

Optymalizacja regulacji ujścia Wisły w świetle modelowania teoretycznego

Część 1

Dr inż. Grzegorz R. Cerkowniak, dr hab. inż. Rafał Ostrowski, dr inż. Jan Schönhofer,
dr Magdalena Stella, dr inż. Piotr Szmytkiewicz, dr hab. inż. Marek Szmytkiewicz
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Ujście Wisły należy do ujść typu deltowego tworzących formy ujściowe o parametrach zależnych od łącznego oddziaływania rzecznych i morskich czynników hydro- i litodynamicznych. Kształtowany od chwili wykonania przekopu w 1895 roku stożek usypowy w ujściu Wisły pod Świbnem jest wynikiem przewagi rzecznych procesów akumulacyjnych nad morskimi procesami erozyjnymi. Regulacja ujścia Wisły jest konieczna w celu zapewnienia warunków do swobodnego odpływu wody i osadów rzecznych do morza, jak również dla bezpieczeństwa nawigacyjnego w obszarze ujściowym. Drożność ujścia jest szczególnie ważna w warunkach zimowych i zimowo-wiosennych ze względu na niebezpieczeństwo powstawania zatorów lodowych. Odpowiednio duże głębokości w ujściu są konieczne do odpływu rzecznej kry lodowej i do ewentualnej interwencji lodołamaczy.

W świetle dotychczasowych doświadczeń korzystne skutki w skali wielolecia przynosi regulacja ujścia poprzez budowę/wydłużanie kierownic. Ograniczenie interwencji technicznej tylko do wykonywania prac pogłębiarskich w ujściu jest mniej efektywne.

Na stożku ujściowym Wisły odkładane jest piaszczyste rumowisko rzeczne niesione głównie w formie wleczonej. W osadach budujących platformę stożka dominują piaski o średnicy ziaren $d_{50} = 0,25 \div 0,50$ mm. W nurcie rzeki oraz w rynnach odpływowych (uformowanych w stożku przegłębieniach tworzących uprzywilejowane drogi odpływu wody i osadów) występują piaski grubsze ($d_{50} = 0,5 \div 1,0$ mm).

Wisła odprowadza do morza około $0,6 \div 1,5$ mln m^3 osadów rocznie, w tym około $0,5$ mln m^3 rumowiska wlezonego. Część tych osadów ulega sedymentacji w bezpośrednim sąsiedztwie ujścia i rozbudowuje platformę stożka. Badania Cerkowniaka [1] pokazały, że w latach 1962-1995, 1998-2001 i 2013-2016 natężenie transportu osadów wleczonych w ujściowym odcinku Wisły wahało się w granicach od około 200 000 m^3 /rok (1984) do około 800 000 m^3 /rok (1975), ze średnią wartością wynoszącą około 460 000 m^3 /rok.

Falowanie morskie powoduje częściową przebudowę stożka ujściowego Wisły. Wypadkowy wzdłużbrzegowy prąd pochodzenia falowego i związany z nim wzdłużbrzegowy transport rumowiska morskiego skierowany jest z zachodu na wschód, przy czym natężenie tego transportu jest relatywnie niewielkie [5]. Na drodze modelowania teoretycznego Cerkowniak [1] uzyskał dokładniejsze informacje dotyczące zagadnienia wzdłużbrzegowego transportu osadów morskich w rejonie ujścia Wisły. Wyznaczone dla średniego roku statystycznego sumaryczne natężenie wzdłużbrzegowego transportu osadów w dwóch profilach prostopadłych do brzegu położonych około 5,5 km na wschód (na kilometrażu brzegu KM 42,5) i na zachód od osi Wisły (KM 53,5) wynosiło:

- w profilu na KM 42,5 około 5 000 m^3 /rok (transport skierowany na zachód),
- w profilu na KM 53,5 około 37 000 m^3 /rok (transport skierowany na wschód).

Powyższe wyniki obliczeń świadczą o tym, że lokalny klimat falowy nie tylko nie sprzyja rozmywaniu stożka, ale wręcz przeciwnie – może przyczyniać się (w znikomym wprawdzie stopniu) do jego rozrastania, ponieważ wzdłużbrzegowy transport rumowiska w morskiej strefie brzegowej po wschodniej i zachodniej stronie stożka jest skierowany ku ujściu Wisły. Jednakże procesy lito- i morfodynamiczne zachodzące na stożku ujściowym Wisły w niewielkiej mierze zależą od falowania w Zatoce Gdańskiej.

Od czasu wykonania przekopu roczne kubatury powiększania się stożka sukcesywnie maleją (zob. [2]). Przyczyną tego jest wydłużanie się odmorskich krawędzi platformy stożka, uwydatniające ekspozycję skraju i skarp stożka na erozyjne działanie sztormowych fal i prądów morskich.

Natężenie ruchu rumowiska jest wprost proporcjonalne do wartości przydennych naprężeń ścinających, zależnych od kwadratu natężenia przepływu wody. Małe przepływy, generujące małe natężenie ruchu osadów rzecznych, mają znikomy wpływ na rozbudowywanie się stożka ujściowego Wisły. Zasadni-

czy przyrost objętości stożka ma miejsce podczas przepływów umiarkowanych (rzędu 1000 m³/s) i umiarkowanie silnych (do około 3000 m³/s).

Podczas nieczęstego występowania silnych i ekstremalnie silnych przepływów (rzędu 3500 ÷ 4000 m³/s i więcej) odbywa się wypłukiwanie rynny lub rynien w platformie stożka. Wypłukiwanie to jest ułatwione oddziaływaniem kierownic o odpowiednim zasięgu lub (w niewielkim stopniu) ewentualnym istnieniem kinety, czyli podwodnego wykopu inicjującego odpływ wody rzecznej w kierunku prostopadłym do brzegu morskiego.

Według ekspertyz z ostatnich lat [3, 5] kierownice powinny być sukcesywnie przedłużane. W przeciwnym razie postępować będzie narastanie spłyceń w rejonie stożka, skutkujące przesłonięciem światła ujścia rzeki. Prowadzenie wyłącznie prac bagrowniczych (np. poprzez okresowe wykonywanie kinety) jest rozwiązaniem relatywnie niedrogim, lecz mało efektywnym. Wydłużanie kierownic jest kosztownym przedsięwzięciem hydrotechnicznym. W związku z powyższym kluczową kwestią staje się optymalizacja wymiarów i kształtu ujściowych fałochronów kierujących, przy czym zagadnieniem podstawowym wydaje się określenie minimalnej koniecznej długości tych fałochronów w danych warunkach hydro-, lito- i morfodynamicznych rejonu ujścia Wisły.

W latach 2019-2020 Instytut Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk (IBW PAN) wykonał pracę naukowo-badawczą [4] na zamówienie Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie, reprezentowanego przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Gdańsku, której celem było sformułowanie zaleceń dotyczących optymalizacji regulacji ujścia Wisły.

Zakres badań przeprowadzonych na potrzeby odnośnej pracy obejmował:

- analizę archiwalnych materiałów i danych oraz wykonanych uprzednio badań modelowych dotyczących ujścia (przekopu) Wisły,
- analizę przepływów rzecznych w Tczewie z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku,
- analizę wiatru i falowania głębokowodnego na przedpolu ujścia (przekopu) Wisły z okresu od 01.01.2009 do 03.06.2019 roku,
- analizę ekstremalnych oraz charakterystycznych stanów wody w morzu zarejestrowanych przez mareograf w Porcie Północnym w Gdańsku odpowiednio w okresie od 1.11.2008 do 31.10.2018 roku oraz w latach 1989-2018,
- analizę danych batymetrycznych;
- modelowanie procesów hydro- i morfodynamicznych w ujściu Wisły dla istniejącego i zmodyfikowanego układu fałochronów kierujących, z uwzględnieniem możliwości robót czerpalno-refulacyjnych w celu wykonania kinety i usypania sztucznej wyspy,
- opracowanie wyników modelowania,
- sformułowanie wniosków końcowych.

W świetle interdyscyplinarnych obserwacji prowadzonych od czasu wykonania uprzedniej ekspertyzy [5], a szczególnie wobec troski o środowisko naturalne, największej wagi nabiera ilościowa optymalizacja wydłużania kierownic. Owa optymalizacja ma na celu rozwiązanie problemu drożności ujścia ze skutecznością w skali kilku przyszłych lat, jednakże bez stwarzania

Tabl. 1. Przepływy charakterystyczne [m³/s] w Tczewie od 01.11.2008 do 30.04.2019

Okres (m-c)	WWQ	SWQ	SSQ	SNQ	NNQ
XI	2120	1223	893	704	427
XII	1890	1180	899	649	358
I	3870	1481	1034	674	337
II	2820	1748	1193	752	521
III	4020	1960	1491	1088	604
IV	3670	1807	1380	1038	572
V	6360	2153	1259	794	577
VI	5680	1729	1108	731	423
VII	2190	1348	878	611	372
VIII	2810	1157	795	610	297
IX	3940	1132	729	509	285
X	2050	1017	743	587	319
Rok	6360	3032	1048	424	285

Tabl. 2. Przepływy w Tczewie o określonym czasie trwania w ciągu roku wraz z wyższymi w okresie od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku

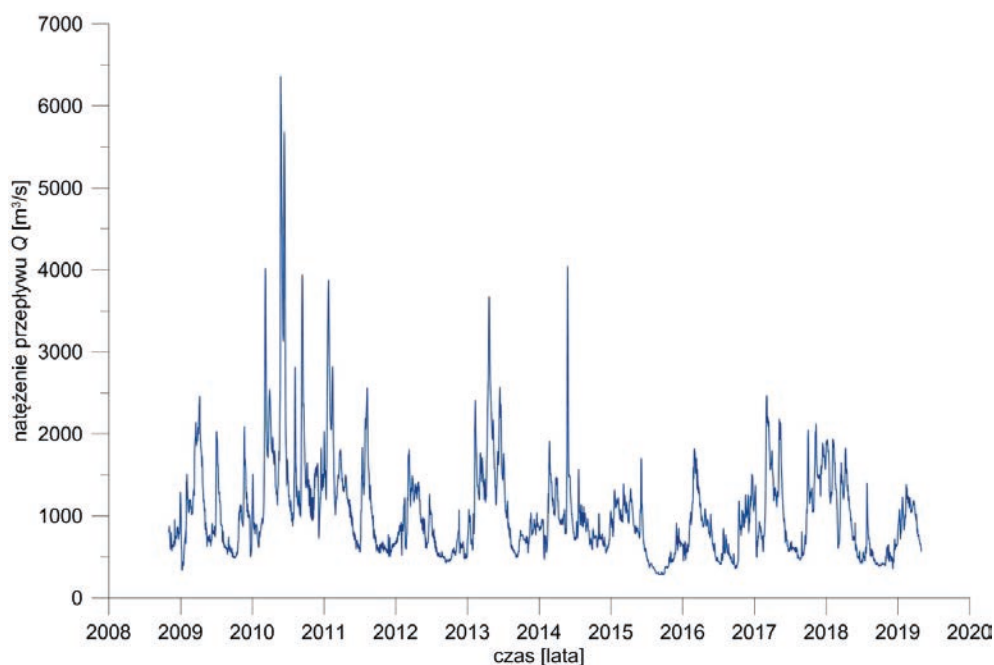
Część roku [%]	Liczba dni w roku	Przepływ [m ³ /s]
0,137	0,5	5632
0,274	1	4909
0,5	1,8	4013
1	3,6	3490
3	11	2353
5	18,3	2064
10	36,5	1732
15	54,8	1521
25	91,3	1274
50	182,6	893
75	273,9	629
85	310,5	543
90	328,7	489
95	347	423
97	354,3	400
99	361,6	303

realnego zagrożenia destrukcją piaszczystych łąch formujących się w ujściu, tak istotnych z punktu widzenia środowiskowego. Wskazane jest nawet wykonanie sztucznych łąch lub refulacja piasku na łąkach istniejących (oczywiście w odpowiednich okresach, w sposób nie zakłócający bytowania fauny) celem powiększenia obszaru lęgowego dla ptactwa. Badania [4] przeprowadzono z uwzględnieniem wyżej wymienionych kryteriów optymalizacyjnych. Niniejszy artykuł zawiera najważniejsze wyniki odnośnych badań.

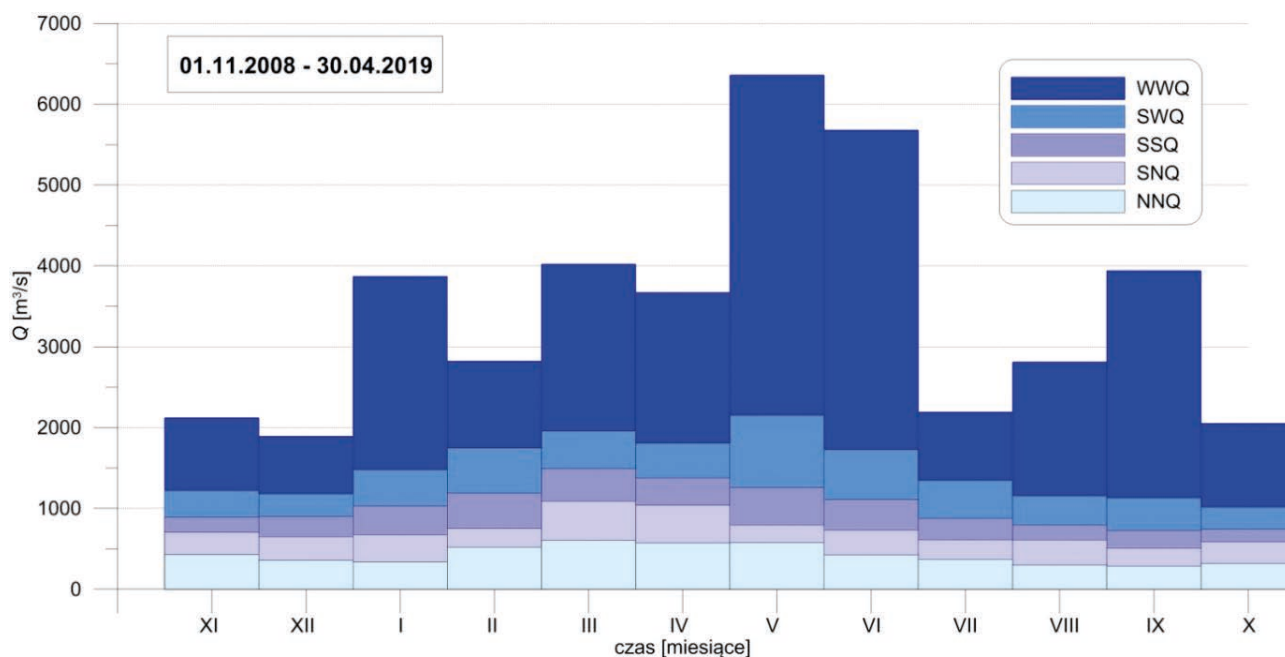
ANALIZA DANYCH WEJŚCIOWYCH DO MODELOWANIA

Analiza przepływów w Tczewie z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku

Wyznaczono przepływy charakterystyczne oraz przepływy o określonym okresie powtarzalności na podstawie pozyska-



Rys. 1. Średnie dobowe przepływy w Tczewie wyznaczone przez IMGW-PIB na podstawie poziomów wody z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019

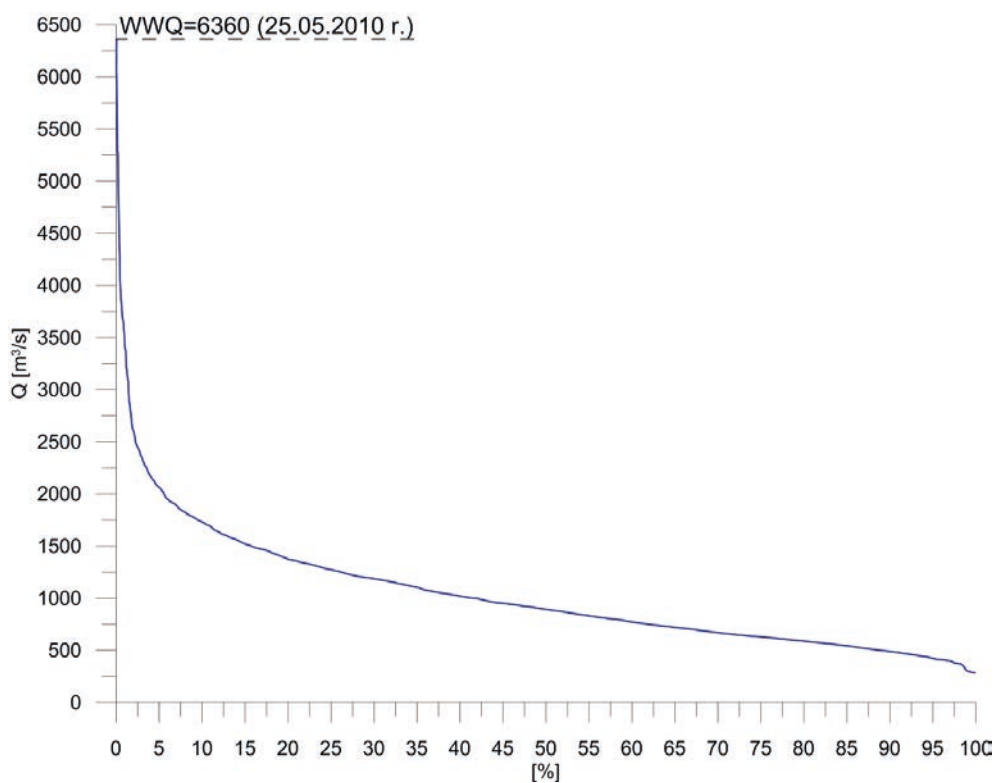


Rys. 2. Miesięczne przepływy charakterystyczne w Tczewie od 01.11.2008 do 30.04.2019

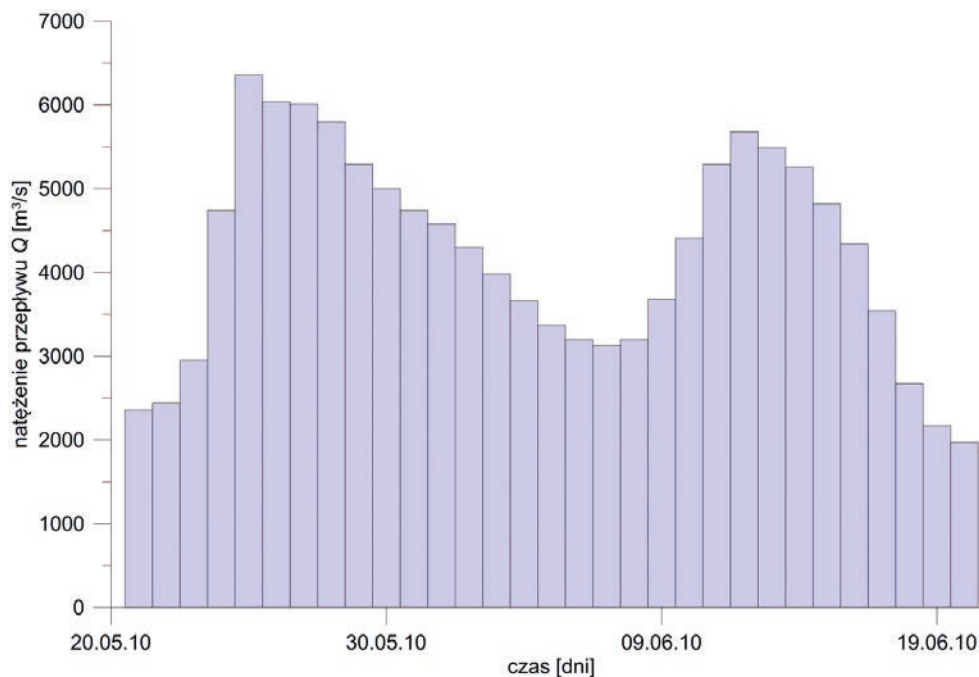
nych z IMGW-PIB wartości średnich dobowych przepływów Wisły w Tczewie z 10 lat, to jest z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku. Dane te zostały wyznaczone przez Biuro Prognoz Hydrologicznych Oddziału Morskiego IMGW-PIB w Gdyni na podstawie odpowiedniej krzywej przepływu i poziomów wody (tzw. krzywej konsumpcyjnej) zastosowanej w odniesie-

niu do stanów wody zarejestrowanych we wspomnianym okresie przez posterunek wodowskazowy w Tczewie. Kompletny szereg czasowy średnich dobowych przepływów dla tego przedziału czasu przedstawiono na rys. 1.

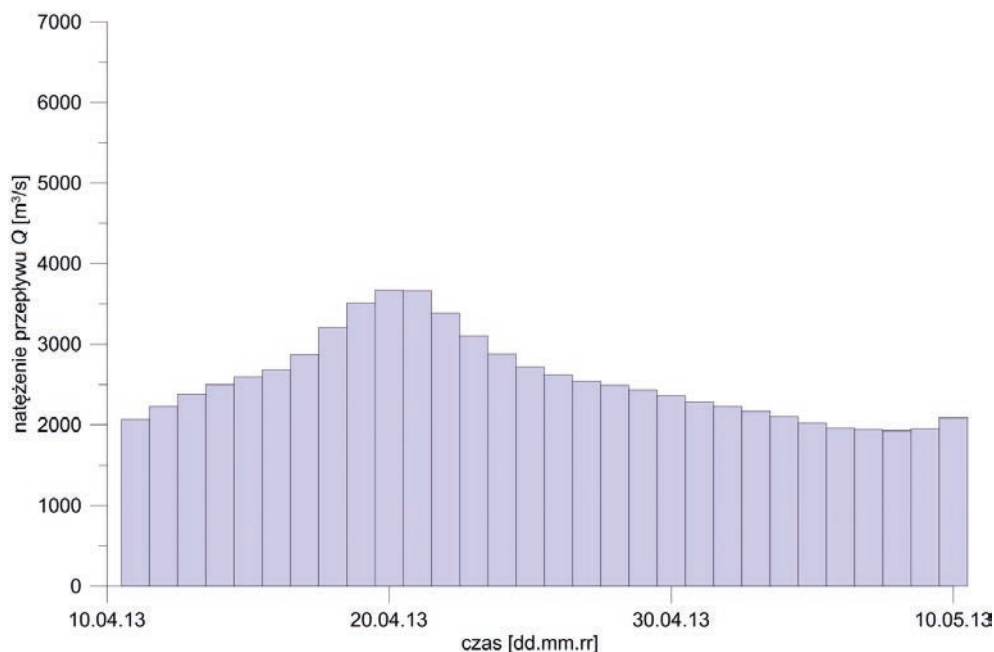
Analiza danych z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku umożliwiła wyznaczenie przepływów charakterystycznych



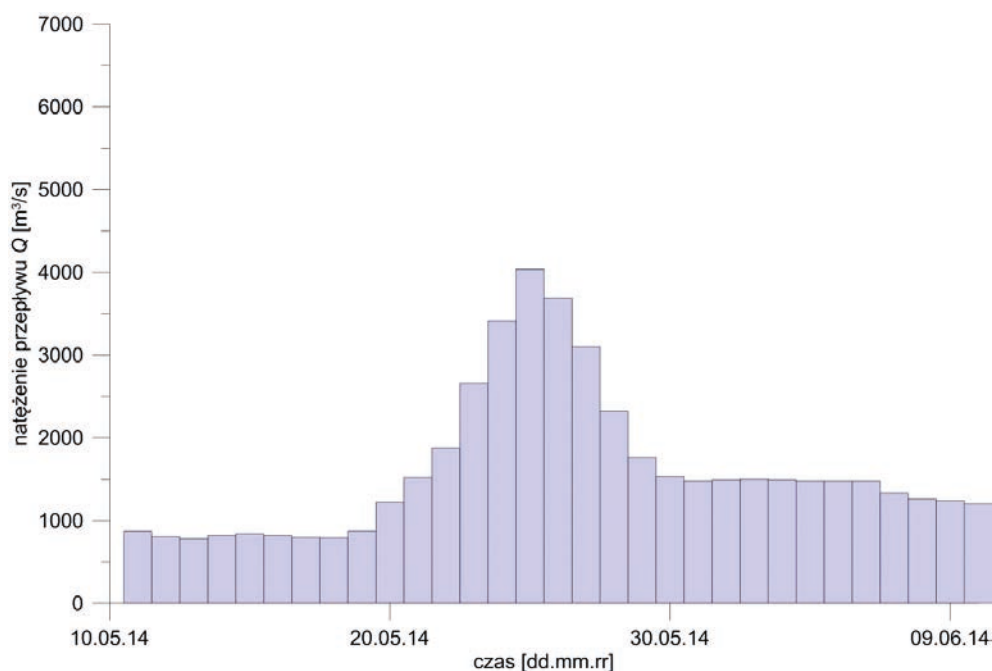
Rys. 3. Krzywa prawdopodobieństwa przewyższenia przepływów w Tczewie wyznaczona dla danych z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku



Rys. 4. Fala powodziowa w Tczewie zanutowana na przełomie maja i czerwca 2010 roku (ekstremalnie wysokie przepływy w okresie od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku)



Rys. 5. Fala powodziowa w Tczewie zanotowana w kwietniu 2013 roku



Rys. 6. Fala powodziowa w Tczewie zanotowana w maju 2014 roku

WWQ¹, SWQ², SSQ³, SNQ⁴ i NNQ⁵ oraz wartości przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia i okresie po-

¹ Największy przepływ w analizowanym okresie lub w grupie podzbiorów danych (np. podokresów).

² Średnia z największych przepływów w grupie podzbiorów danych (np. podokresów).

³ Przepływ średni w analizowanym okresie lub w grupie podzbiorów danych (np. podokresów).

⁴ Średnia z najmniejszych przepływów w grupie podzbiorów danych (np. podokresów).

⁵ Najmniejszy przepływ w analizowanym okresie lub w grupie podzbiorów danych (np. podokresów).

wtarzalności. Wyznaczono ponadto wartości przepływów wraz z wyższymi o określonym czasie trwania w ciągu roku.

Podsumowanie wyników analizy przepływów dla posterunku Tczew w latach 2008-2019 zawarto w tabl. 1, 2 i 3. Miesięczne przepływy charakterystyczne w Tczewie wyznaczone dla tego przedziału czasowego na podstawie danych z IMGW-PIB zilustrowano na rys. 2, krzywą prawdopodobieństwa przewyższenia przepływów dla tego okresu przedstawiono na rys. 3, zaś falę powodziową w Tczewie zanotowaną na przełomie maja i czerwca 2010 roku (ekstremalnie wysokie przepływy w okresie od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku) – na rys. 4.

Tabl. 3. Przepływy w Tczewie o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia (P [%]) i okresie powtarzalności [lata] wyznaczone w oparciu o dane z okresu od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku na podstawie rozkładu Gumbela

Przepływy ekstremalne, rozkład Gumbela		
P [%]	Okres powtarzalności [lata]	Przepływ ekstremalny [m^3/s]
1	100	7837
2	50	6986
5	20	5852
10	10	4978
25	4	3765
50	2	2723

Z analizy przepływów występujących w okresie od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku wynika, że maksymalny przepływ wystąpił w dniu 25.05.2010 roku i miał natężenie $6360 m^3/s$ (zob. tabl. 1 oraz rys. 1 ÷ 4). Biorąc pod uwagę największy przepływ z okresu od 01.11.1998 do 31.10.2008 roku (zob. [5]), wynoszący $5360 m^3/s$, przepływ z dnia 25.05.2010 roku ($6360 m^3/s$) był najwyższy w okresie ponad 20 ostatnich lat (01.11.1998 ÷ 30.04.2019).

Kilkakrotnie w analizowanym okresie od 01.11.2008 do 30.04.2019 roku zanotowano podobne przepływy o charakterze powodziowym, lecz znacznie niższe od ekstremalnego – z maksimum rzędu $3500 ÷ 4000 m^3/s$ (np. w kwietniu 2013 roku, zob. rys. 5) lub trwające znacznie krócej (w maju 2014 roku, zob. rys. 6).

Z przeanalizowanych danych wynika, że podczas co najmniej kilku dni sąsiadujących z dniem wystąpienia lokalnego ekstremum obserwowano przepływy znacznie wyższe od przeciętnych, tworzące typową rzeczną falę powodziową. Należy zatem wnioskować, że wystąpienie ekstremalnego przepływu jest zjawiskiem trwającym wystarczająco długo (co najmniej kilka – kilkanaście dni), aby zmienić reżim hydro- i litodynamiczny w stopniu wystarczającym do powstania warunków sprzyjających wypłukiwaniu osadów ze stożka ujściowego.

Reprezentatywny graniczny przepływ płuczący

Z powyższej analizy wynika, że największy w minionym dziesięcioleciu długotrwały przepływ (z maksimum wynoszącym $6360 m^3/s$), który w 2010 roku ukształtował nowy układ rynien odpływowych, w przybliżeniu odpowiada przepływowi ekstremalnemu o okresie powtarzalności $30 ÷ 40$ lat. Oznacza to, że przepływ tego rodzaju może nie wystąpić przez następne kilkadziesiąt lat⁶. W takiej sytuacji należy spodziewać się postępującej długoterminowej akumulacji osadów w ujściu rze-

⁶ Jeżeli w danym roku zanotowano przepływ o okresie powtarzalności 20 lat, to nie znaczy, że w roku następnym nie może wystąpić przepływ o takim samym lub dowolnym innym okresie powtarzalności, np. 100 lat. Analiza statystyczna umożliwia wyznaczenie natężenia przepływu o określonym okresie powtarzalności, ale nie pozwala określić w którym roku w przyszłości taki przepływ rzeczywiście wystąpi.

ki skutkującej niedrożnością ujścia w warunkach spływu kry rzecznej⁷.

Fala powodziowa z maja i czerwca 2010 roku, pomimo krótkich kierownic (kończących się daleko przed krawędzią *plateau* stożka), diametralnie zmieniła batymetrię ujściowego odcinka Wisły oraz istniejącą od wielu lat konfigurację morfologiczną stożka ujściowego.

Analiza rzecznych przepływów i danych batymetrycznych z ostatnich kilku lat oraz materiałów i informacji archiwalnych pokazała, że przy przepływach o natężeniu mniejszym niż $2000 ÷ 3000 m^3/s$ należy spodziewać się braku efektu płukania ujścia, szczególnie w przypadku występowania na platformie stożka rozległych płyczn pozbawionych wyraźnych rynien odpływowych.

O ile długotrwały intensywny przepływ w rodzaju fali powodziowej z maja i czerwca 2010 roku miał **bezwzględnie** charakter płuczący, o tyle przepływy rzędu $3500 ÷ 4000 m^3/s$ **najczęściej** powodują wypłukanie erozyjnej rynny lub rynien w stożku ujściowym. Ostateczny jakościowy i ilościowy efekt płukania zależy jest od występujących warunków początkowych, na które składają się takie czynniki jak morfologia stożka, istnienie lub brak kinety oraz długość kierownic. Z danych zawartych w tabl. 2 wynika, że w średnim roku statystycznym łącznie przez około 3,6 dnia (1% czasu) występuje przepływ przekraczający $3490 m^3/s$, sprzyjający powstawaniu lub pogłębianiu się rynny erozyjnej. Jest to przepływ o parametrach granicznych (natężeniu i czasie trwania), którego oddziaływanie w mniejszym lub większym stopniu polepsza drożność ujścia – w zależności od wspomnianych powyżej warunków początkowych (naturalnych i antropogenicznych). W ostatnim dziesięcioleciu przepływ tego rodzaju zarejestrowano w kwietniu 2013 oraz w maju 2014 roku.

W celu modelowania morfodynamiki stożka ujściowego Wisły przyjęto zatem następujące parametry reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego:

natężenie $Q = 3500 m^3/s$, czas oddziaływania $t = 4$ doby.

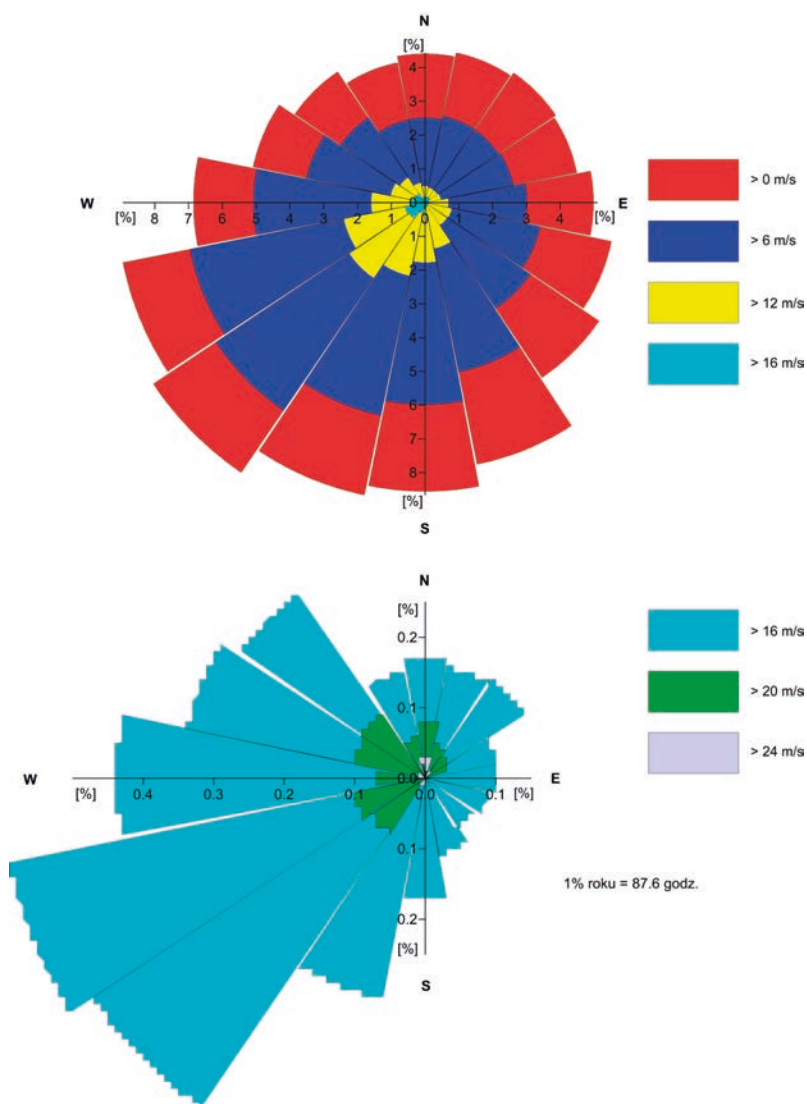
Warunki wiatrowe i falowe

Na potrzeby analizy warunków hydrologiczno-meteorologicznych (falowo-wiatrowych) z ostatnich 10 lat zwrócono się do Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania (ICM) Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego o udostępnienie głębokowodnych danych falowych i wiatrowych z rejonu ujścia Wisły. Pozyskano dane falowe i wiatrowe z okresu od 01.01.2009 roku (godz. 01:00 UTC) do 03.06.2019 roku (godz. 12:00 UTC). Główne głębokowodne parametry wiatrowo-falowe obejmują: prędkość i kierunek wiatru (uśrednione z 10 minut), wysokość fali znacznej, kierunek propagacji fal i okres piku energii falowania w nieregularnym (losowym) ciągu falowym.

⁷ Nie można z określonym prawdopodobieństwem przewidzieć, jakie maksymalne przepływy wystąpią np. w roku 2021 czy w latach następnych. Biorąc jednak pod uwagę obserwowany spadek zasobów wody w polskich rzekach, spodziewać się należy w przyszłości obniżenia częstotliwości i czasu trwania przepływów płuczących.



Rys. 7. Lokalizacja punktu danych dotyczących wiatru i falowania głębokowodnego



Rys. 8. Prędkości i kierunki wiatru w średnim roku statystycznym na przedpolu ujścia Wisły

Wykorzystano parametry wiatrowe i falowe dotyczące jednego spośród punktów węzłowych siatki numerycznej położonych w strefie morza przylegającej do ujścia Wisły, dla których pozyskano odnośne dane. Jest to punkt z jednej strony spełniający kryterium lokalizacji głębokowodnej, z drugiej zaś strony położony najbliżej ujścia, charakteryzujący się następującymi współrzędnymi:

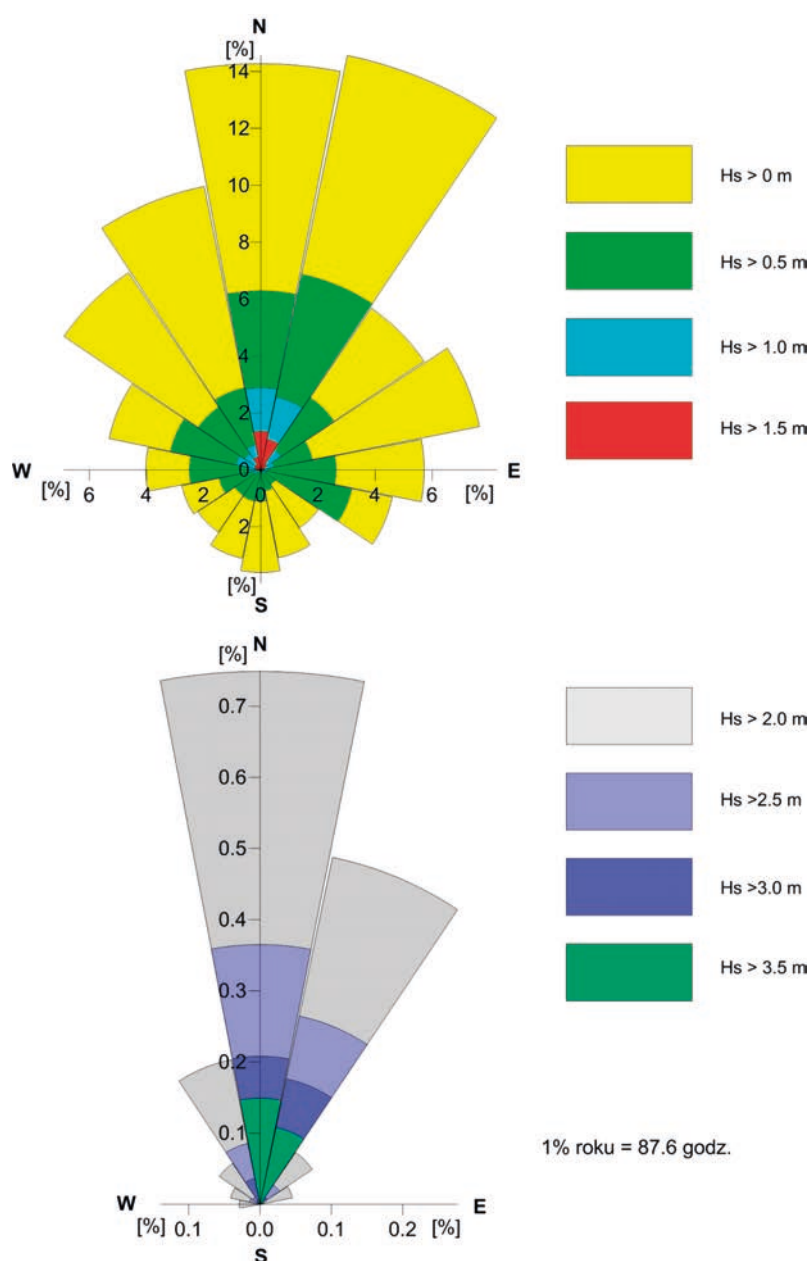
54,43347°N; 18,93572°E (54°26,01'N; 18°56,14'E)

Punkt ten znajduje się w odległości około 8 km od ujścia, prawie dokładnie na północ od głowicy kierownicy zachodniej, z lekkim odchyleniem na zachód (zob. rys. 7), w miejscu, gdzie głębokość wody wynosi około 45 m.

Wyniki analizy prędkości i kierunku wiatru, to jest czas oddziaływania wiatru o określonych prędkościach z poszczególnych kierunków w średnim roku statystycznym (tzw. różę

wiatrów), przedstawiono na rys. 8, zaś wyniki analizy parametrów falowania głębokowodnego, to jest czas oddziaływania fal o określonej wysokości (wysokość fali znacznej H_s) generowanych wiatrem z poszczególnych kierunków w średnim roku statystycznym (tzw. różę falowania) przedstawiono na rys. 9.

Ogląd wyników analizy warunków wiatrowych wskazuje – jak należało się spodziewać (biorąc pod uwagę klimat wiatrowy na polskim wybrzeżu) – przewagę wiatrów z sektora S-SW. Najsilniejsze wiatry w analizowanym okresie występowały z kierunków SW i WSW. W konsekwencji położenia rozpatrywanego punktu głębokowodnego, skutkującego różnymi rozciągłościami działania wiatru na poszczególnych kierunkach, falowaniem dominującym pod względem częstości występowania i wysokości fal jest falowanie z kierunków N i NNE. W kategorii najwyższych fal największą częstością występowania charakteryzuje się falowanie z kierunku N.



Rys. 9. Wysokości i kierunki propagacji fal głębokowodnych w średnim roku statystycznym na przedpolu ujścia Wisły

Powstawanie i pogłębianie się rynien odpływowych w stożku ujściowym Wisły zależne jest od przepływów rzecznych oraz naturalnych i antropogenicznych warunków początkowych. Ewolucja *plateau* stożka i krawędzi jego odmorskich skłonów jest natomiast efektem współoddziaływania wszystkich trzech sił sprawczych występujących w tym rejonie, a więc falowania wiatrowego i prądów pochodzenia falowego, prądu rzecznoego oraz podejmowanych przez człowieka interwencji technicznych. Działalność antropogeniczna ma charakter incydentalny i nadaje ogólny kierunek zmian morfologicznych, natomiast współoddziaływanie czynników hydrodynamicznych (falowania wiatrowego i prądów pochodzenia falowego z prądem rzecznoym) ma charakter permanentny i bezpośrednio wywołuje zmiany układu dna *plateau* stożka i jego odmorskich skłonów.

Wyniki analizy falowania na przedpolu ujścia Wisły wykorzystano do teoretycznego modelowania zmian dennych w obrębie stożka generowanych czynnikami prądowo-falowymi. Wyniki analizy falowania wraz z wynikami analizy przepływów rzecznych posłużyły do określenia reprezentatywnych warunków prądowo-falowych powodujących ewolucję stożka w okresach poza występowaniem przepływów płuczających.

Stany wody w morzu

Wahania poziomów morza w rejonie ujścia Wisły wynikają głównie ze spiętrzeń sztormowych. W Zatoce Gdańskiej stany wody rejestrowane są systematycznie w kilku punktach, przy czym najdłuższe serie pomiarowe pochodzą z wodowskazu w Gdańsku Nowym Porcie. Wodowskaz funkcjonował w tym miejscu od 1886 roku (z przerwą w latach 1940-1945) do grudnia 1986 roku, kiedy to został przeniesiony do Portu Północnego. Maksimum stanu wody na posterunku mareograficznym w Gdańsku wystąpiło w 1914 roku i wynosiło 656 cm (to jest 1,56 m powyżej średniego poziomu morza), ale absolutne maksimum w Gdańsku odnotowano jeszcze przed rozpoczęciem regularnych pomiarów, to jest w 1843 roku (664 cm).

Ze względu na relatywnie niewielką odległość Portu Północnego od ujścia Wisły, wynoszącą około 15 km, dane mareograficzne z Gdańska przyjęto jako miarodajne dla analizowanego obszaru.

W opracowaniu [5] na podstawie długoterminowej analizy sezonowych rozkładów spiętrzeń sztormowych i czasów ich trwania pokazano, że w ciągu roku stany wody w Gdańsku powyżej 550 cm mogą pojawić się 3 ÷ 4 razy, a stany rzędu 600 cm pojawiają się nie częściej niż raz na dwa lata. Przeciętne spiętrzenie sztormowe powyżej 0,5 m trwa około 31 ÷ 32 godziny, zaś powyżej 0,8 m około 9 godzin. Z kolei przeciętny sztormowy przyrost stanu wody wynosi od 10 do 16 cm/godz., zaś największe sztormowe przyrosty nie przekraczają wartości 22 cm/godz.

Na potrzeby realizacji niniejszej pracy pozyskano odpłatnie od IMGW-PIB (Oddział Morski w Gdyni) wartości maksymalnego, średniego i minimalnego stanu wody zarejestrowane przez mareograf w Porcie Północnym w okresie od 1.11.2008 do 31.10.2018 roku. Zakupiono również charakterystyczne stany wody wyznaczone na podstawie danych z mareografu w Porcie Północnym w latach 1989-2018.

Tabl. 4. Stany wody w Porcie Północnym o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia (P [%]) i okresie powtarzalności [lata] wyznaczone na podstawie danych z lat 1989-2018

Ekstremalne stany wody		
P [%]	Okres powtarzalności [lata]	Stan wody [cm]
1	100	685
2	50	671
5	20	652
10	10	638
25	4	618
50	2	601

W okresie od 1.11.2008 do 31.10.2018 roku w Porcie Północnym odnotowano następujące stany wody w morzu:

- maksymalny: 642 cm,
- średni: 511 cm,
- minimalny: 422 cm.

Okazuje się, że stan maksymalny w ostatnim dziesięcioleciu jest o 22 cm niższy niż absolutne maksimum w historii notowań poziomów wody w Gdańsku. Widać ponadto, że średni stan wody w morzu z ostatnich 10 lat jest o 11 cm wyższy od wartości uznawanej za średnią z długookresowego wielolecia (500 cm).

Charakterystyczne stany wody wyznaczone na podstawie danych z mareografu w Porcie Północnym w latach 1989-2018 przedstawiono w tabl. 4.

Dane zawarte w tabl. 4 wskazują na fakt, że istotnie podniesiony poziom morza (o 1 m i więcej) jest zjawiskiem statystycznie występującym nie częściej niż raz na 2 lata. Podniesienie się poziomu morza o 1,4 ÷ 1,5 m występuje statystycznie raz na kilkanaście lat. W skali długoterminowej (dla okresu 1886-2006) podniesienie się poziomu morza o ponad 1 m i ponad 1,4 m statystycznie występowało odpowiednio raz na około 5 lat i raz na ponad 20 lat (zob. [7]).

W skali długookresowej proces akumulacji osadów na stożku usypowym Wisły zależy głównie od przepływów rzecznych i jest w niewielkim stopniu modyfikowany przez falowanie morskie, zaś w stopniu znikomym – przez krótkotrwałe zmiany poziomu morza, nawet o charakterze spiętrzeń sztormowych. Małe (kilkunastocentymetrowe) wahania poziomu morza nie mają znaczenia w procesie ewolucji stożka. Ponieważ warunki falowe i spiętrzenia sztormowe są nieskorelowane z natężeniem przepływu w rzece (zob. [6]), podczas sztormowego spiętrzenia wód morskich wystąpić może dowolny przepływ rzeczny. Z powyższych przyczyn w modelowaniu zmian dennych ujścia Wisły powodowanych przez reprezentatywny graniczny przepływ płuczający założono średni stan wody w morzu z wielolecia (500 cm).

Na podstawie wyników uprzednich badań modelowych [5] stwierdzono, że przy średnim stanie wody w morzu i ekstremalnie dużym przepływie rzecznoym podniesienie się poziomu wody przy kierownicach nie przekroczy 0,3 m. Poziom wody znajdować się będzie zatem o 0,3 m poniżej rzędnej korony kierownic, która wynosi +0,6 m. Wspomniany uprzednio brak ko-

relacji pomiędzy przepływem rzeczny i stanem wody w morzu wskazuje na zasadność modelowania opcji podwyższenia rzędnej korony istniejących kierownic przy założeniu średniego stanu wody w morzu z długookresowego wielolecia (500 cm).

Dane batymetryczne

Podczas realizacji badań analizie poddano wyniki pomiarów batymetrycznych wykonanych w następujących okresach: sierpień 2009, grudzień 2011-styczeń 2012, czerwiec 2012, październik 2012, wiosna 2013, jesień 2013, lato 2014, jesień 2014, wiosna 2015, jesień 2015, jesień 2018, wiosna 2019 oraz jesień 2019.

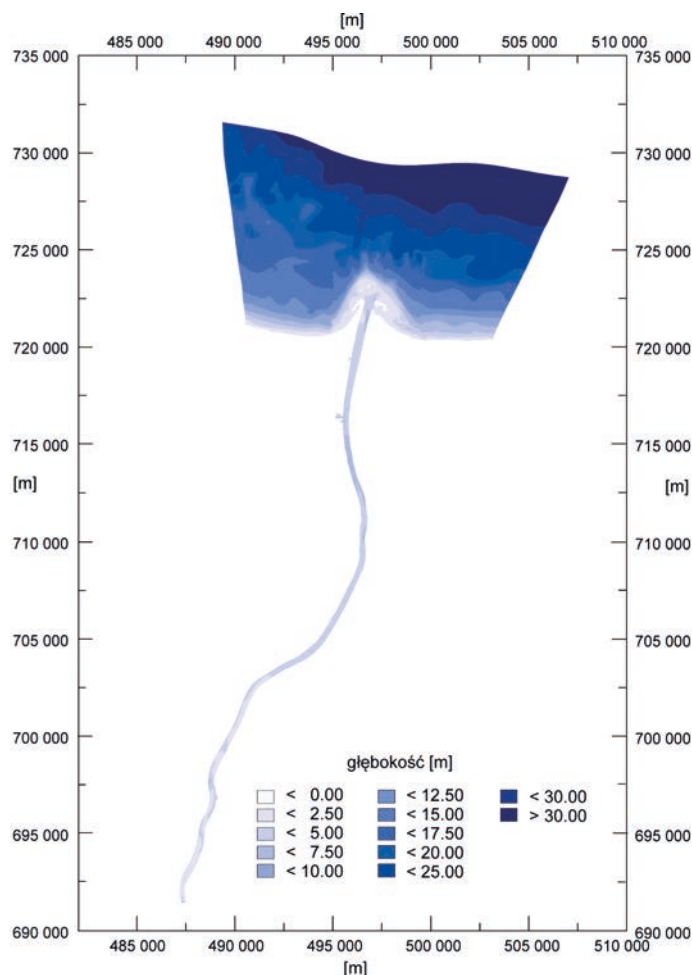
Na mapie batymetrycznej z 2009 roku widoczne było przegłębienie biegnące przy prawym brzegu Wisły od miejsca znajdującego się na dolnym skraju mapy (około 2800 m na południe od ówczesnej głowicy kierownicy wschodniej) do miejsca oddalonego o około 600 m na południe od głowicy. W miejscu tym następowała istotna zmiana układu batymetrycznego, przejawiająca się przejściem przegłębienia na lewy brzeg rzeki. Przegłębienie biegło aż do końca kierownicy zachodniej i dalej pomiędzy dwiema łachami do odmorskiej granicy stożka ujściowego. Była to jedyna wyraźnie ukształtowana rynna odpływowa w ujściu Wisły.

Odmienne przedstawiał się układ głębokościowy na planie batymetrycznym z okresu grudzień 2011 – styczeń 2012, na którym widać było 3 rynny odpływowe – w przybliżeniu na kierunkach NW, NNE i E. Rynny te były mniej wyraźne i płytsze niż rynna na planie z 2009 roku. Na całej długości ujściowego odcinka Wisły przegłębienie (a zatem zapewne także nurt rzeki) biegło przy prawym brzegu. W miejscu dawnej rynny odpływowej w północno-zachodniej części stożka powstał rozległy obszar akumulacyjnych spłyń z niewielką łachą. Duża łacha znajdująca się w 2009 roku na przedłużeniu kierownicy wschodniej (około 300 m od jej głowicy) zmieniała kształt i położenie – głównie wskutek prac pogłębiarsko-refulacyjnych prowadzonych w latach 2010-2011.

Obok wymienionych robót, za zmianę układu sytuacyjno-batymetrycznego pomiędzy latem 2009 roku a przełomem lat 2011/2012 odpowiedzialna jest omówiona uprzednio długotrwała fala powodziowa zanotowana na przełomie maja i czerwca 2010 roku. Prawdopodobnie nie bez znaczenia dla batymetrii morskiej strefy brzegowej był też sztorm, który miał miejsce w dniach 13-15 października 2009 roku. Podczas tego sztormu boja falowa IBW PAN zakotwiczona w rejonie Kątów Rybackich zarejestrowała głębokowodne ($h \approx 20$ m) warunki falowe o parametrach charakterystycznych dla okresu powtarzalności powyżej 100 lat: maksymalna wysokość fali $H_{\max} = 11,82$ m, wysokość fali znacznej $H_s = 6,89$ m, średnia wysokość fal $H_{\text{mean}} = 4,57$ m, średni okres fali $T_{\text{mean}} = 9,5$ s.

Po 2012 roku nie zaobserwowano diametralnych zmian batymetrii na stożku ujściowym Wisły – pomimo przejścia fal powodziowych w kwietniu 2013 i w maju 2014 roku. Odnośne fale powodziowe charakteryzowały się bowiem umiarkowanie wysokimi przepływami i relatywnie krótkim czasem trwania.

W ciągu ostatnich 7 lat zaobserwowano ewolucję kształtu i powierzchni obu łach oraz zmiany położenia linii brzegowej



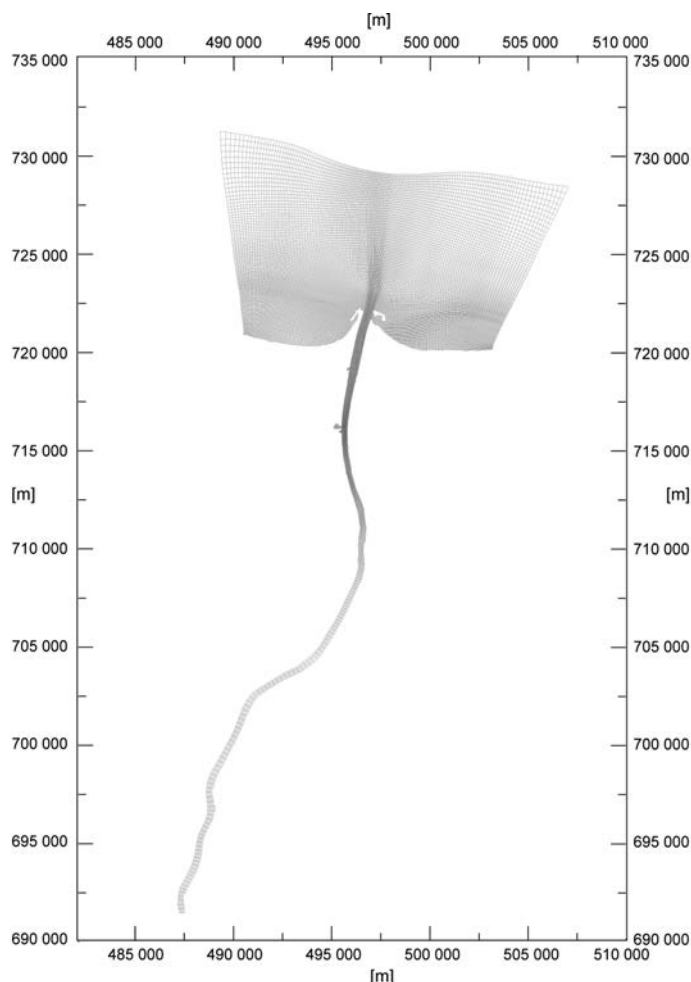
Rys. 10. Batymetria obszaru modelowania (układ współrzędnych PUWG 1992)

morza. Północno-zachodnia łacha powiększyła się i przemieściła w stronę głowicy zachodniego falochronu kierującego. Wschodnia łacha również zwiększała swoją powierzchnię, jednocześnie przemieszczając się w kierunku południowo-zachodnim, a w 2015 roku uzyskała (i utrzymuje do chwili obecnej) łączność z przedłużoną o 200 m kierownicą wschodnią. Na zachód od ujścia rzeki trwa nieprzerwanie proces rozrastania się w kierunku zachodnim i południowo-zachodnim rozległej formy akumulacyjnej. Przyrost brzegu morskiego odbywa się też w „cieniu” wschodniej łachy.

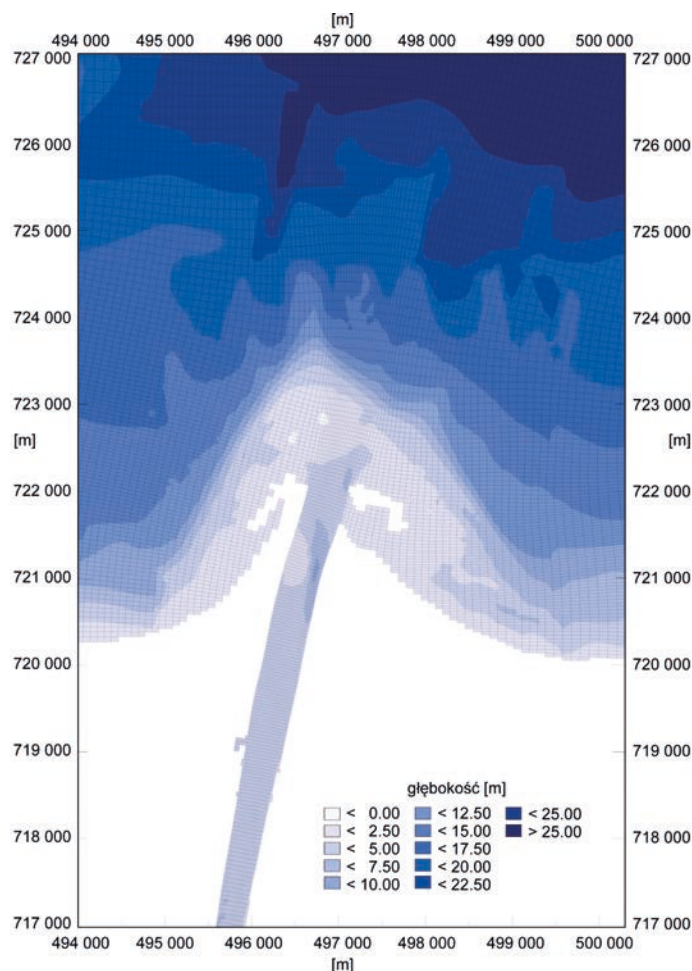
Opisane tendencje akumulacyjne są z jednej strony symptomem postępującego spadku drożności ujścia Wisły, z drugiej zaś – świadczą o istotnej rezerwie materiału budującego łachy, co pozwala na podjęcie (w umiarkowanym zakresie) przedsięwzięć ukierunkowanych na poprawę drożności ujścia z jednoczesnym zminimalizowaniem negatywnego wpływu tych przedsięwzięć na środowiskowe walory obszaru ujściowego.

MODEL NUMERYCZNY

Matematyczne modelowanie przepływów wody wymuszonych oddziaływaniem falowania i prądami rzecznyymi oraz wynikających stąd zmian głębokości w rejonie stożka usypowego wykonano przy wykorzystaniu licencyjnego holenderskiego



Rys. 11. Siatka obliczeniowa (układ współrzędnych PUWG 1992)



Rys. 12. Mapa batymetryczna rejonu stożka ujściowego Wisły z nałożoną siatką obliczeniową (układ współrzędnych PUWG 1992)

pakietu numerycznego Delft3D (wersja 4.01.00)⁸. Delft3D jest modelem trójwymiarowym pozwalającym między innymi na obliczanie niestacjonarnych parametrów przepływu i transportu osadów, przy czym prędkości te mogą być generowane takimi czynnikami jak: wypływy wód rzecznych, prądy generowane wiatrem (prądy dryfowe), różnicami wzniesień zwierciadła wody (prądy gradientalne), różnicami zasolenia i temperatury (prądy gęstościowe), pływami (prądy pływowe) oraz falowaniem (prądy pochodzenia falowego). Uzupełniające obliczenia wykonano duńskim modelem MIKE 21⁹.

Siatkę obliczeniową przystosowano do modelowego operowania na danych batymetrycznych Wisły od Świbna do ujścia oraz przyujściowej morskiej strefy brzegowej z wiosny 2019 roku. Dla odcinka Wisły od Tczewa do Świbna z powodu braku nowszych danych zastosowano archiwalną batymetrię z 2006 roku. Morska część całego obszaru modelowania obejmowała strefę brzegową Zatoki Gdańskiej sięgającą w przybliżeniu po 7 km w kierunku wschodnim i zachodnim od ujścia Wisły, a w głąb morza około 8 km od głowic kierownic. Obszar modelowania z batymetrią przedstawiono na rys. 10, zaś siatkę obliczeniową – na rys. 11. Rozmiar siatki obliczeniowej wynosił

maksymalnie w przybliżeniu 300×300 m (na odmorskich krańcach domeny obliczeniowej), zaś w obrębie stożka był on zagęszczony do kilkunastu metrów. Fragment siatki z batymetrią rejonu stożka ujściowego Wisły przedstawiono na rys. 12.

W wyniku przeprowadzonych analiz stanowiących wstęp do modelowania sformułowano następujące ogólne scenariusze (warianty) modelowania:

- pozostawienie kierownic bez dalszej rozbudowy,
- podwyższenie rzędnej korony istniejących kierownic,
- podjęcie prac bagrowniczych, to jest wykonanie kinety i działania stowarzyszone,
- wydłużenie kierownic,
- wydłużenie kierownic z jednoczesnym wykonaniem kinety i działania stowarzyszone,
- wydłużenie kierownic z jednoczesną zmianą odległości między nimi,
- wydłużenie kierownic z jednoczesną zmianą ich kierunku lub wykonaniem w jednej z nich otwieranego segmentu.

W scenariuszach związanych z wykonaniem kinety tematem badań była również lokalizacja sztucznej łachy (z urobku uzyskanego w ramach prac pogłębiarskich) oraz oszacowanie jej trwałości i tendencji ewolucyjnych, jak również ewolucja istniejących łach.

⁸ Oprogramowanie wykorzystywane w ramach licencji GNU General Public License version 3. Dostawcą oprogramowania jest Deltares, Holandia).

⁹ Wykupiona licencja wraz z rozszerzeniami. Dostawcą oprogramowania jest DHI Polska Sp. z o.o.

Dodatkowym celem badań – obok optymalizacji regulacji ujścia Wisły w kontekście zabezpieczenia przeciwpowodziowego Żuław – było określenie możliwości utrzymania obecnej klasy drogi wodnej (to jest klasy III) lub zapewnienia klasy V.

W scenariuszach związanych z wydłużaniem kierownic rozpatrzono kilka szczegółowych wariantów różniących się wartościami wydłużenia kierownic. Jako minimalne wartości wydłużenia kierownic przyjęto 200 m.

LITERATURA

1. Cerkowniak G. R.: Dynamika stożka ujściowego Wisły w różnych skalach czasowych i przestrzennych, rozprawa doktorska, IBW PAN, Gdańsk 2016.
2. Cerkowniak G. R., Ostrowski R.: Simple approach to long-term morphodynamics of the river delta applied to the Vistula river outlet, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 146, No. 1, 05019002-1-05019002-11, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000529), 2020.
3. Majewski W., Jasińska E., Kapiński J., Ostrowski R., Robakiewicz M., Szmytkiewicz M., Walter M., Gąsiorowski D., Kolarski T., Skaja M., Dziegielewska A., Perfumowicz T., Piotrowska D., Massalski W., Mioduszeński K.: Ekspertyza dotycząca poprawy drożności ujścia rzeki Wisły wraz z projektem budowlano-wykonawczym zabudowy brzegu, Zleceniodawca: Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Gdańsku, Konsorcjum IBW PAN i PPBH Aquaprojekt, Gdańsk 2003.
4. Ostrowski R., Cerkowniak G. R., Piotrowska D., Schönhofer J., Skaja M., Stella M., Szmytkiewicz M., Szmytkiewicz P.: Ujście Wisły – Modelo-

wanie – 2019-2020, Raport końcowy, C2-8/2019, Zleceniodawca: Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie, reprezentowane przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Gdańsku, IBW PAN, Gdańsk 2020.

5. Ostrowski R., Kapiński J., Piotrowska D., Pruszek Z., Robakiewicz M., Różyński G., Schönhofer J., Skaja M., Szmytkiewicz M., Szmytkiewicz P.: Badania modelowe ujścia Wisły do Zatoki Gdańskiej dla potrzeb zadania pt. „Przebudowa ujścia Wisły. Dokumentacja projektowa”, C2-13/2009, Zleceniodawca: Biuro Projektów WUPROHYD Sp. z o.o. w Gdyni, IBW PAN, Gdańsk 2009.
6. Różyński G., Ostrowski R., Pruszek Z., Szmytkiewicz M., Skaja M.: Data-driven analysis of joint coastal extremes near a large non-tidal estuary in North Europe, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Elsevier Science B.V., 68, 2006, 317-327.
7. Wiśniewski B., Wolski T.: Katalogi wezbrań i obniżen szormowych poziomów morza oraz ekstremalne poziomy wód na polskim wybrzeżu, Wyd. Akademii Morskiej w Szczecinie, ISBN 978-83-89901-41-5, 156, 2009.

Prezentowane wyniki badań pochodzą z opracowań wykonanych przez IBW PAN w ramach zadania pn.: Ujście Wisły – Modelowanie – 2019-2020” zrealizowanego na zamówienie Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie – Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Gdańsku na podstawie umowy nr GD.JRP-Ż.9.2019 zawartej w dniu 7 maja 2019 r. Zadanie stanowi element Projektu „Kompleksowe zabezpieczenie przeciwpowodziowe Żuław – Etap II – Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Gdańsku” dofinansowanego przez Unię Europejską z Funduszu Spójności w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2014-2020. Autorskie prawa majątkowe do tych opracowań przysługują Państwowemu Gospodarstwu Wodnemu Wody Polskie i nie mogą być bez jego zgody kopiowane, publikowane ani wykorzystywane.