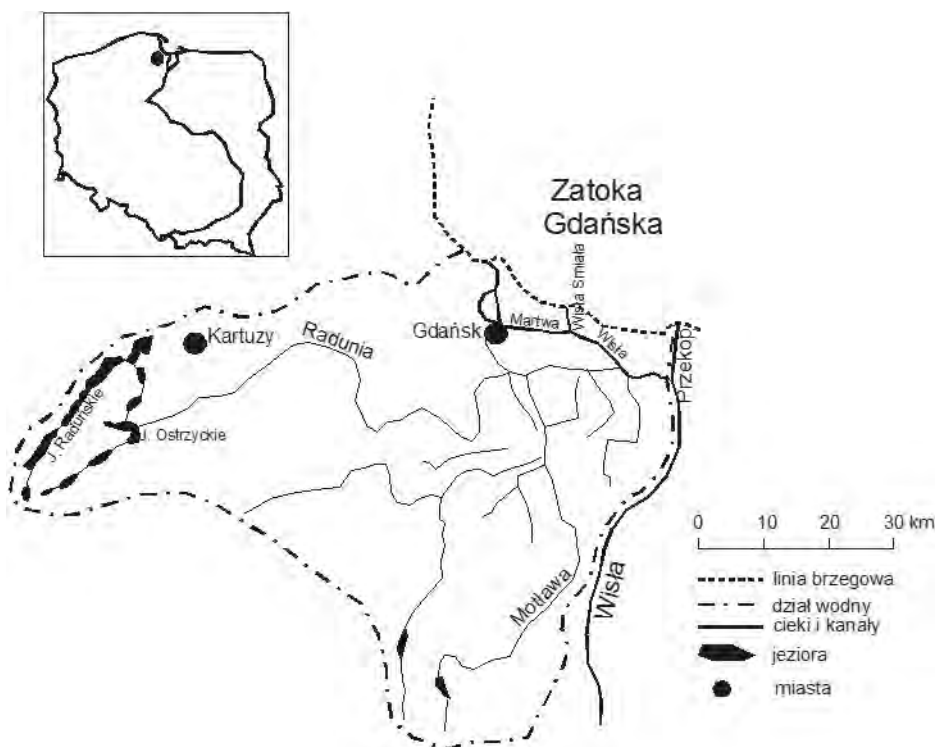
a głębokości są znacznie mniejsze – w miejscach zamulonych 2,5 m. Na odcinku od „Polskiego Haka” do połączenia z Wisłą Śmiałą na długości ok. 8,4 km koryto Martwej Wisły meandruje (PROEKO, 2010).

Wisła Śmiała (rys. 4) przepływa przez przełom, który powstał w roku 1840 w wyniku zatoru lodowego wody Wisły (ramienia nazywanego wtedy Leniwką). Zostały wówczas przerwane wydmy Mierzei Wiślanej koło osady Górki, a wody znalazły ujście w morzu. Nowe ujście rzeki nazwano na mapach niemieckich Przełomem Wisły, a na polskich za Wincentym Polem Wisłą Śmiałą (Mikulski, 1989). Długość cieku wynosi 2500 m (Fac-Beneda, Nowacki, 2013), szerokość zaś waha się od 280 do 500 m. Szacowana powierzchnia koryta wynosi 0,8 km². Głębokość rzeki w torze wodnym wynosi 7,3 m. Wisła Śmiała oddziela Wyspę Portową (na zachodzie) od Wyspy Sobieszewskiej (na wschodzie). Przy wschodnim brzegu znajduje się rezerwat przyrody Ptasi Raj, który jest oddzielony od Wisły Śmiałej kamienną groblą. Na brzegu zachodnim znajdują się Stocznia Wisła i ośrodki żeglarskie w Górkach Zachodnich. Od południa Wisła Śmiała łączy się z Martwą Wisłą, z którą tworzy nierozdzielny układ hydrodynamiczny. Bardzo często są one utożsamiane z typowymi układami estuariowymi (Majewski, 1972; Jasińska, 1991; Jasińska, Massel, 2007). Stosunki hydrologiczne w Wiśle Śmiałej wykazują, że nie jest ona ujściem rzeki. Nie występuje w niej jednolity co do kierunku odpływ wód, charakterystyczny dla rzek. Prądy występujące w jej korycie również nie mają charakteru rzecznego, lecz odznaczają się dużą zmiennością kierunku i rozwarstwieniem w pionie (Majewski, 1977). Z tego powodu przepływy i wymiana jej wód z Zatoką Gdańską wykazuje zmienność kierunku (Majewski, 1990).

Powierzchnia zlewni Martwej Wisły (rys. 5) wynosi 1751,71 km² (*Podział hydrograficzny Polski*, 2005). Jest ona oddzielona od Przekopu Wisły służą w Przegalinie. Lewe przyrzecze Martwej Wisły wraz z Motławą i Radunią wynosi 1376,4 km². Uchodzą tu: Motława z Radunią, Potok Bystrzec (Strzyża), Potok Siedlecki oraz wody licznych kanałów odwadniających Żuławy, m.in. Trójkanały.

System polderowy

Układ polderów mogących bezpośrednio lub pośrednio wpływać na wzrost poziomu wody w Martwej Wiśle i Wiśle Śmiałej jest silnie rozbudowany. Składają się na nie poldery położone nie tylko na Wyspie Sobieszewskiej, ale także wzdłuż całej Martwej Wisły i Motławy oraz systemy rowów i kanałów odprowadzających swoje wody do Martwej Wisły. Wzdłuż Wisły Śmiałej nie znajduje się żaden polder. Wśród obiektów hydrotechnicznych występujących w zlewni Martwej Wisły i Wisły Śmiałej można wymienić pompownię sztormową Grupy Lotos o wydajności 4014 m³·h⁻¹. Wrota sztormowe są zamknięte i tylko otwierają się, gdy poziom Wisły jest taki sam jak Rozwójki lub niższy niż w Rozwójce.



Rys. 5. Zlewnia Martwej Wisły (Cieśliński, 2003)

Fig. 5. Martwa Wisła catchment (Cieśliński, 2003)

Inną ważną grupę obiektów stanowi 5 polderów, na których zlokalizowanych jest 5 pompowni i 1 pompownia przeciwsztormowa – zlokalizowanych na Żuławach Gdańskich. Gospodarkę wodną prowadzi tu Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Gdańsku. Powierzchnia całkowita odwodnienia przez te poldery wynosi 28025 ha. Sumaryczna wydajność interesujących nas pompowni (odprowadzających wody w sposób bezpośredni lub pośredni do układu hydrograficznego Martwa Wisła – Wisła Śmiała) wynosi $22,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pod zarządem Gdańskich Melioracji natomiast znajduje się 20 pompowni zlokalizowanych na terenie całego Gdańska, z czego 7 jest istotnych dla obu rzek, których wydajność wynosi $6,99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Powierzchnia objęta odwodnieniem przez te pompownie wynosi 1713 ha.

Z wykonanych obliczeń wynika, że w przypadku maksymalnych dopływów wód do Martwej Wisły z polderów i pompowni będących pod administracją WZMiUW w Gdańsku uchodzi średnio rocznie ok. 28 mln m^3 , natomiast z terenów zarządzanych przez Gdańskie Melioracje – ok. 18 mln m^3 i Grupę Lotos – ok. 4 mln m^3 . Łącznie daje to ilość 50 mln m^3 wody. Martwa Wisła przy średnim stanie wody ma

objętość na poziomie 420 mln m³ wody. Tak więc całkowity dopływ wody z polderów i pompowni stanowi zaledwie 11,9% objętości Martwej Wisły. Jednocześnie należy zaznaczyć, że dopływ z polderów i pompowni jest rozłożony w czasie i wielkość ta nie zostanie dostarczona w jednej chwili. Podana ilość 50 mln m³ wody dotyczy okresu najbardziej wilgotnego, w latach przeciętnych wartość ta spadnie do około 35 mln m³, a w okresach suchszych do ok. 25 mln m³ wody.

System krążenia wody

Dopływ wód śródlądowych do Martwej Wisły w wieloleciu 1951-1960 oszacował Mikulski (1970). Ogólna objętość wód doprowadzanych z lądu wynosi 0,324 km³ na rok, z czego na półrocze zimowe (XI-IV) przypada 57%, a na letnie (V-X) 43%. Wyższy średni dopływ występuje od października do kwietnia – 11-12 m³ s⁻¹, a niższy w pozostałych miesiącach, z minimum w lipcu 7 m³ s⁻¹. Średni roczny dopływ z lądu jest szacowany na ok. 10 m³ s⁻¹. Dokładne dane zostały przedstawione w tab. 1.

Tabela 1. Dopływ wód śródlądowych w dorzeczu Martwej Wisły w latach 1951-1960 w m³ s⁻¹ (Mikulski, 1970)

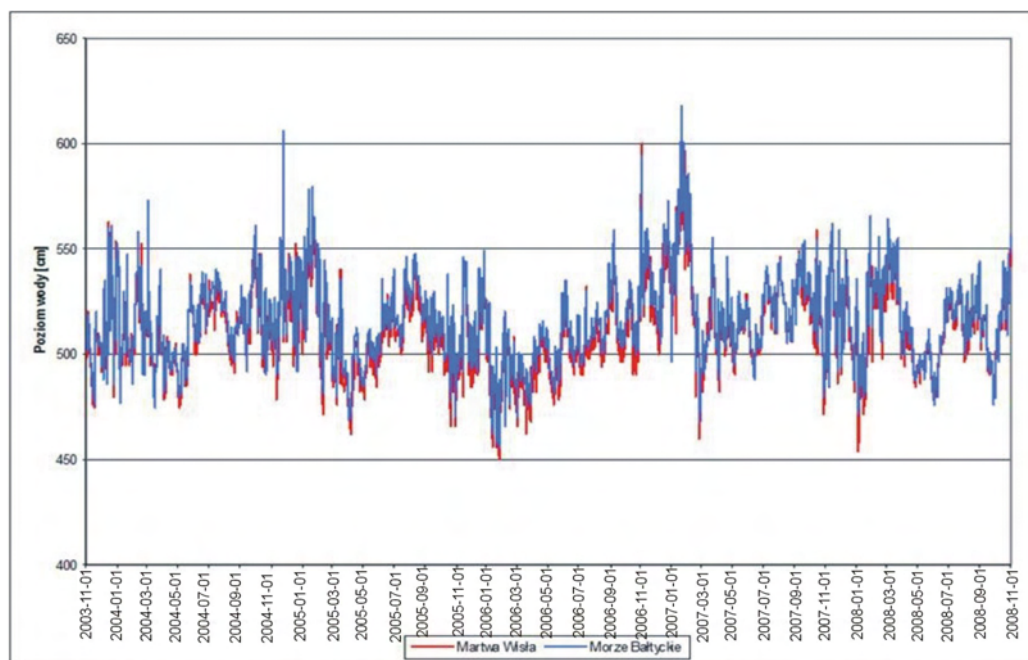
Table 1. Supply of inland water in the basin of the Martwa Wisła in the years 1951-1960 in m³ s⁻¹ (Mikulski, 1970)

Miesiąc	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Dopływ (m ³ /s)	11,3	11,6	11,2	11,6	12,1	11,3	8,5	7,5	7,3	9,0	9,6	10,9
półrocze XI – IV 11,8 m ³ /s, półrocze V – X 8,8 m ³ /s												

Główną rzeką odprowadzającą swoje wody do Martwej Wisły jest Motława. Średni roczny przepływ Motławy jest wyrównany. W latach 2004-2009 kształtował się on w granicach od 4,8 do 7,4 m³ s⁻¹. W okresie tym wystąpiły również przepływy ekstremalne. W 2005 roku maksymalny przepływ, który wyniósł 36,0 m³ s⁻¹ był wywołany roztopami po dużych opadach śniegu 15 III 2005.

Wahania poziomu wody

Martwa Wisła jest pod bezpośrednim wpływem morza od czasu wykorzystania Przekopu Wisły pod Świbnem, kiedy to rzeka przestała pełnić rolę jednego z ramion ujściowych Wisły. Decydującą rolę morza w kształtowaniu się warunków Martwej Wisły potwierdza analiza poziomu wody w morzu i rzece (rys. 6), która wykazuje zgodność wahań.



Rys. 6. Zmiany poziomu wody w Morzu Bałtyckim (posterunek Port Północny) i Martwej Wiśle (posterunek Sobieszewo) w latach 2004-2008 (PROEKO, 2010)

Fig. 6. Changes in the level of water in the Baltic Sea (the North Port station) and the Martwa Wisła (Sobieszewo station) in 2004-2008 (PROEKO, 2010)

Wahania poziomu wody występują na ogół równomiernie na całym odcinku Martwej Wisły zgodnie z rytmem wahań poziomu morza. Pewne deformacje poziomu występują w okresach silniejszych wiatrów z sektora zachodniego. Można zatem stwierdzić, że wiatr jest głównym czynnikiem generującym deniwelacje poziomu morza, które z kolei wpływają na zmiany poziomu wody na Martwej Wiśle.

Charakterystyczny jest sezonowy układ poziomu wody Zatoki Gdańskiej; można wyróżnić tu dwie fazy układu poziomów: obniżony od lutego do czerwca i wyższy od średniego poziomu od lipca do grudnia. Podwyższony poziom wody utrzymuje się dość równomiernie w całym drugim półroczu.

Wymiana wody

Jedną z form oceny wymiany wód jest metoda oparta na obliczeniach zmian objętości wody w okresach spiętrzeń i obniżen ogólnego poziomu wód Martwej Wisły (Majewski, 1977). Biorąc pod uwagę fakt, że poziom wody na Martwej Wiśle zmienia się na ogół równomiernie na całej jej długości i że przeciętne

spadki zwierciadła wody są przeważnie bardzo małe, za podstawę do obliczeń zmian objętości przyjęto stan wody rejestrowany w Sobieszewie. Uzyskane przyrosty stanu wody pomnożono przez odpowiednie współczynniki zmian objętości uzyskane z krzywej objętości Martwej Wisły. Uzyskana w ten sposób suma ogólna napływów w ciągu roku 1974/75 wynosiła 0,190 km³, odpływu 0,467 km³, a więc wypadkowy odpływ do morza wyniósł 0,276 km³ (tab. 2).

Tabela 2. Miesięczne zmiany objętości wód Martwej Wisły (tys. m³) w roku 1974/75 w okresie odpływu do morza (O), napływu wód (N) i zmiany wypadkowe (N-O) (Majewski, 1977)

Table 2. Monthly changes in the volume of water of the Martwa Wisła (thousand m³) from 1974 to 1975 during the outflow to the sea (O), the inflow of water (N) and variable (N-O) (Majewski, 1977)

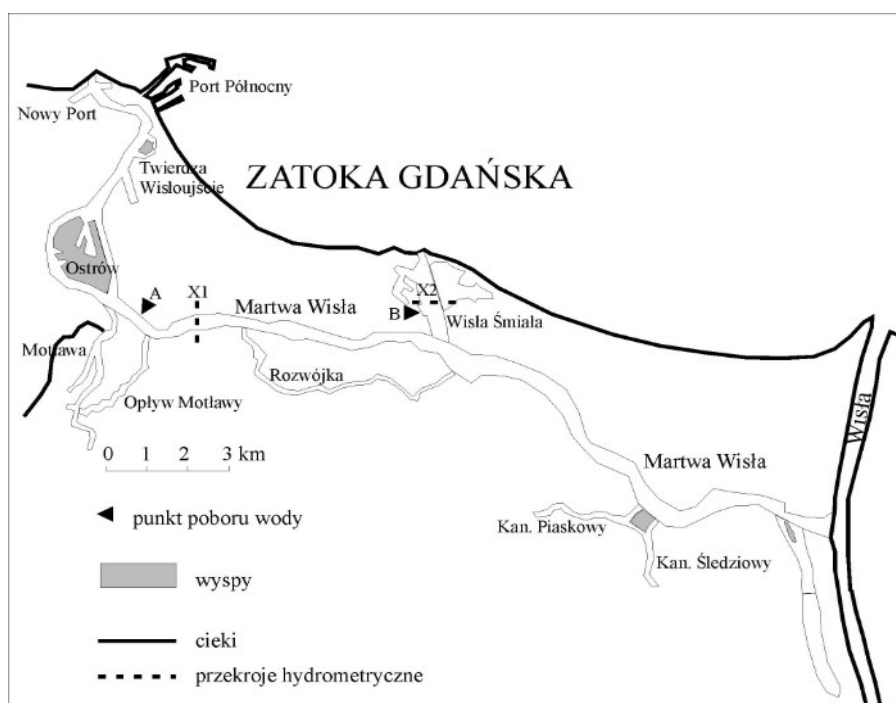
	Rok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N	190317	26121	16791	-	17803	12546	7166	10902	5714	19040	16093	19125	39993
O	466582	63198	45626	27692	47053	32161	12994	31929	25786	42005	41715	44783	52617
N-O	276265	37077	28835	27692	29250	19615	5828	21027	20072	22965	25622	25658	12624

Uzyskane wyniki

Przepływ wody na podstawie materiałów źródłowych

W trakcie badań patrolowych wykonanych przez PROEKO w Gdańsku w maju i na początku czerwca 2010 (5 wyjazdów) w dwóch profilach pomiarowych (rys. 7) zaobserwowano na Martwej Wiśle tylko jedną sytuację, w której w całym korycie woda odpływała do morza (178,0 m³ s⁻¹), a także jedną, w której woda dopływała całym korytem w ramię Martwej Wisły (43,0 m³ s⁻¹). Ponadto udokumentowano zjawisko jednej cofki oraz trzy sytuacje, kiedy przepływ był dwukierunkowy. Przeliczono średni przepływ w tych terminach, który wyniósł 30,0 m³ s⁻¹ (kierunek do rzeki), 90,0 m³ s⁻¹ i 133,0 m³ s⁻¹ (kierunek do morza). W przypadku Wisły Śmiałej również zanotowano sytuację, w której w całym korycie woda odpływała do morza (36,0 m³ s⁻¹) i jedną, w której woda dopływała od strony morza całym korytem Wisły Śmiałej (40,0 m³ s⁻¹). W pozostałych terminach przepływ był dwukierunkowy. Ustalono główny kierunek w tych terminach i obliczono średni przepływ, który wyniósł 22,0 m³ s⁻¹ (kierunek do rzeki), 25,0 m³ s⁻¹ i 33,0 m³ s⁻¹ (kierunek do morza). Ruch wody w ujściu Wisły Śmiałej zależy wyłącznie od intruzji wód morskich oraz wahań poziomu morza.

Rozpatrując kierunki i prędkości prądów, stwierdza się dużą zależność ruchu wód Martwej Wisły od wahań poziomu morza. Prądy te nie mają cech prądów rzecznych. Ruchy wody w korycie Martwej Wisły odznaczają się bardzo dużą zmiennością kierunku w czasie oraz rozwarstwieniem przepływu wód w pionie i w całym przekroju poprzecznym koryta. Ta zmienność prądów zależy głównie



Rys. 7. Lokalizacja przekrojów hydrometrycznych oraz punktów poboru próbek wody na Martwej Wiśle i Wiśle Śmiałej

Fig. 7. Location of hydrometric sections and water sampling points on the Martwa Wisła and Wisła Śmiała

od zmian poziomu wody w ujściach zbiornika do morza, ale również od różnic gęstości wody, lokalnych warunków anemobarycznych i w pewnej tylko części od spływu lądowego wód. Zmienność kierunku prądu jest bardzo duża: tylko w 17% przypadków utrzymywał się przez całą dobę w jednym kierunku, w 40% prądy zmieniały kierunki przepływu z napływu w odpływ i odwrotnie trzy do pięciu razy na dobę, maksymalnie nawet do dziewięciu razy na dobę. Notowano również dłuższe okresy bez prądów (w dwóch dobach). Prędkości prądu są bardzo małe, mniejsze od 2 cm s^{-1} (ponad 50% notowań), a wraz ze słabymi prądami $2\text{-}5 \text{ cm s}^{-1}$ stanowią 80% rejestracji. Udział prądów o prędkości powyżej 10 cm s^{-1} stanowią 2-5% obserwacji. Ten dość chaotyczny obraz prądów pulsujących pod wpływem nieustannych ruchów poziomu morza, maskuje typową cyrkulację estuariową wód, wynikającą z różnic gęstości wody morskiej i wody zbiornika Martwej Wisły, wynikających z kolei z wahań temperatury i zasolenia wody, przy czym wpływ zasolenia na zmiany gęstości jest decydujący (Majewski, 1977).

Główną drogą wymiany wód w Martwej Wiśle jest jej ujście pod Nowym Portem. Określenie wielkości tej wymiany jest jednak bardzo trudne, ponieważ

pomiary wielkości przepływów w rejonie Martwej Wisły są bardzo nieliczne. Pomiary wykonane przez IBW PAN w latach 1996-97 na przekrojach ujściowych wskazują na znaczne zróżnicowanie co do wielkości i kierunku przepływu. Na sześć pomiarów wykonanych roku 1997, w dwóch wystąpił napływ wód do Martwej Wisły, w czterech zaś przypadkach zarówno napływ, jak i odpływ. Według pomiarów z 1996-1997 zarejestrowano odpływy z Martwej Wisły w zakresie $90\text{--}230\text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a napływ w zakresie $30\text{--}55\text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

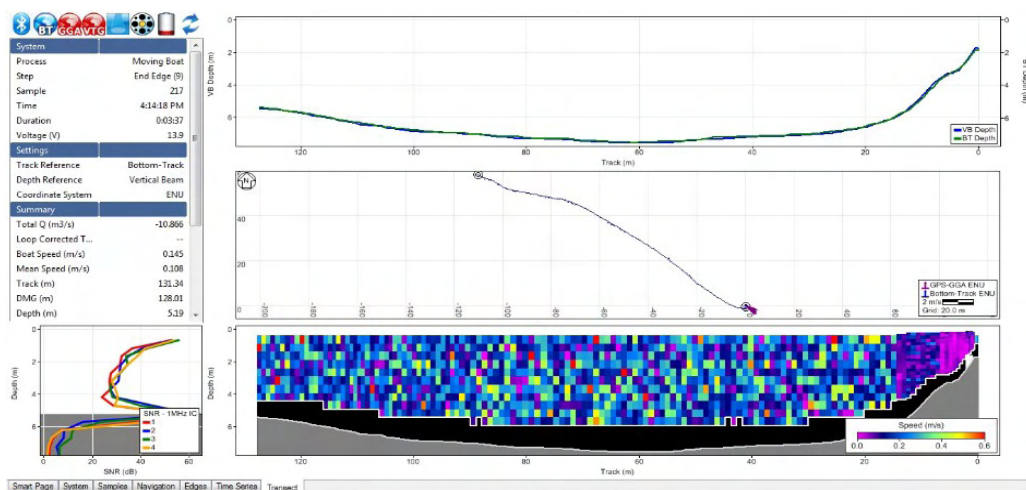
W ujściu Wisły Śmiałej występują wszystkie możliwe kombinacje przepływów, w tym jednoczesny napływ i odpływ. Zanotowano tu odpływy w zakresie $23\text{--}35\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i napływy $17\text{--}55\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (dane uzyskane z IBW PAN w Gdańsku). Dane te świadczą o dużej dynamice mieszania się wód w ujściu rzeki. Ruch wody w ujściu Wisły Śmiałej zależy wyłącznie od wlewów i wypływów wody morskiej, w rytm wahań poziomu morza. Maksymalne prędkości w ujściu Wisły Śmiałej wywołane tymi przepływami są rzędu kilku centymetrów na sekundę. W Wiśle Śmiałej obserwuje się „zassanie” wody z Zatoki do wód tej rzeki jako efekt prądu kompensacyjnego (Kaptur, 1967). Poziom wód w Wiśle Śmiałej jest uzależniony od wahań zwierciadła wody w głównym korycie Wisły i znajduje się jedynie pod wpływem wahań stanu wody w Zatoce Gdańskiej. Różnice poziomu wody między Zatoką Gdańską a Wisłą Śmiałą nie przekraczają na ogół kilku centymetrów.

Przepływy wody na podstawie badań terenowych

Uzyskane wyniki potwierdziły, że przepływy w Martwej Wiśle są mocno zróżnicowane (tab. 3). W okresie pomiarowym wahały się one w zakresie od $9,41\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ w punkcie nr 12 (rys. 8) do $22,03\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ w punkcie nr 17. Na Wiśle Śmiałej natomiast zanotowano wartość przepływu na poziomie $34,41\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 9). Na pozostałych przekrojach zlokalizowanych w basenach portowych przepływy mieściły się w zakresie od $1,96\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, w basenie bez nazwy (punkt nr 11) do $12,67\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, w Basenie Górniczym (rys. 10). W przypadku tych pomiarów uzyskane wartości należy wiązać z ruchami mas wody (falowanie i piętrzenie), a nie klasycznym przepływem. Również duże powierzchnie basenów powodują, że uzyskujemy znaczne wartości przepływu, choć nie związanego z typowym, notowanym we właściwym korycie rzeki. Mogą o tym świadczyć wykonane przekroje poprzeczne i uzyskane prędkości w poszczególnych komórkach pomiarowych. W czasie prac terenowych wykonano również pomiar przepływu na Motławie, gdzie odnotowano wartość $8,12\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ i Oplwywie Motławy, gdzie zmierzono wartość $1,35\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. W przypadku punktów nr 19 i 20 zlokalizowanych na Martwej Wiśle uzyskane wyniki zdecydowanie odbiegały od pozostałych. W tych punktach uzyskano przepływ odpowiednio $0,01\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ i $0,07\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Tak małe wartości należy wiązać z ograniczeniami zabudowy antropogenicznej, przez co nie istnieje tu przepływ, a jedynie następuje wymiana wody wynikająca z falowania i podpiętrzania wiatrowego.

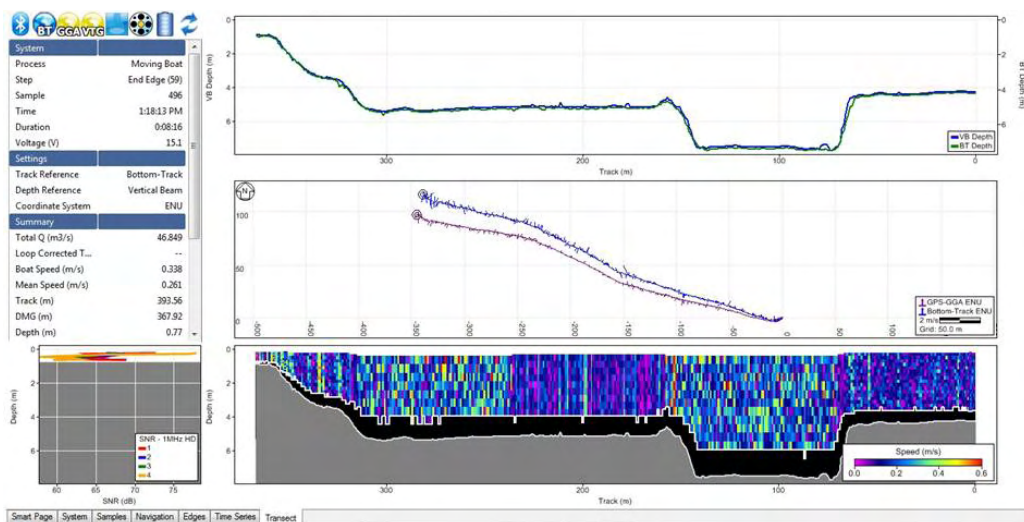
Tabela 3. Wielkości natężenia przepływu w przekrojach pomiarowych na Martwej Wiśle i Wiśle Śmiałej
 Table 3. The size of the flow profile in the measurement sites in Martwa Wisła and Wisła Śmiała

data pomiaru	Nr profilu pomiarowego	Qśr [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	Nazwa obiektu
04.09.2014	1	34,41	Wisła Śmiała
04.09.2014	2	5,08	Basen Południowy
04.09.2014	3	9,75	Martwa Wisła
05.09.2014	4	9,66	Martwa Wisła
05.09.2014	5	11,97	Martwa Wisła
05.09.2014	6	14,27	Martwa Wisła
05.09.2014	7	1,35	Opływ Motławy
05.09.2014	8	8,38	Martwa Wisła
05.09.2014	9	10,98	Martwa Wisła
05.09.2014	10	8,12	Motława
05.09.2014	11	1,96	basen bez nazwy
05.09.2014	12	9,41	Martwa Wisła
05.09.2014	13	2,99	Basen Ostrowica II
05.09.2014	14	7,76	Basen Ostrowica
05.09.2014	15	11,30	Kanał Kaszubski
08.09.2014	16	12,67	Basen Górniczy
08.09.2014	17	22,03	Martwa Wisła
08.09.2014	18	4,59	Basen Władysława IV
08.09.2014	19	0,01	„platforma pod prom”
08.09.2014	20	0,07	„basen promowy”



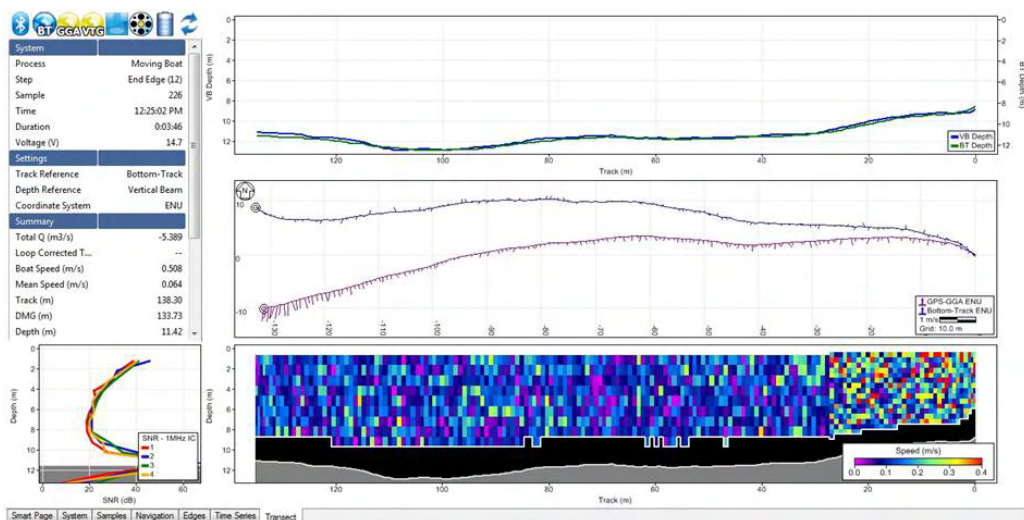
Rys. 8. Przekrój poprzeczny w punkcie nr 12

Fig. 8. Cross section of point No. 12



Rys. 9. Przekrój poprzeczny na Wiśle Śmiałej

Fig. 9. Cross section of Wisła Śmiała



Rys. 10. Przekrój poprzeczny w Basenie Górniczym

Fig. 10. Cross section of Mining Pool

Podsumowanie

Martwa Wisła i Wisła Śmiała to według niektórych autorów estuarium (Majewski, 1972; Jasińska, Massel, 2007). Według nich obserwuje się tam obieg wody typowy dla tego typu obiektów. Według Drwala i Cieślińskiego (2007) natomiast akweny te nie spełniają warunków stawianych definicjom estuariów. Pomimo że efekt oddziaływania morza jest zbliżony do tego w klasycznych estuariach, to proces je wywołujący jest inny. W przypadku Martwej i Śmiałej Wisły oddziaływanie morza jest bowiem wywołane przez regionalne zjawiska hydrometeorologiczne, a nie jak w typowych estuariach z pływami. Pomimo braku jedności w poglądach, czym są Martwa i Śmiała Wisła, jedno jest niezaprzeczalne: warunki hydrologiczne są ściśle powiązane z oddziaływaniem morza. To morze decyduje tu o obiegu wody wewnątrz akwenów, procesach i zjawiskach tam występujących itd. Dynamika oddziaływania morza wynika z kolei z uwarunkowań hydrometeorologicznych, takich jak choćby wiatr czy zmiany poziomu wody. W konsekwencji mamy do czynienia z dwoma akwenami silnie ze sobą powiązanymi hydrologicznie. Zmiany poziomu wody są silnie skorelowane z wahaniami Morza Bałtyckiego, a prądy tam występujące mają charakter prądów „chaotycznych”, związanych z kierunkiem i prędkością wiatru wiejącego w danej chwili. Zdarzają się w obu akwenach prądy dwukierunkowe, tj. w kierunku morza i w głąb lądu. W konsekwencji możemy obserwować bardzo szybkie zmiany warunków hydrologicznych, notowane w obu akwenach. W przeszłości silne piętno wywierała zlewnia i dopływ powierzchniowy z jej obszaru. Współcześnie, po odcięciu Martwej Wisły służą w Przegalinie, oddziaływanie to jest znikome. Tylko nieznaczny dopływ Motławą i kanałami z obszaru delty Wisły powoduje lokalne oddziaływanie na wody tej rzeki. Pomimo że w wielu wypadkach literatura przedmiotu wskazuje (Kaptur, 1967; Majewski, 1977), że nie mamy do czynienia z rzekami (Martwa Wisła, Wisła Śmiała), w których występuje przepływ, a jedynie jest on warunkowany – jak już wcześniej wspomniano – oddziaływaniem morza, należy uznać, że są to rzeki, które taki przepływ mają. Pomimo chwilowych i krótkoterminowych pomiarów natężenia przepływu udało się zaobserwować takie przepływy. Ich wartości, jak na rzekę o znacznych parametrach hydrologicznych (szerokość, głębokość i długość), nie były duże. Można je porównać do przepływów na rzekach o wiele mniejszych, choćby na Kanale Łupawy czy rzece Elbląg, a o wiele niższych niż choćby na Kanale Łeby, gdzie można zanotować średnie przepływy na poziomie $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a nawet w sytuacjach ekstremalnych o wartościach powyżej $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Cieśliński, 2011). Jest to o tyle ciekawe, że Kanał Łeby jest ok. 6-krotnie mniejszy niż Martwa Wisła. Jedną z przyczyn niewielkiego przepływu na wykonywanych obiektach hydrograficznych był okres pomiarowy (lato) i występujące w tym czasie warunki hydrometeorologiczne. Zdecydowanie wyższe wartości, często 7-8-krotnie od tych zanotowanych w trakcie prac terenowych, można odnaleźć w materiałach

źródłowych, co wskazuje na dużą ich zmienność w czasie. W przypadku takich obiektów, jak baseny portowe i sam port, należy uznać, że są tam wody stojące, a mierzalny ruch nie jest wywołany przepływem, lecz ruchem statków, falowaniem, podpiętrzaniem wiatrowym, czy wymuszonym dopływem mas wody.

Materiały wpłynęły do redakcji 15 XII 2016.

Literatura

- Cebulak K., 1984, *Gospodarka polderowa*. [w:] B. Augustowski (red.) *Pobrzeże Pomorskie* GTN – Ossolineum, 229-255.
- Cebulak K., 2010, *Delta Wisły powyżej i poniżej poziomu morza*. Stowarzyszenie Żuławy i Lokalna Grupa Działania Żuławy i Mierzeja, Nowy Dwór Gdański, ss. 59.
- Cieśliński R., 2003, *Charakterystyka hydrologiczna oraz zmienności parametrów fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych w wodach Martwej Wisły*. Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, seria A – Geografia Fizyczna, 54, 27-42.
- Cieśliński R., 2011, *Geograficzne uwarunkowania zmienności hydrochemicznej jezior wybrzeża południowego Bałtyku*. Wyd. UG, Gdańsk, ss. 211.
- Drwal J., Cieśliński R., 2007, *Coastal lakes and marine intrusions on the southern Baltic coast*. Oceanological and Hydrobiological Studies, 36 (2), 61-75.
- Fac-Beneda J., Nowacki J., 2013, *Charakterystyka hydrologiczna Obszaru Natura 2000 „Ujście Wisły” (PLB 220004)*. [w:] *Opracowanie projektów planów ochrony obszarów Natura 2000 w rejonie Zatoki Gdańskiej i Zalewu Wiślanego*, Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego w Gdańsku, praca zrealizowana na zlecenie Urzędu Morskiego w Gdyni w ramach umowy nr 02/IOW/POIŚ/2011 z dnia 15 kwietnia 2011 r.
- Hejduk L., 2008, *Zastosowanie metody ADCP do pomiarów przepływu w małej rzece*. Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 1 (39), 73-79.
- Jasińska E., 1991, *Dynamika wód w estuariach polskich rzek*. Prace IBW PAN, 24, ss. 206.
- Jasińska E., 1993, *Motion of salt water and associated fronts in tidelles estuaries*. Estuaries, 16 (1), 53-67.
- Jasińska E., 1997, *Hydrodynamics and dynamics of salt water in the Martwa Vistula*. Rozprawy hydrotechniczne IBW PAN, 61, 31-41.
- Jasińska E., Massel S.R., 2007, *Water dynamics in estuaries along the Polish Baltic coast*. Oceanological and Hydrobiological Studies, 36 (2), 101-133.
- Kapturek G., 1967, *Stosunki hydrologiczne w ujściowym odcinku Martwej Wisły koło Górek Wschodnich*. Prz. Geof., 12 (20), 3-4.
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, ss. 340.
- Majewski A., 1972, *Charakterystyka hydrologiczna estuariowych wód u polskiego wybrzeża*. Prace PIHM, 105, 3-40.
- Majewski A., 1977, *Charakterystyka hydrologiczna Martwej Wisły*. Prz. Geof., 22 (30), 3-4.
- Majewski A., 1990, *Zatoka Gdańska*. Wyd. Geol., Warszawa, ss. 501.
- Mikulski Z., 1964, *Wiekowe zmiany hydrograficzne w delcie Wisły*. Gaz. Obserw. PIHM, 17 (3), 10-18.
- Mikulski Z., 1970, *Wody śródlądowe w strefie brzegowej południowego Bałtyku*. Prace PIHM, 98, 25-41.
- Mikulski Z., 1989, *Adrian Krzyżanowski i jego zapomniany opis nowego ujścia Wisły z 1840 r.* Prz. Geof., 34 (4), 473-486.
- Nowak B., 1960, *Proces odpływu wód w ujściu Wisły*. Prz. Geof., 5 (13), 3.
- PROEKO Gdańsk, 2010, *Raport o oddziaływaniu na środowisko przedsięwzięcia pn. modernizacja wejścia do portu wewnętrznego w Gdańsku, etap II – przebudowa szlaku wodnego na Martwej Wiśle i Motławie*. Urząd Morski w Gdyni, Gdynia, ss. 391.

- Podział hydrograficzny Polski, 2005, część II – wieloarkuszowa mapa podziału hydrograficznego w skali 1:200000, Wyd. IMGW, Warszawa.
- Szukalski J., 1974, *Środowisko geograficzne Trójmiasta*. Wyd. UG, Gdańsk, ss. 152.
- Wójcik K., Wdowikowski M., 2015, *Współczesne metody instrumentalnego pomiaru prędkości przepływu wody w korytach otwartych*. Technologia Wody, 1 (39), 32-39.

Streszczenie

Celem głównym pracy jest próba określenia wielkości natężenia przepływu na całym zachodnim odcinku Martwej Wisły i Wisły Śmiałej, włącznie z basenami portowymi oraz określenie głównych uwarunkowań wpływających na zróżnicowanie wielkości przepływu. Główne prace polegały na badaniach terenowych, podczas których wykonano pomiary natężenia przepływu przy wykorzystaniu metody ADCP. Wykonano również szczegółową kwerendę materiałów źródłowych. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że warunki hydrologiczne obu rzek są ściśle powiązane z oddziaływaniem morza. To morze decyduje o obiegu wody wewnątrz akwenów, procesach i zjawiskach tam występujących itd. Dynamika oddziaływania morza wynika z kolei z uwarunkowań hydrometeorologicznych, takich jak wiatr czy zmiany poziomu wody. W konsekwencji mamy do czynienia z dwoma akwenami silnie ze sobą powiązanymi hydrologicznie. Prądy tam występujące mają charakter prądów „chaotycznych”, związanych z kierunkiem i prędkością wiatru wiejącego w danej chwili. W obu akwenach zdarzają się prądy dwukierunkowe tj. w kierunku morza i w głąb lądu. Pomierzone przepływy na Martwej Wiśle mieściły się w zakresie od 9,41 do 22,03 m³·s⁻¹, a na Wiśle Śmiałej 34,41 m³·s⁻¹. Z materiałów źródłowych wynika, że na Martwej Wiśle przepływy mogą osiągnąć nawet 178 m³·s⁻¹, a na Wiśle Śmiałej 40 m³·s⁻¹.

Słowa kluczowe: przepływ, układ hydrograficzny, Martwa Wisła i Wisła Śmiała, baseny portowe, obieg wody, falowanie wiatrowe

Summary

The main aim of this study was to determine the size of the flow around the western stretch of the Martwa Wisła and Wisła Śmiała, including swimming pools port and identify the key determinants affecting differences in flow rate. The main work consisted of field work, during which the measurements of the flow rate using the ADCP method. Also made a detailed query source materials. Based on the obtained results it can be stated that the hydrological conditions of both rivers are closely linked with the influence of the sea. It determines the sea water circulation inside waters, processes and phenomena occurring there etc. The dynamics of the impact of the sea in turn caused by hydro-meteorological conditions such as wind or water level changes. Consequently, we have to deal with the two bodies hydrologically closely linked. Streams occurring there are “chaotic” current related to the direction and speed of winds at the time. There are both basins bi-directional currents, ie. in the direction of the sea and inland. The resulting flows of the Martwa Wisła ranged from 9.41 to 22.03 m³·s⁻¹, while on the Wisła Śmiała dared 34.41 m³·s⁻¹. On the basis of source materials, these values can reach up to 178 m³·s⁻¹ on the Martwa Wisła and 40 m³·s⁻¹ on the Wisła Śmiała.

Key words: flow, hydrographic system, Martwa Wisła and Wisła Śmiała, port facilities, water circulation, wind waves

Roman Cieśliński
georc@univ.gda.pl

Łukasz Pietruszyński
pietruszynski@gmail.com

Filip Duda
filduda@gmail.com

Katedra Hydrologii – Uniwersytet Gdański