

Prędkość prądu w ujściowym odcinku Wisły – pomiary *in situ* i modelowanie numeryczne

Dr inż. Grzegorz R. Cerkowniak – Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Dr Aliaksandr Lisimenka, Instytut Morski w Gdańsku

Ujściowy odcinek Wisły stanowi część skomplikowanej hydrograficznie delty, która zaczęła tworzyć się około 7 ÷ 6 tys. lat temu [25]. Jej rozwój był wielokrotnie opisywany w literaturze [np. 12, 16, 17, 23]. Obszar ten pokrywa się z regionem Żuław Wiślanych, a jego powierzchnia wynosi mniej więcej 1700 km² [2]. Około 27% powierzchni delty stanowią obszary depresyjne, a na pozostałym obszarze wysokości bezwzględne terenu nie przekraczają kilku metrów ponad średni poziom morza. W związku z tym głównym problemem w ujściowym odcinku Wisły były od zawsze powodzie. Aby im zapobiec, pod koniec XIX wieku zmieniono bieg Wisły w odcinku ujściowym: wykonano kanał zwany Przekopem Wisły oraz nowe ujście pod Świbnem, zaś połączenia Wisły ze Szkarpawą oraz z Martwą Wisłą odcięto śluzami w późniejszym okresie. Przekop miał z założenia ułatwić swobodny spływ spiętrzonych wód i lodu do Zatoki Gdańskiej, co zapobiegłoby kolejnym katastrofalnym powodziom.

Z chwilą otwarcia w 1895 roku Przekopu Wisły zaczął tworzyć się stożek ujściowy. Jego naturalny rozwój nie gwarantował drożności ujścia. Aby tę drożność utrzymać i zapobiec groźnym w skutkach powodziom zatorowym, krótko po otwarciu Przekopu zapoczątkowano zabiegi regulacyjne w ujściu poprzez wybudowanie, a później stopniowe przedłużanie ujściowych falochronów kierujących [17].

Znaczne zmiany w rejonie ujścia Wisły, które nastąpiły od czasu powstania Przekopu, przykuwały od lat uwagę wielu badaczy, o czym mogą świadczyć fundamentalne prace [12, 13] oraz badania z ostatnich dekad [miedzy innymi 3, 7, 8, 9, 10, 11]. Zebrano na ich podstawie bogaty materiał, stanowiący nieodzowną wiedzę do prowadzenia dalszych badań monitoringowych oraz w celu oceny stanu morfologii dna i brzegów akwenu, a także prognozy jego zmian. Nadal jednak zachodzi konieczność pogłębiania stanu wiedzy o rejonie ujścia Wisły, jako że szereg problemów jest dalej aktualny. Ponadto jest to strefa tranzytowa między środowiskiem morskim i rzeczny, w której procesom fluwialnym towarzyszy silny wpływ morza i wiele zagadnień jest wciąż nierozpoznanych.

Wielkie powodziowe wezbrania wód powodujące kilkakrotny wzrost ilości wody wypływającej przez ujście do Zatoki Gdańskiej stwarzają ekstremalne oddziaływania dynamiczne na dno (zwiększone prędkości wody, naprężenia styczne i natężenie transportu osadów), prowadząc przy tym do znacznych zmian w morfologii dna w całym rejonie ujścia Wisły (kluczowe znaczenie ma morfologia stożka ujściowego Wisły). Natomiast

wezbrania wód morskich mogą powodować cofkę oraz wpływać na ekosystem rzeki. W związku z tym bardzo ważna jest znajomość pola prądów oraz pionowych rozkładów prędkości wody w ujściowym odcinku Wisły. Do pozyskania tej wiedzy niezbędne są pomiary terenowe, ale równie istotny wkład może wnieść modelowanie matematyczne. Niniejsza praca ma na celu przedstawienie wyników przeprowadzonych w ostatnich latach pomiarów terenowych i obliczeń numerycznych prędkości prądów w ujściowym odcinku Wisły poniżej Świbna.

ZASTOSOWANE MATERIAŁY I METODY BADAŃ

W latach 2013-2014 Instytut Morski w Gdańsku przeprowadził kampanię pomiarową w rejonie ujścia Wisły w ramach finansowanego przez NCBiR projektu VISTULA, której efektem było między innymi pozyskanie danych batymetrycznych o bardzo wysokiej rozdzielczości, a także zmierzenie prędkości wody w Wiśle na odcinku od Świbna do jej ujścia do morza. W niniejszej pracy wykorzystano dane batymetryczne obejmujące ujściowy odcinek Wisły od Świbna oraz rejon stożka ujściowego Wisły. Pomiary batymetryczne na Wiśle wykonano w dniach 18-26 października 2013 roku z zastosowaniem echosondy wielowiązkowej MBES Reson SeaBat 7101 240kHz (ang. *MultiBeam EchoSounder*), z pełnym pokryciem badanego obszaru. Echosondaż przeprowadzono wzdłuż profili badawczych równoległych do osi kanału rzecznoego z odstępem 10 m między poszczególnymi profilami. W miejscach z brakiem wystarczającej liczby danych (szczególnie na płytkich obszarach) pomiary uzupełniano wzdłuż dodatkowych profili.

Mierzone wartości czasu propagacji sygnału akustycznego na drodze „przetwornik – dno” skorygowano poprzez wprowadzenie do systemu pionowych profili prędkości dźwięku w wodzie uzyskiwanych z miernika prędkości dźwięku Reson SVP 15, otrzymując w ten sposób dane głębokościowe.

Integrację systemów pomiarowych z nawigacyjnym systemem pozycjonowania RTK-DGPS Trimble SPS851 i systemem kompensacji przechyłów jednostki pomiarowej Ixsea Hydrins zapewniono za pomocą pakietu oprogramowania QINSy 8.0, który umożliwia również synchronizację mierzonych wielkości, uwzględniając przestrzenne rozmieszczenie czujników na jednostce pomiarowej względem przyjętego środka obrotu CoG (ang. *Centrum of Gravity*). W celu zapewnienia precyzyjnego geopozycjonowania, do systemu nawigacyjnego RTK-DGPS

dostarczano, uzyskiwane poprzez łącza internetowe, poprawki pozycji transmitowane z europejskiego systemu stacji referencyjnych EUPOS. W ten sposób zapewniono w czasie rzeczywistym centymetrowe dokładności określenia pozycji. Ponadto uwzględniono aktualny stan wody oraz nachylenie zwierciadła wody, dzięki czemu dane batymetryczne przeliczono na rzędne dna. Na rys. 1 przedstawiono szkic batymetryczny odcinka ujściowego Wisły od Świbna w październiku 2013 roku.

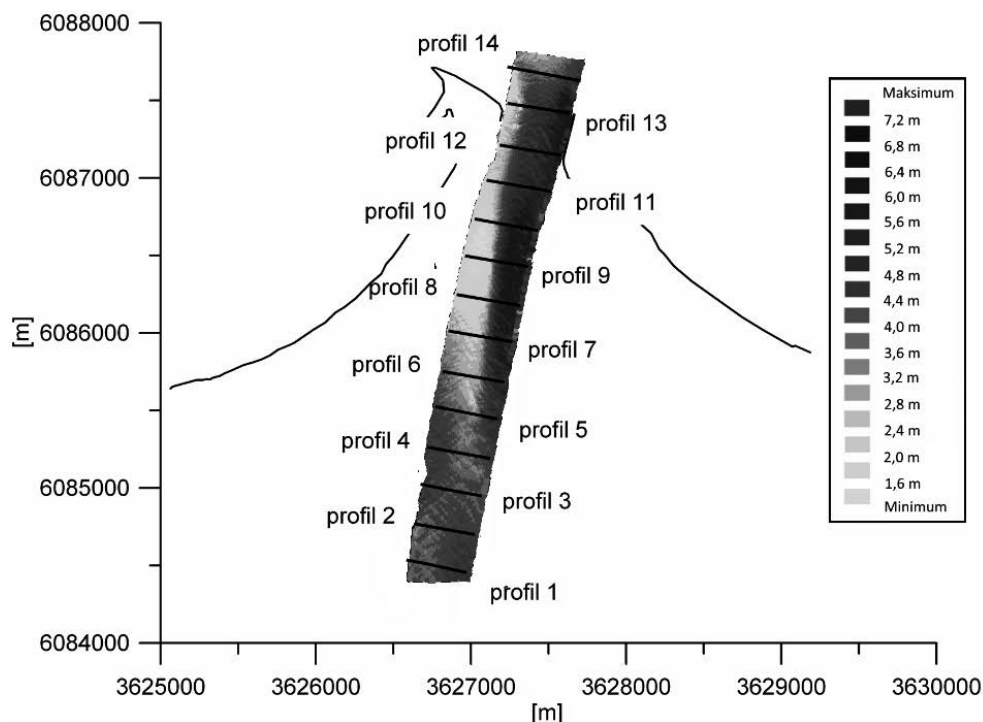
W niniejszej pracy wykorzystano także wyniki wykonanych przez Instytut Morski w Gdańsku w ramach projektu VISTULA pomiarów prędkości wody w Wiśle na odcinku od Świbna do ujścia w dniach 25-26 października 2013 roku. Pomiar przestrzennego rozkładu prądów przeprowadzono z zastosowaniem akustycznego miernika prądów ADCP Rio Grande (ang. *Acoustic Doppler Current Profiler*) o częstotliwości roboczej 1200 kHz. Pomiaru te wykonano wzdłuż 14 profili badawczych prostopadłych do osi kanału rzecznej z odstępem 250 m między poszczególnymi profilami. Lokalizację profili pokazano na rys. 1. Pomiaru przeprowadzono zgodnie z metodyką zalecaną przez U.S. Geological Survey [18, 26] oraz Water Survey of Canada [6]. Wykonano co najmniej po 3 rejestracje na każdym z profili, przy czym łączny czas rejestracji danych na każdym z profili znacznie przekraczał 720 s. Spełnienie warunku, że łączny czas rejestracji danych na profilu jest nie krótszy niż 720 s, zapewnia, że niepewność pomiarów nie przekracza 5% niezależnie od liczby wykonanych rejestracji na profilu, jednak przy minimum dwóch rejestracjach [4, 19, 20].

Ponadto wykorzystano dostępne w zasobach IBW PAN archiwalne dane batymetryczne z Zatoki Gdańskiej w rejonie stożka Wisły oraz pozyskane z firmy GEOMOR (Przedsiębiorstwo Badań i Doradztwa Sp. z o.o.) dane batymetryczne obejmujące dolną Wisłę od Tczewa do jej ujścia do morza. Pomiaru GEOMORu wykonano w maju i czerwcu 2006 roku.

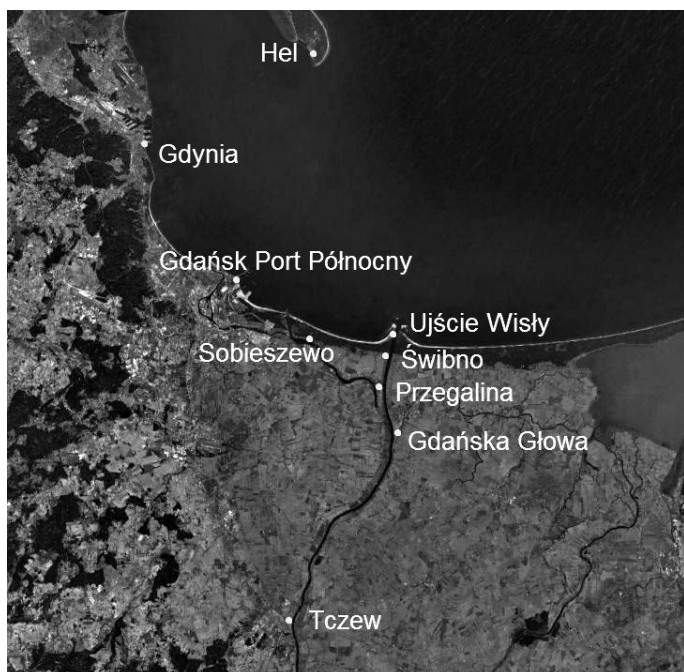
Dodatkowo korzystano z danych pochodzących z serwisu IMGW <http://monitor.pogodynka.pl> obejmujących stany wody na stacjach wodowskazowych w ujściu Wisły (941,5 km biegu rzeki), Świbnie (938,7 km), Przegalinie (936 km), Gdańskiej Głowie (931,2 km), Tczewie (908,6 km) oraz Gdańsku Porcie Północnym i Helu, jak również przepływ wody w Wiśle w przekroju wodowskazowym Tczew. Na rys. 2 pokazano lokalizację stacji wodowskazowych. Dane hydrologiczne są udostępniane przez IMGW z częstością 1-godzinną. Wykorzystane dane obejmowały okres od 17 do 26 października 2013 roku.

Należy zaznaczyć, że informacje o natężeniu przepływu wody na odcinku Wisły objętym zakresem badań są dostępne jedynie dla przekroju wodowskazowego Tczew, znajdującego się w odległości ponad 30 km od ujścia Wisły do morza. Zamyka on 99,92% powierzchni dorzecza Wisły [1], a na odcinku Wisły poniżej Tczewa brak jest istotnych dopływów oraz, co bardzo istotne, odpływów z Wisły [14]. Ponadto w przekroju Tczew warunki hydrologiczne rzeki nie znajdują się pod wpływem warunków hydrodynamicznych ze strony Zatoki Gdańskiej (tzw. „cofek” wód morskich). Tym samym pełni on rolę ostatniej reprezentatywnej stacji pomiarowej i przyjmuje się, że przepływy rzecznej wody w ujściu są równe przepływom wody w Tczewie.

W celu wyznaczenia prędkości prądu w ujściowym odcinku Wisły wykorzystano moduł hydrodynamiczny FLOW w pakiecie obliczeniowym Delft3D. Jest to rozbudowany model hydrodynamiczny, który może być z powodzeniem stosowany zarówno do modelowania hydrodynamiki rzek, jak i środowiska morskiego. Był on wielokrotnie stosowany w IBW PAN, między innymi przy rozwiązywaniu zagadnień morfodynamiki rejonu ujścia Wisły na potrzeby gospodarki [15, 21]. Opis równań, uproszczeń, modeli (np. modeli turbulencji) oraz metod i schematów numerycznych zastosowanych w tym pakiecie obliczeniowym można znaleźć w podręczniku użytkownika [5].



Rys. 1. Szkic batymetryczny odcinka ujściowego Wisły od Świbna w październiku 2013 roku. wraz z zaznaczoną lokalizacją profili badawczych, wzdłuż których wykonano pomiary prędkości prądu wody (współrzędne podane w układzie PUGW 1965)

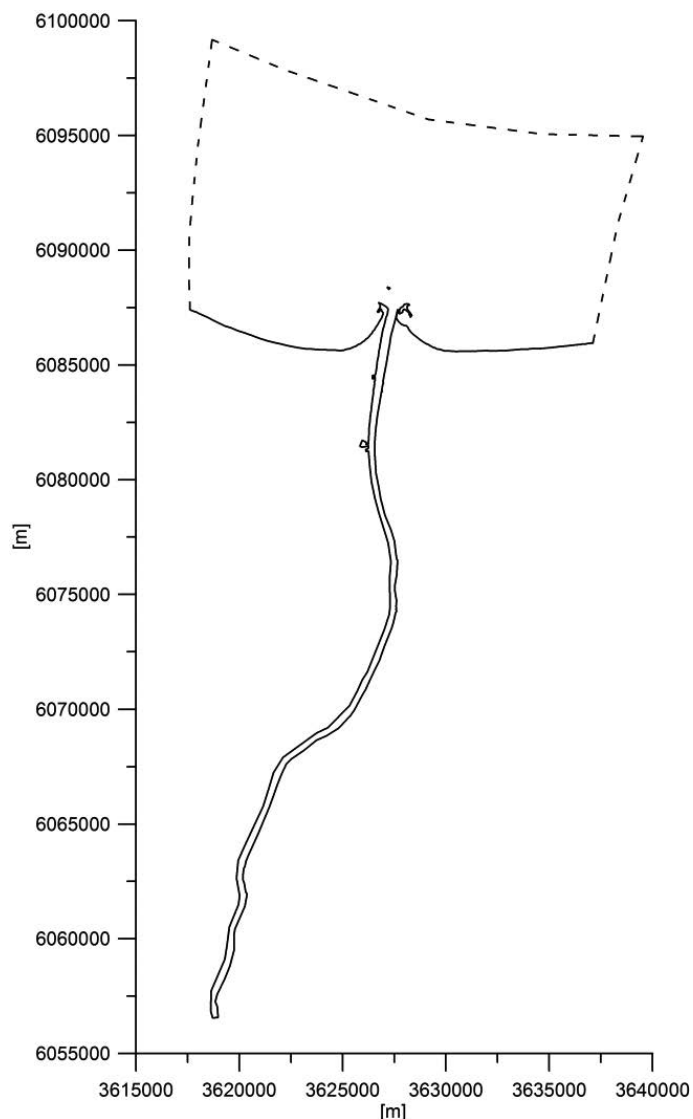


Rys. 2. Lokalizacja stacji wodowskazowych IMGW w rejonie ujścia Wisły (zdjęcie z Google Earth)

MODEL NUMERYCZNY REJONU UJŚCIA WISŁY W PAKIECIE DELFT3D

Obszarem badań w niniejszym opracowaniu jest około 3 km odcinek Wisły od Świbna do ujścia. Jednak ze względu na fakt, że ostatnim posterunkiem wodowskazowym, dla którego wyznacza się przepływy w Wiśle, jest Tczew, rozważany w obliczeniach odcinek Wisły przedłużono do Tczewa. Ponadto obszar ten jest pod wpływem morza i wszelkie wahania jego poziomu przekładają się na poziom wody i procesy hydrodynamiczne w tej części rzeki. Wobec tego w modelu numerycznym uwzględniono otaczający ujście Wisły rejon Zatoki Gdańskiej o wymiarach około 8 km na 17 km. Przyjęte w obliczeniach granice obszaru przedstawiono na rys. 3.

W modułach RGFGRID oraz QUICKIN zawartych w pakiecie numerycznym Delft3D przygotowano horyzontalną siatkę obliczeniową obszaru pokazanego na rys. 3. Jest to siatka krzywoliniowa o wymiarach 96 węzłów (współrzędna M, w przybliżeniu na kierunku W–E) na 323 węzły (współrzędna N, w przybliżeniu na kierunku N–S). Odległości między węzłami są różne zarówno wzdłuż osi M, jak i osi N. Największe zagęszczenie węzłów jest na odcinku Wisły od Świbna do ujścia, gdzie odległości między węzłami zmieniają się w zakresie od około 14 m do około 40 m. (rys. 4). W miarę oddalania się od tego obszaru, odległości między węzłami wzrastają. Na rys. 4 przedstawiono fragment zastosowanej siatki obliczeniowej obejmujący odcinek Wisły od Świbna do ujścia. Wszystkie posiadane dane batymetryczne sprowadzono do jednolitego układu współrzędnych XYZ. Współrzędne horyzontalne przekształcono do układu PUWG 1965 strefa 3, natomiast współrzędne pionowe (głębokości) wyrażono jako rzędną dna w m n. p. m. w układzie wysokości PL-KRON86-NH (układ Kronsztad 86), uwzględniając układ zwierciadła wody w Wiśle w dniu pomiarów (dane

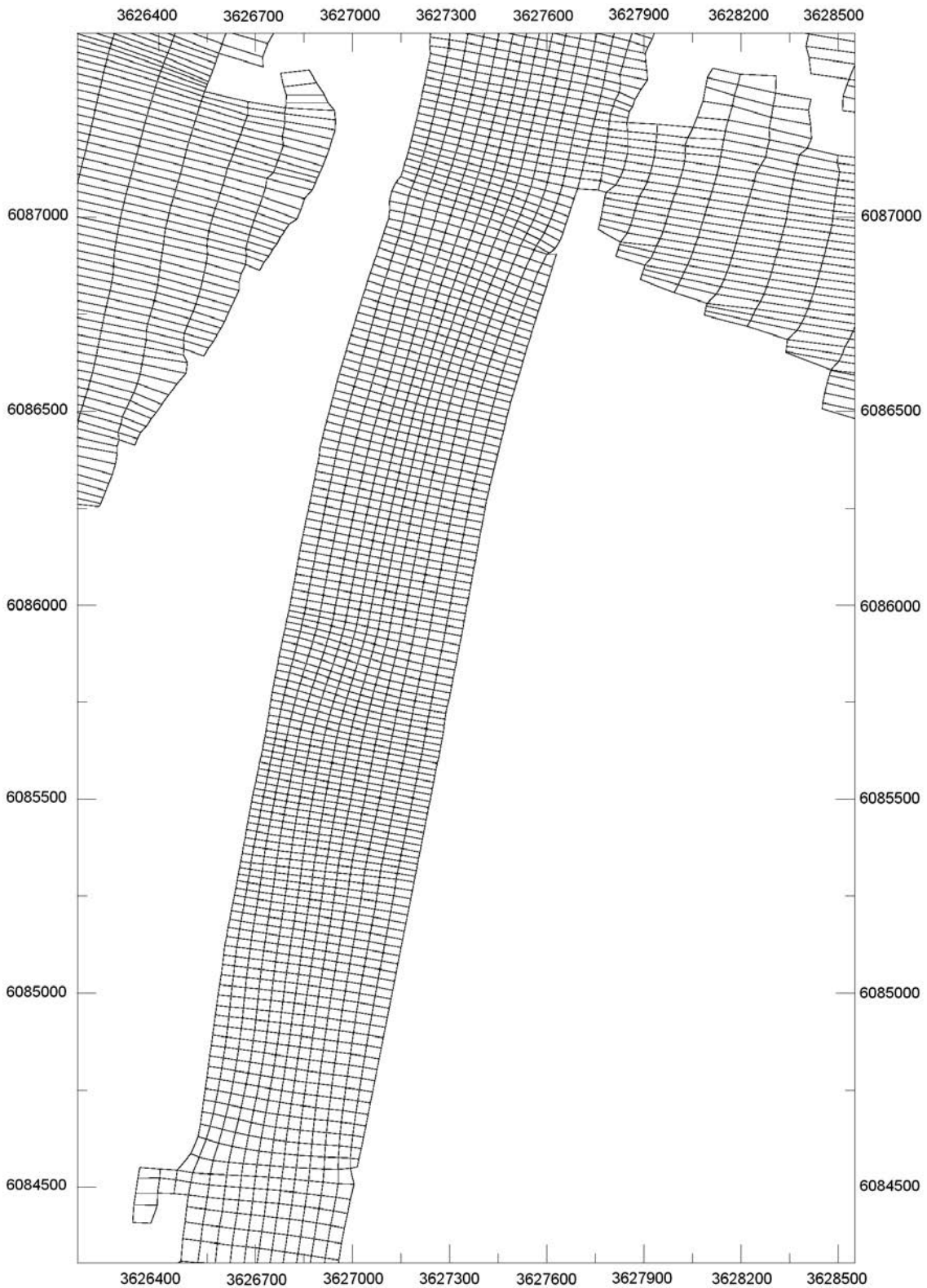


Rys. 3. Obszar modelowany w pakiecie Delft3D; linią przerywaną zaznaczono otwarte granice morskie (współrzędne podane w układzie PUWG 1965)

z GEOMORu). Następnie tak przetworzone dane batymetryczne interpolowano na przygotowaną siatkę numeryczną.

Następnie w module FLOW zdefiniowano pionowy wymiar siatki numerycznej. W pakiecie obliczeniowym Delft3D stosuje się tzw. układ współrzędnych σ , wobec czego pionowe odległości między węzłami siatki w danej warstwie nie są jednakowe na całym obszarze, ale zależą od lokalnej głębokości wody. W modelu kolumnę wody podzielono na 10 warstw o równej miąższości (10% głębokości). W obliczeniach przyjęto krok czasowy równy 1 min, upewniając się, że spełnia on warunek CFL (Couranta-Friedrichsa-Levy'ego) na zastosowanej siatce numerycznej.

Modelowany obszar ma cztery otwarte granice, jedną na Wiśle w Tczewie i trzy w morzu (zob. rys. 3). Warunek brzegowy na granicy na Wiśle zakłada dopływ wody słodkiej (0 PSU) wyrażony całkowitym natężeniem przepływu wody. Przyjęto tu założenie, że pionowy rozkład prędkości prądu rzecznoego ma kształt logarytmiczny. Na wszystkich granicach morskich przyjęto stałe zasolenie równe 7 PSU. Jako warunki brzegowe na granicach



Rys. 4. Fragment zastosowanej siatki obliczeniowej obejmujący odcinek Wisły od Świbna do ujścia

wschodniej i zachodniej przyjęto zerowy wzdłużbrzegowy gradient poziomu wody (warunki typu Neumanna). Na północnej granicy zadano warunek brzegowy poprzez poziom morza wyrażony rzędną powierzchni swobodnej. Granica ta znajduje się wewnątrz Zatoki Gdańskiej w odległości średnio około 8 km od brzegu. Przy ustalaniu warunku brzegowego na tej granicy obszaru założono, że układ zwierciadła wody w Zatoce Gdań-

skiej jest liniowy i obliczono różnicę poziomu wody na stacjach wodowskazowych Hel oraz Gdańsk Port Północny. Ponadto obliczono odległość między tymi stacjami oraz średnią odległość północnej granicy obszaru od brzegu, a następnie procentową wartość, jaką stanowi średnia odległość północnej granicy obszaru od brzegu w odległości między stacjami Hel i Gdańsk Port Północny. Otrzymano, że jest to 35%. Wobec tego jako warunek

brzegowy na północnej granicy obszaru przyjęto poziom wody w Gdańsku Porcie Północnym zmieniony (powiększony lub pomniejszony) o 35% różnicy poziomu wody między stacjami Hel i Gdańsk Port Północny. Jest to bardzo uproszczona aproksymacja, aczkolwiek jest ona szybka i prosta do wykonania, a jednocześnie nie wymaga żadnych dodatkowych danych.

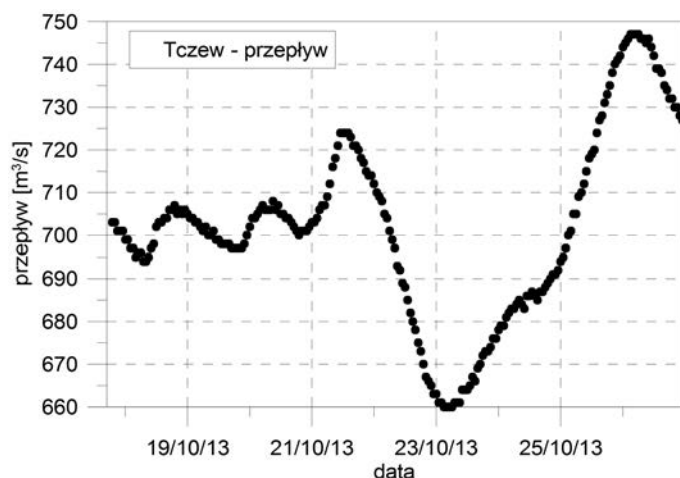
KALIBRACJA MODELU

Kalibracji modelu dokonano na podstawie udostępnianych w serwisie IMGW <http://monitor.pogodynka.pl> codziennych stanów wody na stacjach wodowskazowych w ujściu Wisły, Świbnie, Przegalinie, Gdańskiej Głowie i Tczewie obejmujących okres od 17 do 26 października 2013 roku. Było zatem możliwe porównanie obliczonych w modelu i zmierzonych poziomów wody w stacjach wodowskazowych Tczew, Gdańska Głowa, Przegalina, Świbno oraz Ujście Wisły, a także porównanie obliczonych w modelu i zmierzonych prędkości wody w wybranych profilach badawczych (rys. 1).

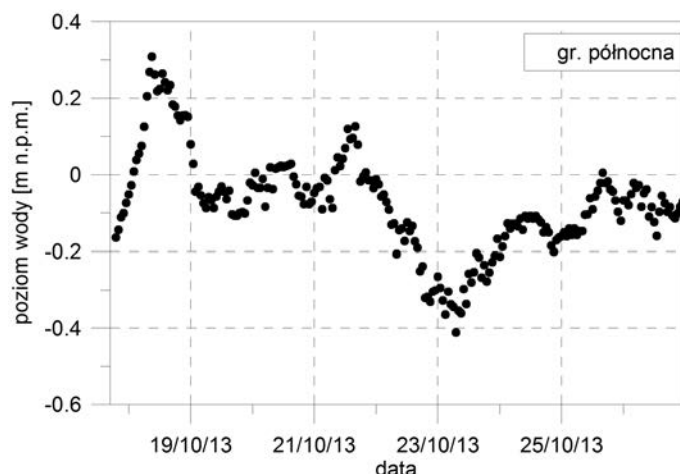
Jako warunek brzegowy na granicy w Tczewie zadano przedstawione na rys. 5 godzinne dane o przepływie wody. Natomiast na granicy północnej zadano szacunkowy poziom wody obliczony w sposób opisany powyżej na podstawie znanych stanów wody w stacjach Hel i Gdańsk Port Północny. Otrzymane w ten sposób wartości przedstawiono na rys. 6. Przyjęto jednolite dla całego obszaru warunki początkowe zakładające ten sam poziom wody jak w warunkach brzegowych oraz zasolenie równe 7 PSU.

Kalibracja modelu polegała na odpowiednim doborze wartości współczynnika szorstkości dna Chezy'ego w taki sposób, aby uzyskać zadowalającą zgodność pomiędzy szeregami czasowymi obliczonych w modelu i udostępnianych przez IMGW poziomów wody w Tczewie, Gdańskiej Głowie, Przegalinie, Świbnie oraz ujściu Wisły. Szorstkość dna jest podstawowym i najważniejszym parametrem kalibracyjnym tego rodzaju modeli. Pozostałe parametry modelu pozostawiono przy wartościach domyślnych. W procesie kalibracji wykonano kilkadziesiąt symulacji, zaczynając od stałych wartości współczynnika Chezy i stopniowo różnicując przestrzennie te wartości. Ostatecznie przyjęto jako najbardziej korzystne wartości współczynnika Chezy równe $24 \text{ m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$ na odcinku Wisły od Tczewa do Kiezmarka, następnie stopniowo rosnące wartości do $85 \text{ m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$ w rejonie Świbna, po czym liniowo malejące wartości do domyślnej wartości równej $65 \text{ m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$ w pobliżu ujścia oraz stałą

wartość $65 \text{ m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$ w morskiej części obszaru. Przyjęte wartości są jakościowo podobne do wartości parametru szorstkości wyznaczonych w pracy [24] w obliczeniach poziomu wody w ujściowym odcinku Wisły przy pomocy jednowymiarowego modelu numerycznego. Autorka pracy [24] również przyjmowała dużą szorstkość dna na odcinku od Tczewa do Gdańskiej Głowy, a następnie mniejsze wartości do Przegaliny i znacznie mniejsze



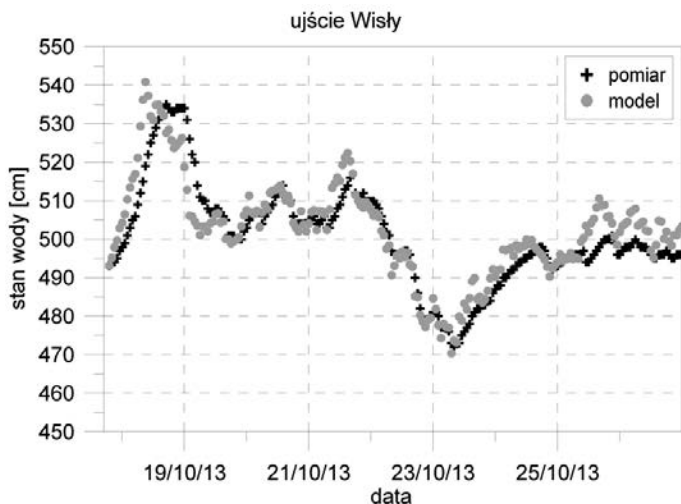
Rys. 5. Przepływ wody przez przekrój wodowskazowy Tczew w okresie od 17 do 26 października 2013 roku
Źródło danych: dane operacyjne IMGW-PIB



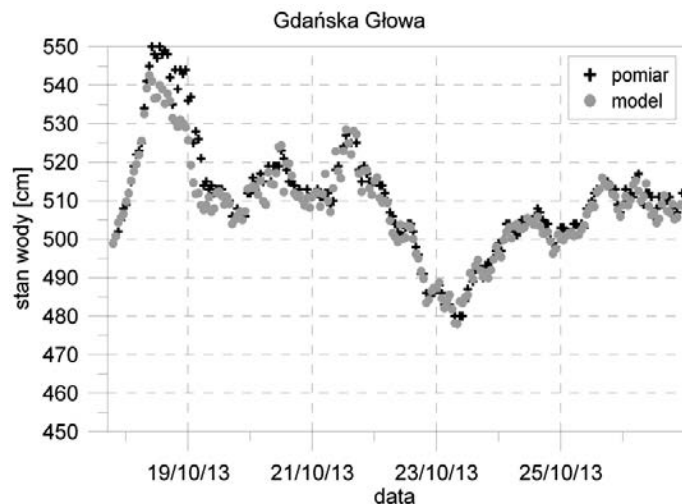
Rys. 6. Poziom wody zadany jako warunek brzegowy na północnej granicy obszaru w okresie od 17 do 26 października 2013 roku (wyrażony w układzie wysokościowym PL-KRON86-NH)

Tabl. 1 Wartości parametrów opisujących błąd modelu względem wartości rzeczywistej w poszczególnych stacjach wodowskazowych

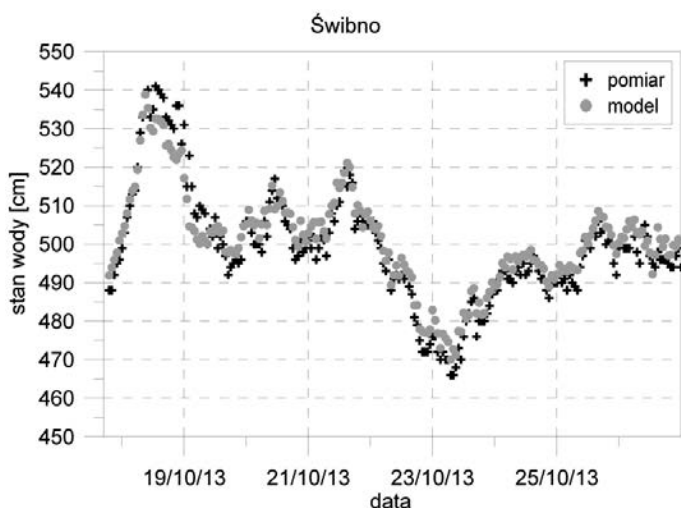
Parametr	Ujście Wisły	Świbno	Przegalina	Gdańska Głowa	Tczew
Średni błąd [cm]	1,75	1,75	-0,13	-1,89	0,98
Średni błąd bezwzględny [cm]	4,49	3,63	2,91	2,65	2,20
Odchylenie standardowe błędów [cm]	5,81	4,08	4,39	3,74	2,38
Pierwiastek błędu średniokwadratowego [cm]	6,07	4,44	4,39	4,19	2,58
Stosunek średniego błędu bezwzględnego do rozstępu [%]	7,13	4,84	3,73	3,68	8,80
Współczynnik korelacji	0,90	0,97	0,96	0,97	0,98



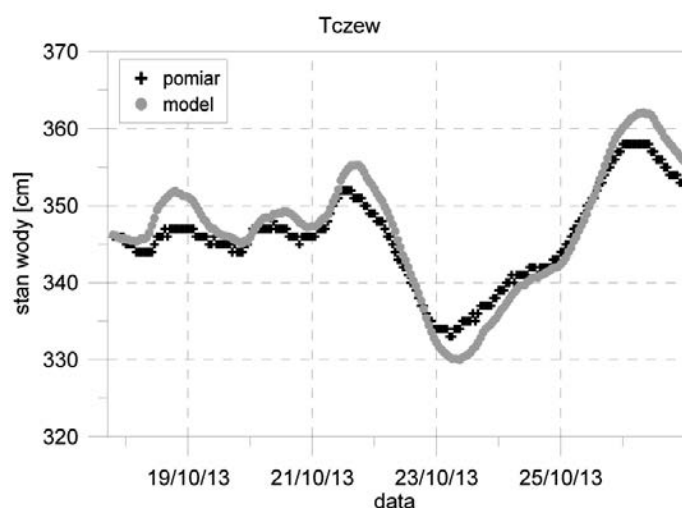
Rys. 7. Stan wody zmierzony (kolor czarny) oraz obliczony modelem (kolor szary) w stacji wodowskazowej Ujście Wisły w okresie od 17 do 26 października 2013 roku



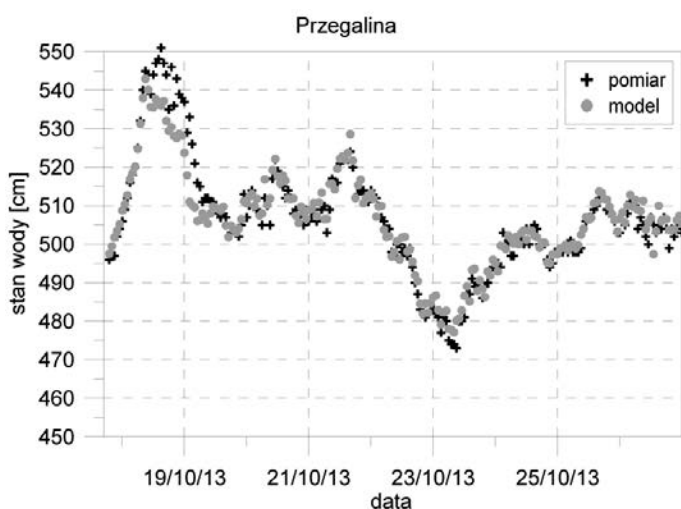
Rys. 10. Stan wody zmierzony (kolor czarny) oraz obliczony modelem (kolor szary) w stacji wodowskazowej w Gdańskiej Głowie w okresie od 17 do 26 października 2013 roku



Rys. 8. Stan wody zmierzony (kolor czarny) oraz obliczony modelem (kolor szary) w stacji wodowskazowej w Świbnie w okresie od 17 do 26 października 2013 roku



Rys. 11. Stan wody zmierzony (kolor czarny) oraz obliczony modelem (kolor szary) w stacji wodowskazowej w Tczewie w okresie od 17 do 26 października 2013 roku



Rys. 9. Stan wody zmierzony (kolor czarny) oraz obliczony modelem (kolor szary) w stacji wodowskazowej w Przegalinie w okresie od 17 do 26 października 2013 roku

wartości na odcinku do Świbna, po czym znów większe wartości parametru szorstkości do ujścia Wisły. W pracy [24] zastosowano współczynniki szorstkości Manninga. Co prawda w pakiecie numerycznym Delft3D można także stosować współczynniki szorstkości Manninga, ale część wartości przyjętych w pracy [24] jest poza dopuszczalnym zakresem ($0,04 \text{ s}\cdot\text{m}^{1/3}$) w tym pakiecie. Na rys. 7 ÷ 11 przedstawiono stany wody obliczone w modelu oraz zmierzone na stacjach w Tczewie, Gdańskiej Głowie, Przegalinie, Świbnie oraz ujściu Wisły.

Na podstawie rys. 7 ÷ 11 można stwierdzić, że model oddaje poprawnie jakościowo rzeczywistą zmienność poziomów wody. Aby ocenić także poprawność ilościową obliczono wartości kilku parametrów opisujących błąd modelu względem wartości rzeczywistej w poszczególnych stacjach. Przedstawiono je w tabl. 1. Nie obliczono błędów względnych, gdyż w przypadku stanów wody poziom odniesienia, czyli zero wodowskazu, jest ustalony arbitralnie. Wobec tego, obliczenia błędów względnych w standardowy sposób są bezużyteczne. Jednocześnie wy-

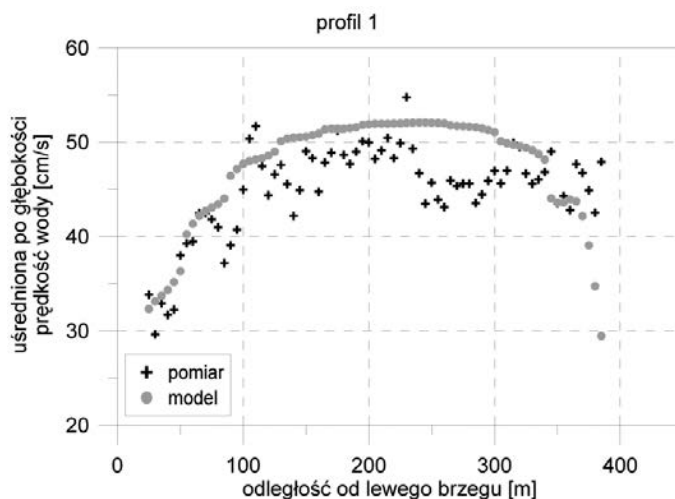
daje się, że w przypadku stanów wody (lub poziomów wody) dość dobrą próbą oszacowania błędu względnych wyników modelu mógłby być stosunek średniego błędu bezwzględnego do rozstępu wartości rzeczywistych. W ten sposób nie występuje problem dowolności przyjętego poziomu odniesienia (poziom morza, zero wodowskazu). Otrzymuje się za to procentową informację o relacji błędów modelu do zakresu zmienności poziomów wody. Nie jest to miara doskonała, ale daje dość dobre wyobrażenie o wartościach wyników modelu.

Przedstawione w tabl. 1 wartości wskazują, że przy przyjętych wartościach współczynnika szorstkości dna model nieznacznie przeszacowuje poziom wody na stacjach w Tezewie, Świbnie i ujściu Wisły oraz nie doszacowuje na stacji w Gdańskiej Głowie. Według różnych miar wyniki modelu odchylają się średnio od wartości rzeczywistych o około $2,2 \div 4,5$ cm, $2,4 \div 5,8$ cm oraz $2,6 \div 6,1$ cm. Błędy o takiej wielkości można uznać za dopuszczalne, zwłaszcza dlatego, że stanowią one mniej niż 10% rzeczywistego zakresu zmienności poziomów wody. Wielkość błędu wzrasta w dół rzeki, osiągając niemal w każdym przypadku największą wartość w ujściu Wisły. Ponadto występuje bardzo dobra korelacja między wynikami modelu a rzeczywistymi zarejestrowanymi poziomami wody w ujściowym odcinku Wisły. Wobec tego stwierdzono, że przy takich wartościach parametrów modelu jest on skalibrowany w zadowalającym stopniu.

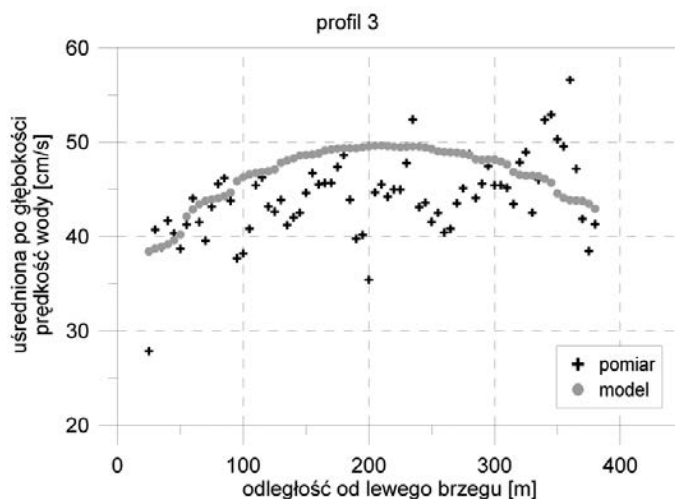
PORÓWNANIE OBLICZONYCH I POMIARZONYCH PRĘDKOŚCI WODY

Głębokości w ujściowym odcinku Wisły są bardzo zróżnicowane. Zmieniają się w czasie i przestrzeni, zarówno wzdłuż jak i w poprzek koryta [3]. Rejestracja dna ujściowego odcinka Wisły systemem echosondy wielowiązkowej jesienią 2013 roku zapewniła uzyskanie cyfrowego modelu terenu wysokiej rozdzielczości ($0,1 \times 0,1$ m). W rzeźbie dna wyróżniono formy łach piaszczystych oraz zagłębień. Jak pokazano na rys. 1 w pobliżu Świbna występuje łacha poprzeczna złożona z licznych dużych wydm piaszczystych z drobniejszymi formami (*megaripplemarki* i *ripplemarki*) na powierzchni tych wydm. W centralnej części analizowanego odcinka Wisły w odległości około 1000 ÷ 2500 m poniżej Świbna, po zachodniej stronie koryta, występuje łacha boczna. W jej obrębie obserwowane są najmniejsze głębokości sięgające do 1,4 m. Na całej łasze są duże, dobrze wykształcone podwodne wydmy piaszczyste z nałożonymi drobniejszymi formami dennymi na ich powierzchni. Łacha boczna opada stromym stokiem zaprawdowym, położonym wzdłuż osi koryta, w rynnę o głębokości przekraczającej 6 m, znajdującą się po wschodniej stronie koryta. Świadczy to o koncentracji nurtu rzeki wzdłuż brzegu wschodniego. Na dnie rynnę występują duże wydmy piaszczyste o znacznych rozstępach między grzbietami (do około 40 m) przy relatywnie małej stromości ($\Delta/\lambda = 0,01$). Bezpośrednio w ujściu rzeki występuje ponownie łacha poprzeczna (z głębokościami dochodzącymi do 3 m), wypływająca koryto i przechodząca w stożek napływowy na przedpolu ujścia Wisły.

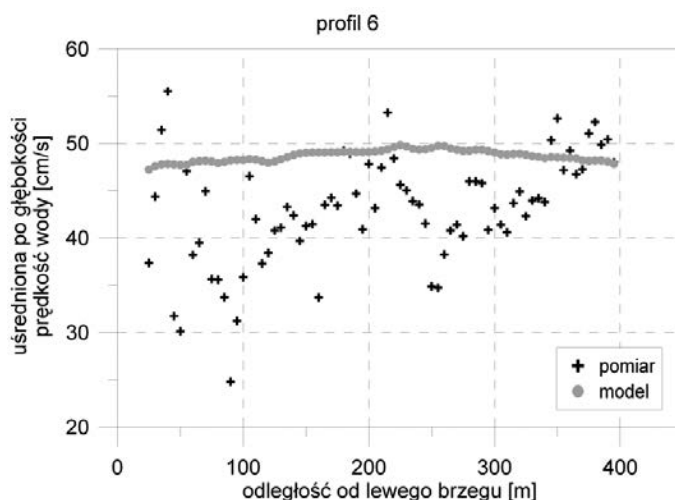
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów otrzymano rozkład przestrzenny prądów na poszczególnych przekrojach poprzecznych kanału ujściowego Wisły. Analizę danych po-



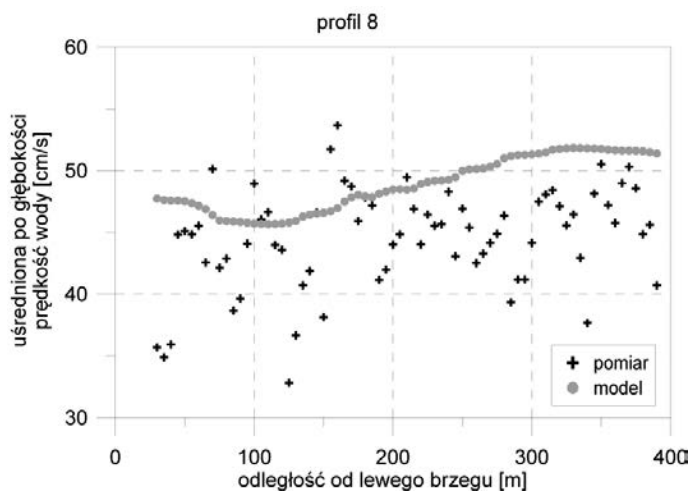
Rys. 12. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 1 w dniu 25 października 2013 roku



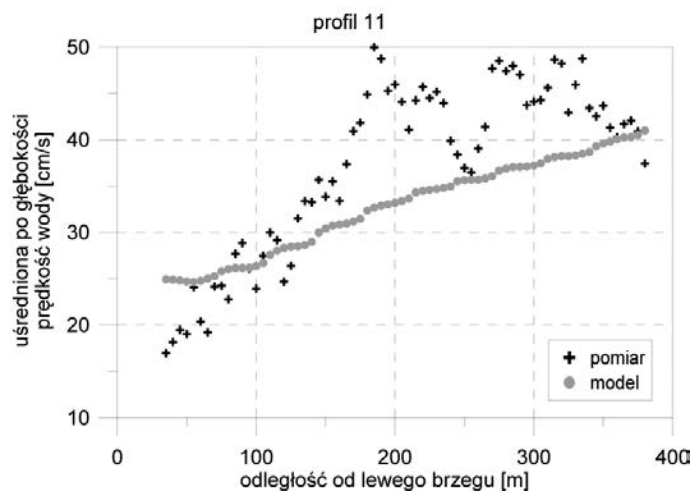
Rys. 13. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 3 w dniu 25 października 2013 roku



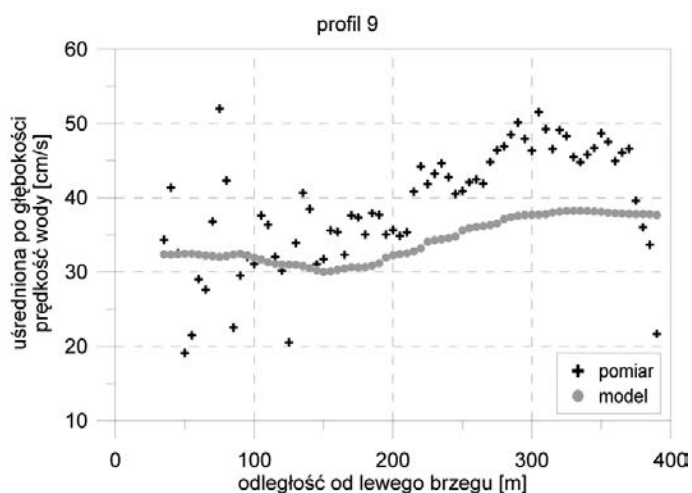
Rys. 14. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 6 w dniu 26 października 2013 roku



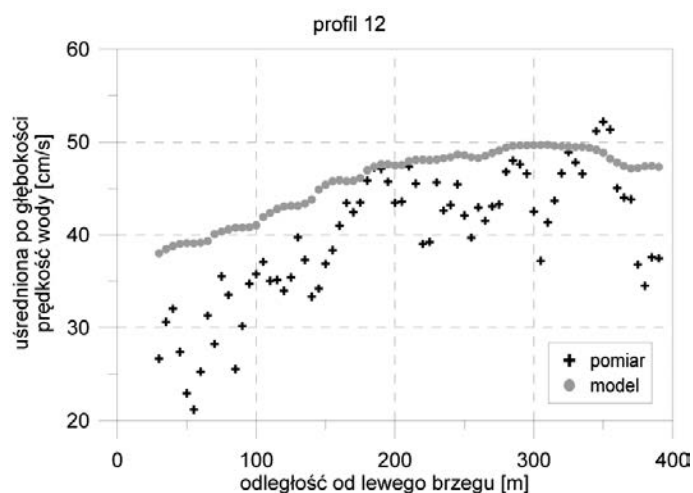
Rys. 15. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 8 w dniu 26 października 2013 roku



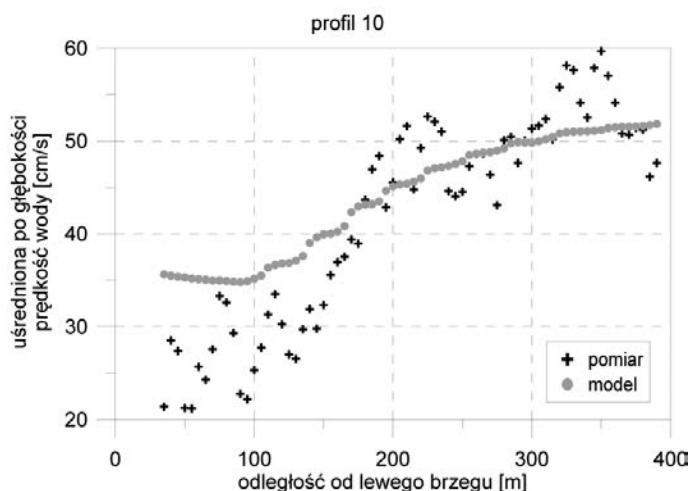
Rys. 18. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 11 w dniu 25 października 2013 roku



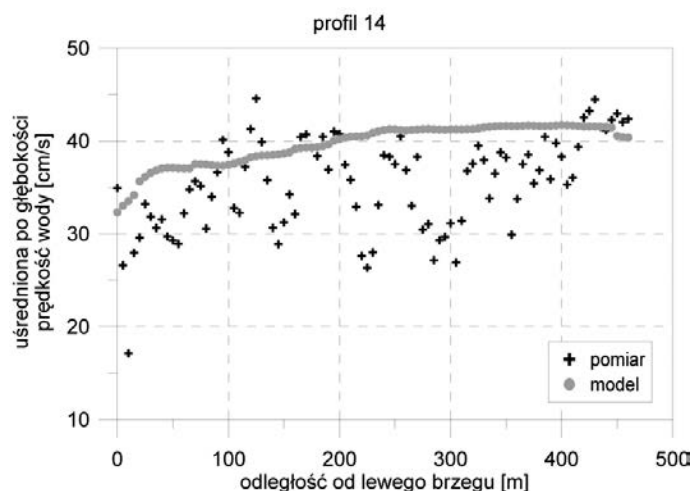
Rys. 16. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 9 w dniu 25 października 2013 roku



Rys. 19. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 12 w dniu 26 października 2013 roku



Rys. 17. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 10 w dniu 26 października 2013 roku



Rys. 20. Uśredniona po głębokości wartość prędkości wody zmierzona prądomierzem ADCP (kolor czarny) oraz obliczona modelem (kolor szary) w profilu 14 w dniu 26 października 2013 roku

miarowych wykonano w środowisku MATLAB z wykorzystaniem biblioteki funkcji Velocity Mapping Toolbox stworzonej przez [22]. Dane zebrane z wszystkich rejestracji danego profilu uśredniono po głębokości oraz w 5-metrowych odcinkach wzdłuż profilu. Zaobserwowano zmienne wartości prędkości prądu w poprzek i wzdłuż koryta rzecznego (rys. 12 ÷ 20). Ze względu na specyficzne warunki hydrodynamiczne spływu wody widoczna jest wyraźna dwudzielność koryta rzecznego. Na obszarze początkowego odcinka o długości około 1,5 km poniżej Świbna uśrednione po głębokości pole prędkości prądu charakteryzuje się mniejszym zróżnicowaniem amplitud. Natomiast w dolnym odcinku wariacja średniej prędkości prądu zwiększa się, w szczególności w obrębie odsypu bocznego zlokalizowanego wzdłuż zachodniego brzegu rzeki, gdzie obserwowane są minimalne wartości średniej prędkości wody nieznacznie przekraczające 10 cm/s. Z kolei w głównym nurcie rzeki, zlokalizowanym po wschodniej stronie kanału ujściowego, odnotowano maksymalne wartości średniej prędkości prądu osiągające 60 cm/s przy średnim przepływie wody $Q = 735 \text{ m}^3/\text{s}$. Powyższa dwudzielność ujściowego odcinka koryta Wisły znajduje swoje odzwierciedlenie w morfologii dna, która jest o wiele bardziej zróżnicowana w dolnym niż w górnym odcinku.

Na profilach pomiarowych 1 ÷ 14 (rys. 1) wyznaczono uśrednione po głębokości prędkości wody obliczone w modelu w celu zestawienia ich ze zmierzonymi prędkościami. Wyniki dla kilku wybranych profili przedstawiono na rys. 12 ÷ 20.

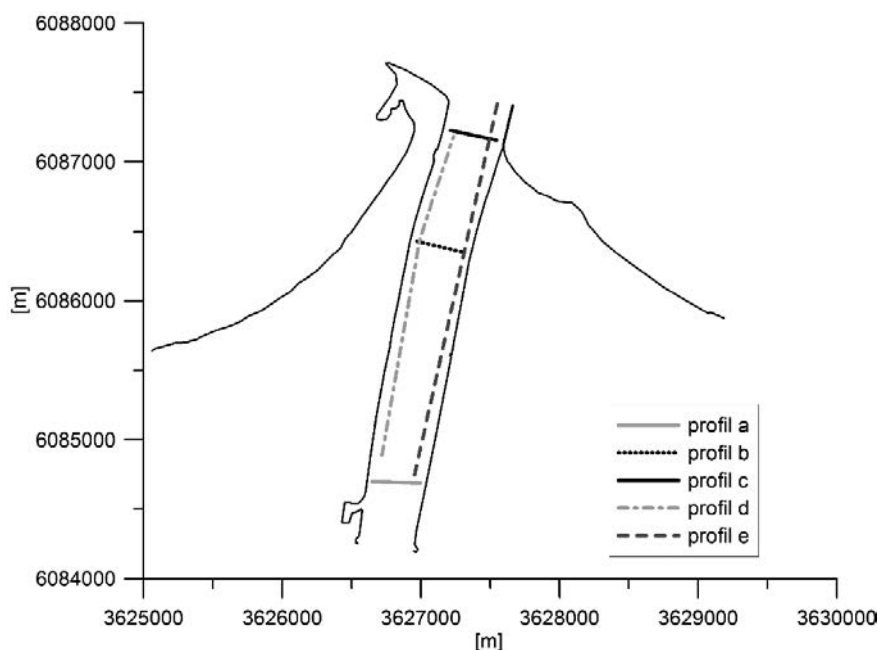
Porównując wyniki modelowe z danymi pomiarowymi można zauważyć, że w niektórych profilach otrzymano bardzo dobrą zgodność (np. profil 1, 3, 10), aczkolwiek w większości profili zgodność jest gorsza. Jednakże poza nielicznymi fragmentami części profili wyniki nie odstają istotnie od siebie. Widoczna jest pewna tendencja do przeszacowywania przez model prędkości uśrednionej po głębokości. Może wynikać to z wielu powodów. Jednym z nich jest fakt, że prezentowany model jest dość prosty, bo w przeprowadzonych symulacjach nie uwzględnia się falowania, które oddziałuje na prędkości prądu rzecznego w ujściu, a jedynie zmiany poziomu wody. Nie uwzględniono także dzia-

łania wiatru, który również znacząco może wpłynąć na odpływ wód rzecznych do morza. Ponadto warto zwrócić uwagę na fakt, że dane pomiarowe są zawsze obciążone pewnym błędem.

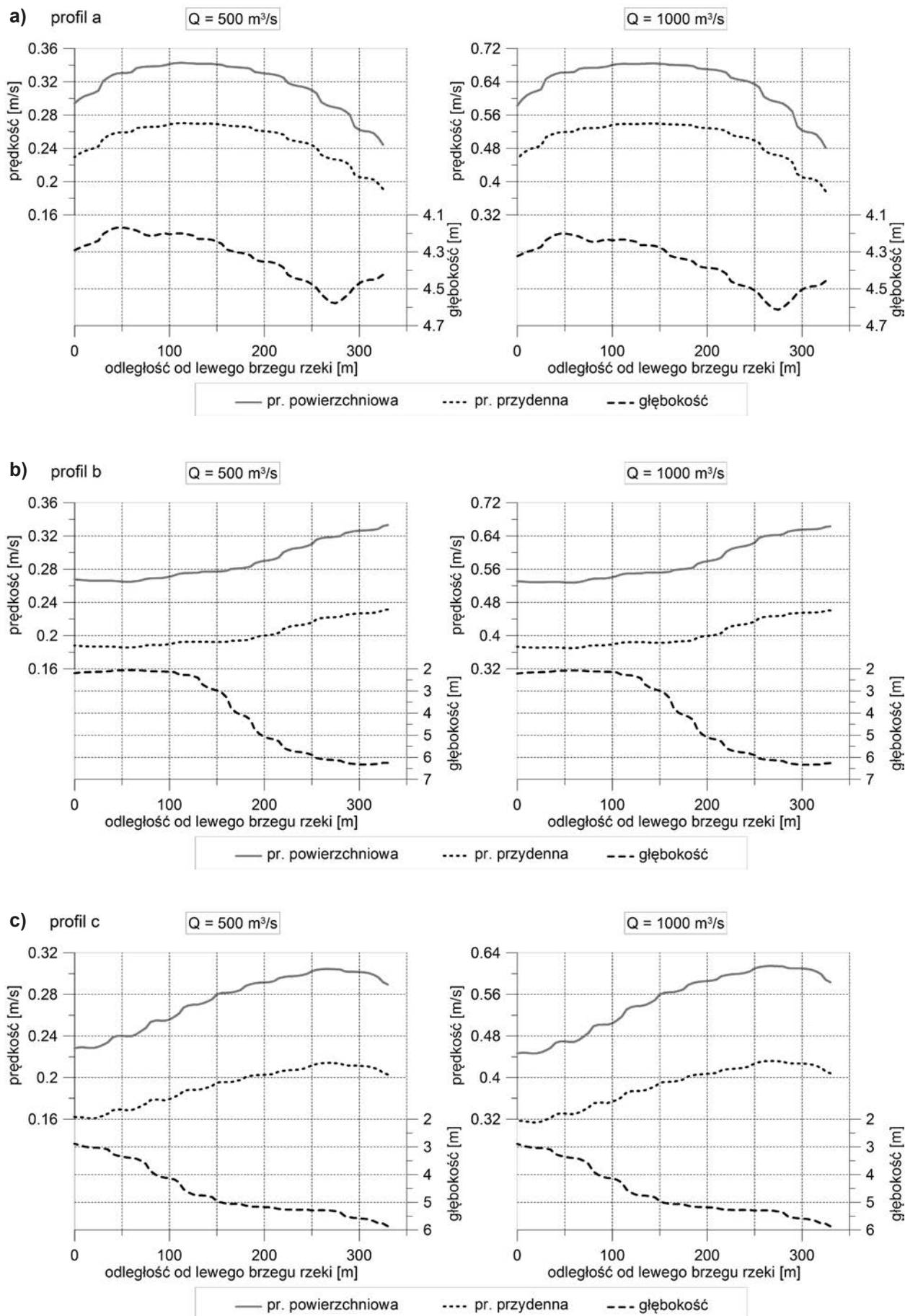
WYNIKI MODELOWE DLA WYBRANYCH PROFILI POPRZECZNYCH I OSIOWYCH ORAZ DWÓCH PRZEPŁYWÓW W WIŚLE

Wykorzystując omawiany w niniejszej pracy model, obliczono prędkości wody w Wiśle przy średnim stanie wody w morzu, czyli zawartym w przedziale zmienności stanów wody w morzu występujących w warunkach kalibracji modelu. Ponieważ kalibracji modelu dokonano w warunkach przepływów w Wiśle około $Q = 735 \text{ m}^3/\text{s}$, zdecydowano się na analizę przepływów im bliskich, to jest słabego przepływu wody o natężeniu $500 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz średniego wieloletniego przepływu wody o natężeniu $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

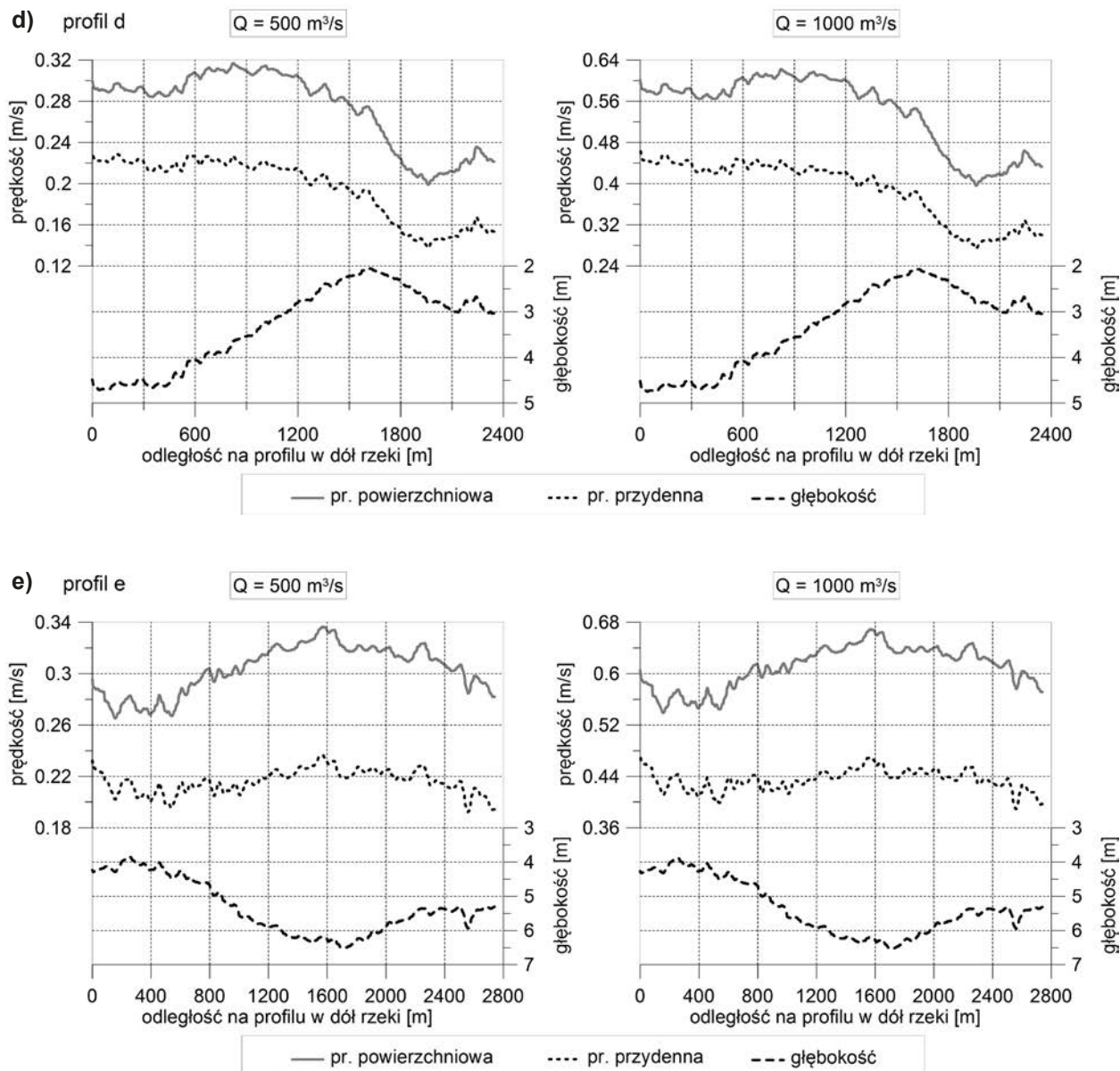
Wybrano pięć profili badawczych znajdujących się w ujściowym odcinku Wisły. Trzy z nich to profile poprzeczne (rys. 21, profile 'a' – 'c'), a pozostałe dwa to profile podłużne równoległe do osi kanału ujściowego Wisły (rys. 21, profile 'd' i 'e'). Profil 'a' znajduje się w pobliżu Świbna. Głębokości wody na tym profilu zmieniają się w nieznacznym stopniu (około 40 cm – rys. 22a). Profil 'b' znajduje się około 1 km od ujścia i charakteryzuje się gwałtowną zmianą głębokości od około 2 do 6 m (rys. 22b). Profil 'c' znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie ujścia i odznacza się niemal liniowym nachyleniem (rys. 22c). Profile w kierunku osiowym – 'd' i 'e' – znajdują się odpowiednio wzdłuż lewego oraz prawego brzegu Wisły. Na profilu 'd' głębokości początkowo są stałe, potem maleją w kierunku ujścia Wisły, a od przecięcia z profilem 'b' znów rosną (rys. 22d). W przypadku profilu 'e' sytuacja jest zgoła odmienna: przesuwając się w kierunku ujścia głębokości maleją, potem nieznacznie rosną, a w sąsiedztwie ujścia niemalże są stałe – z wyjątkiem jednego niewielkiego antropogenicznego przegłębienia (rys. 22e).



Rys. 21. Lokalizacja profili badawczych 'a' ÷ 'e' w ujściowym odcinku Wisły



Rys. 22a ÷ c. Obliczone wartości prędkości wody w profilach 'a' ÷ 'c' w warstwie powierzchniowej (linia ciągła, kolor szary) i przydennej (linia kropkowana, kolor czarny) w warunkach dwóch różnych przepływów w Wiśle ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$). Profil głębokościowy w metrach (linia przerywana, kolor czarny)



Rys. 22d ÷ e. Obliczone wartości prędkości wody w profilach 'd' i 'e' w warstwie powierzchniowej (linia ciągła, kolor szary) i przydennej (linia kropkowana, kolor czarny) w warunkach dwóch różnych przepływów w Wiśle ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$). Profil głębokościowy w metrach (linia przerywana, kolor czarny)

W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych programem Delft3D otrzymano prędkości wody w Wiśle. Na rys. 22 przedstawiono obliczone wartości prędkości wody w dwóch warstwach: powierzchniowej i przydennej, przy czym każda z tych warstw ma miąższość 10% lokalnej głębokości wody. Otrzymano, że w profilu 'a', czyli w przypadku dna o małej zmienności, największe prędkości wody występują pośrodku rzeki i stopniowo zmniejszają się w kierunku brzegów. W przypadku profili 'b' i 'c' otrzymano, że prędkości wody mocno zmieniają się na profilu. Na płyciźnie prędkości prądu maleją, zaś na głębi rosną, co potwierdza fakt, że odpływ wód rzecznych następuje przede wszystkim kanałami odpływowymi, czyli odbywa się w miejscach o zwiększonej głębokości, a na przemiałach i płyciżnach zwalnia. Analogiczne wnioski płyną z analizy rozkładu prędkości wody wzdłuż profili osiowych. Ponadto można zaobserwować, że wzdłuż profilu 'e', charakteryzującego się dużymi głębokościami, nie występują duże wahania prędkości wody, nawet gdy głębokość wyraźnie się zwiększa. Szczególnie

dobrze jest to widoczne w warstwie przydennej, gdzie głębokości pozostają niemalże stałe. Przy dwukrotnym wzroście natężenia przepływu prędkości wody wzdłuż bądź w poprzek tego samego profilu wzrastają również w przybliżeniu dwukrotnie. Dogłębna analiza tych wartości wskazuje, że wzrost prędkości jest większy w obszarach, na których koncentruje się nurt rzeki oraz mniejszy w miejscach poza nurtem.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy opisano model numeryczny rejonu ujścia Wisły zbudowany w pakiecie obliczeniowym Delft3D oraz proces jego kalibracji na podstawie danych stanu wody w Wiśle na stacjach wodowskazowych Tczew, Gdańska Głowa, Przegalina, Świbno i Ujście Wisły w warunkach przepływu wody w Wiśle około $700 \text{ m}^3/\text{s}$.

Obliczono prędkości wody w ujściowym odcinku Wisły w okresie 25-26 października 2013 roku. Uśredniono je po głębokości w 14 profilach prostopadłych do osi kanału rzecznego, w których w tych dniach wykonano pomiary prędkości wody prądomierzem akustycznym ADCP. Zestawienie pomierzonych i obliczonych uśrednionych po głębokości prędkości sugeruje, że nie różnią się istotnie od siebie, a w niektórych profilach wykazują bardzo dobrą zgodność.

Przeprowadzono symulacje numeryczne oprogramowaniem Delft3D dla dwóch wartości przepływu wody w Tezewie: 500 m³/s i 1000 m³/s oraz dla średniego poziomu morza. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń wyznaczono rozkłady przypowierzchniowych i przydennych prędkości prądu rzeczno-ujściowego w kilku charakterystycznych profilach poprzecznych i osiowych.

W przyszłości model może być wykorzystany do wyznaczenia natężenia transportu rumowiska dostarczanego do ujścia Wisły, aczkolwiek będzie się to wiązało z koniecznością zmiany miąższości warstw, między innymi poprzez zagęszczenie warstw przydennych.

LITERATURA

1. Augustowski B.: Wisła Pomorska. W: Piskozub A. (red.): Wisła. Monografia rzeki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
2. Cebulak K.: Delta Wisły powyżej i poniżej poziomu morza. Stowarzyszenie Żuławy i Lokalna Grupa Działania Żuławy i Mierzeja, Nowy Dwór Gdański 2010.
3. Cerkowniak G. R.: Dynamika stożka ujściowego Wisły w różnych skalach czasowych i przestrzennych. Rozprawa doktorska. IBW PAN, Gdańsk 2016.
4. Czuba J. A., Oberg K. A.: Validation of Exposure Time for Discharge Measurements made with Two Bottom-Tracking Acoustic Doppler Current Profilers. Proceedings of the IEEE/OES/CMTC Ninth Working Conference on Current Measurement Technology, Charleston, SC, 2008, 245-249.
5. Deltares: Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual. Hydro-Morphodynamics. Version: 3.15.34158, Deltares, Delft, The Netherlands, 2014.
6. Environment Canada: Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat, version adapted for Water Survey of Canada, 2013.
7. Franz M., Kozakiewicz A., Naguszewski A., Piwowarska M., Ostrowski R., Skaja M., Szymtkiewicz M.: Ewolucja Przekopu Wisły w świetle historycznych danych batymetrycznych. Inżynieria Morska i Geotechnika 26 (5), 2005, 383–391.
8. Gajewski L., Rudowski S.: Zmiany erozyjne stożka usypowego Wisły w okresie od 1980 do 1996. Mat. Konf. Nauk. Techn. „Ekonomiczno-Techniczne problemy ujściowego odcinka Wisły”, Politechnika Gdańska, 1997, 56-60.
9. Graniczny M., Janicki T., Kowalski Z., Koszka-Maróń D., Jegliński W., Uścińowicz Sz., Zachowicz J.: Recent development of the Vistula River outlet. Polish Geological Institute Special Papers 11, 2004, 103–107.
10. Koszka-Maróń D.: Facies model of the contemporary delta lobe of the Vistula River. Oceanological and Hydrobiological Studies 38, 2009, 57–68.

11. Lubomirski K., Jezionek E., Nowak J.: Batymetria i analiza zmian głębokości ujścia Wisły 1999 rok. Wydawnictwa wewnętrzne Instytutu Morskiego w Gdańsku, Gdańsk 1999.
 12. Łomniewski K.: Ujście Wisły. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego 29 (4), 1960, 391–418.
 13. Majewski A.: Rozwój hydrograficzny delty Wisły w okresie historycznym. Przegląd Geofizyczny R. XIV (XXII) z. 1, Oddział Morski, Gdynia 1969.
 14. Majewski W.: Monografia Dolnej Wisły. IMGW, Warszawa 2016.
 15. Majewski W., Jasińska E., Kapiński J., Ostrowski R., Robakiewicz M., Szymtkiewicz M., Walter A., Gąsiorowski D., Kolarski T., Skaja M., Dziegielewska A., Perfumowicz T., Piotrowska D., Massalski W., Mioduszecki K.: Ekspertyza dotycząca poprawy drożności ujścia rzeki Wisły wraz z projektem budowlano-wykonawczym zabudowy brzegu. Konsorcjum IBW PAN i PPBH Aquaprojekt, Gdańsk 2003.
 16. Makowski J.: Wały przeciwpowodziowe Dolnej Wisły, historyczne kształtowanie, obecny stan i zachowanie w czasie znacznych wzebrań. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 1993.
 17. Makowski J.: Setna rocznica wykonania przekopu Wisły 1895–1995. IBW PAN, Gdańsk, 1995.
 18. Mueller D. S., Wagner C. R., Rehmel M. S., Oberg K. A., Rainville F.: Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3A–22, 2009.
 19. Oberg K. A., Mueller D. S.: Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. Journal of Hydraulic Engineering 133 (12), 2007a, 1421-1432.
 20. Oberg K. A., Mueller D. S.: Analysis of exposure time on streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers. Proceedings of the ASCE Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference, Lake Placid, NY, 2007b.
 21. Ostrowski R., Kapiński J., Piotrowska D., Pruszek Z., Robakiewicz M., Różyński G., Schönhofer J., Skaja M., Szymtkiewicz M., Szymtkiewicz P.: Badania modelowe ujścia Wisły do Zatoki Gdańskiej. Raport IBW PAN wykonany na zlecenie RZGW w Gdańsku, 2009.
 22. Parsons D. R., Jackson P. R., Czuba J. A., Oberg K. A., Mueller D. S., Rhoads B., Best J. L., Johnson K. K., Engel F., Riley J.: Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. Earth Surface Processes and Landforms 38 (11), 2013, 1244-1260.
 23. Pruszek Z., Szymtkiewicz M.: Dynamika ujść rzecznych ze szczególnym uwzględnieniem delty Wisły. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2015.
 24. Salska-Moderhak D.: Prognozowanie poziomów wody w ujściowym odcinku Wisły za pomocą numerycznego modelu jednowymiarowego. Hydrotechnika morska (2), Studia i Materiały Oceanologiczne nr 30, 1980, 155-178.
 25. Starkel L.: Historia doliny Wisły od ostatniego zlodowacenia do dziś, Monografie IG i PZ PAN 2, Warszawa 2001.
 26. USGS: Exposure Time for ADCP Moving-Boat Discharge Measurements Made During Steady Flow Conditions. USGS Office of Surface Water Technical Memorandum 2011.08.
- PODZIĘKOWANIE:** Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule uzyskano dzięki środkom finansowym udzielonym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na rzecz działalności statutowej IBW PAN (temat 2.2) oraz środkom finansowym udzielonym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju na realizację projektu VISTULA przez Instytut Morski w Gdańsku (nr umowy PBS1/A2/3/2012).