

Optymalizacja regulacji ujścia Wisły w świetle modelowania teoretycznego

Część 2

**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

Matematyczne modelowanie przepływów wody wymuszonych oddziaływaniem falowania i prądami rzecznyymi oraz wynikających stąd zmian głębokości w rejonie stożka usypowego Wisły wykonano przy wykorzystaniu licencyjnego holenderskiego pakietu numerycznego Delft3D. W całym obszarze obliczeniowym przyjęto podział kolumny wody na 14 warstw, niezależnie od głębokości, w tak zwanym układzie σ . Miąższość każdej warstwy zależy od lokalnej głębokości w danym węźle siatki. Ponadto poszczególne warstwy są różnej miąższości, przy czym najcieńsza jest warstwa przydenna o grubości 2% głębokości. Grubości kolejnych warstw stopniowo rosną, osięgając maksymalnie 15% głębokości, a następnie maleją aż do

warstwy powierzchniowej, której miąższość stanowi 4% głębokości. Dzięki takiemu podziałowi kolumny wody możliwe jest bardziej wiarygodne modelowanie transportu osadów i zmian dennych niż w przypadku warstw o stałej miąższości.

Stożek ujściowy Wisły tworzą piaski kwarcowe o zróżnicowanym uziarnieniu, przy czym w rynnach odpływowych występują osady grubsze niż na pozostałym obszarze stożka. W modelowaniu – analogicznie do badań modelowych Cerkowniaka [1] – przyjęto charakterystyczną średnicę ziaren $d_{50} = 0,4$ mm, co stanowi wartość zbliżoną do górnej granicy średnicy charakterystycznej osadów poza rynnami ($d_{50} = 0,25 \div 0,5$ mm) oraz jednocześnie nieco mniejszą niż dolna granica średnicy cha-

rakterystycznej osadów w obrębie rynien ($d_{50} = 0,5 \div 1,0$ mm). Gęstość szkieletu gruntowego rumowiska przyjęto jako wartość typową dla piasku kwarcowego, to jest $\rho = 2650$ kg/m³.

Kalibrację modelu Delft3D dla rzecznej obszarze obliczeniowego przeprowadzono na podstawie przepływów w Tczewie (kalibracyjne dane wejściowe) i stanów wody w Gdańskiej Głowie, Przegalinie, Świbnie oraz w ujściu Wisły (kalibracyjne dane wyjściowe) dla okresu 22-30 maja 2014 roku. W tym czasie w ujściowym odcinku Wisły przeszła fala wezbraniowa o maksymalnym natężeniu przepływu $Q \approx 4100$ m³/s. Kluczowym parametrem kalibracyjnym był współczynnik oporu przepływu n Manninga. W wyniku kalibracji uzyskano zgodność stanów wody obliczonych i pomierzonych na wymienionych wodowskazach. W celu uzyskania udanej kalibracji modelu przyjęto wartość parametru n zmienną w granicach od 0,04 w Tczewie do 0,022 w ujściu Wisły (podczas gdy w całym obszarze morskim przyjęto $n = 0,02$).

Badaniom modelowym polegającym na wyznaczeniu zmian dennych pod wpływem przejścia reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego $Q = 3500$ m³/s (o czasie trwania $t = 4$ doby) poddano następujące warianty:

- stan istniejący, to jest pozostawienie kierownic bez dalszej rozbudowy,
- podwyższenie rzędnej korony istniejących kierownic o 0,6 m (do rzędnej +1,2 m),
- podjęcie jedynie prac bagrowniczych, to jest wykonanie kinety (czyli podwodnego wykopu inicjującego odpływ wody rzecznej w kierunku prostopadłym do brzegu morskiego) o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,
- wydłużenie obu kierownic o 200 m,
- wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym stopniowym zmniejszeniem ich rozstawu do wartości 300 m (to jest o około 1/3 w stosunku do istniejącego rozstawu),
- wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym stopniowym zwiększeniem ich rozstawu do wartości 600 m (to jest o około 1/3 w stosunku do istniejącego rozstawu),
- wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem w kierownicy wschodniej otwieranego segmentu o długości 90 m,
- wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,
- wydłużenie tylko kierownicy wschodniej o 200 m,
- wydłużenie kierownicy zachodniej o 80 m i wschodniej o 200 m,
- wydłużenie tylko kierownicy wschodniej o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,
- wydłużenie kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 200 m i 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,
- wydłużenie obu kierownic o 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,
- wydłużenie kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 400 m i 600 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m.

Wariant z wydłużeniem kierownicy zachodniej tylko o 80 m przyjęto pomimo pierwotnego założenia minimalnego wydłużania falochronów kierujących o wartość 200 m. Wariant ten sformułowano w celu porównania z wariantem zakładającym wydłużenie obu kierownic o 200 m oraz z wariantem wydłużenia tylko kierownicy wschodniej o 200 m i dokładnego sprawdzenia efektu wydłużania kierownicy zachodniej.

Podstawą oceny oddziaływania i skuteczności rozpatrywanych rozwiązań technicznych była jakościowa i ilościowa analiza porównawcza wyników modelowania uzyskanych dla poszczególnych wariantów z wynikami otrzymanymi dla stanu istniejącego. Przyjęto założenie, że zmiany denne w korycie rzeki (na południe od głowic istniejących kierownic) mają mniejsze znaczenie niż zmiany denne w obrębie platformy stożka ujściowego, rynien odpływowych i odmorskich skłonów stożka.¹

EFEKTY PRZEJŚCIA PRZEPŁYWU PŁCZĄCEGO

Ponieważ warunki falowe i spiętrzenia sztormowe są nieskorelowane z natężeniem przepływu w rzece [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 płuczący założono średni stan wody w morzu z wielolecia (500 cm). Przeprowadzono modelowanie teoretyczne/numeryczne wszystkich wymienionych wariantów. Przykładowe rezultaty przedstawiono i omówiono poniżej.

Wyniki modelowania (batymetrię ujścia w warunkach początkowych i końcowych, czyli po przejściu przepływu płuczącego) dla stanu istniejącego, to znaczy w sytuacji pozostawienia kierownic bez dalszej rozbudowy, przedstawiono na rys. 1.

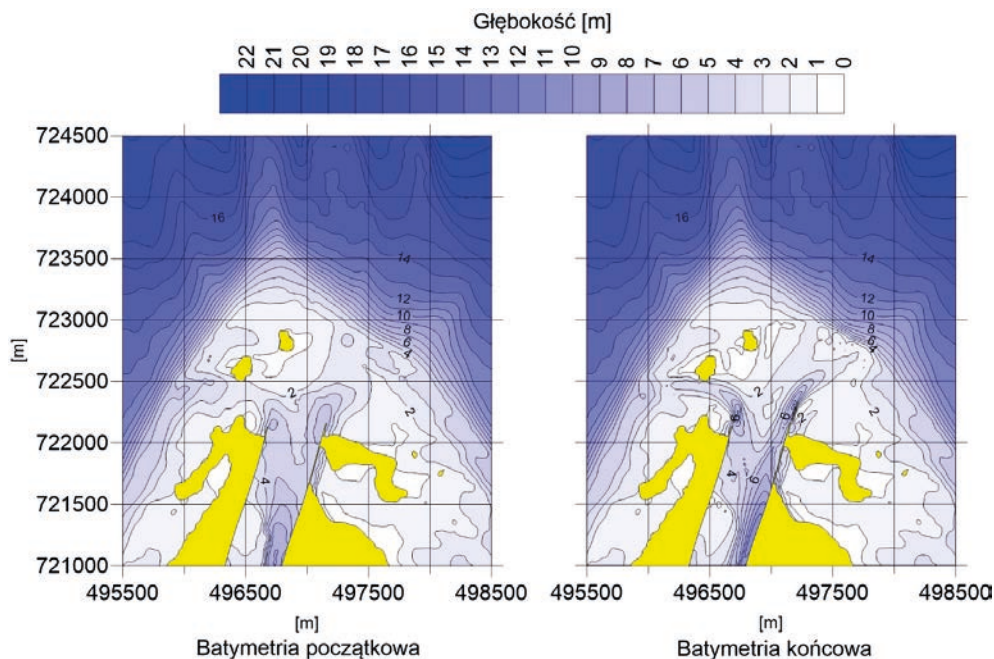
Wyniki modelowania (batymetrię ujścia w warunkach początkowych i końcowych, czyli po przejściu przepływu płuczącego) dla wariantu polegającego na robotach pogłębiarskich bez wydłużania kierownic (wykonanie kinety równoległej do osi kierownic w sąsiedztwie kierownicy wschodniej o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m) przedstawiono na rys. 2.

Wyniki modelowania (batymetrię ujścia w warunkach początkowych i końcowych, czyli po przejściu przepływu płuczącego) dla wariantu z wydłużeniem obu kierownic o 200 m przedstawiono na rys. 3.

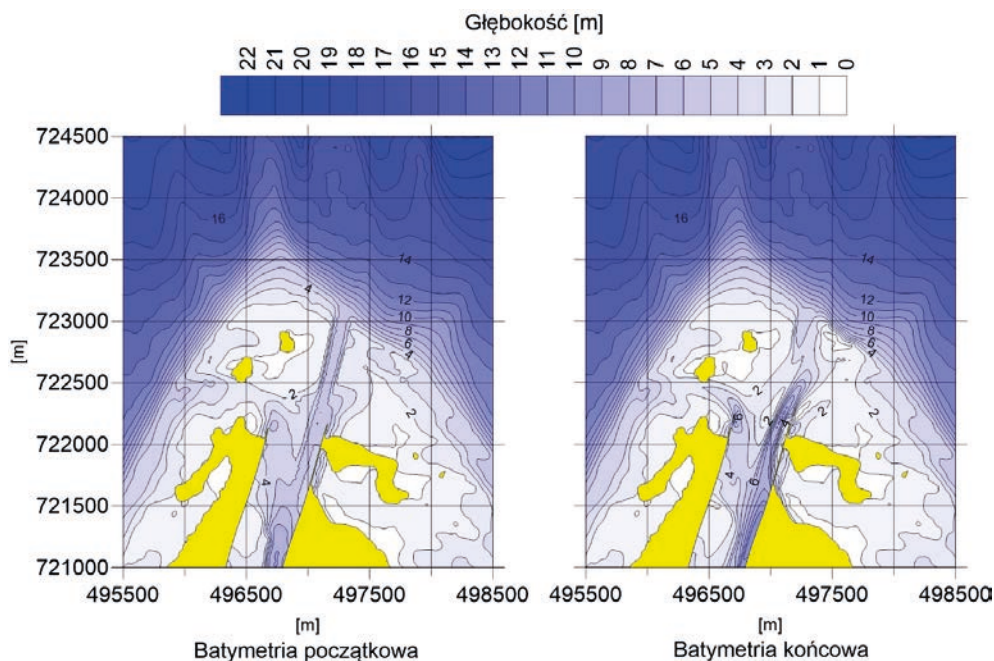
Wyniki modelowania (batymetrię ujścia w warunkach początkowych i końcowych, czyli po przejściu przepływu płuczącego) dla wariantu polegającego na wydłużeniu obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m przedstawiono na rys. 4.

W efekcie obliczeń modelowych okazało się, że w stanie istniejącym reprezentatywny graniczny przepływ płuczący ($Q=3500$ m³/s) spowoduje wystąpienie prądów o prędkościach uśrednionych w kolumnie wody wynoszących maksymalnie $1,5 \div 1,75$ m/s na rozległym obszarze rynny ujściowej położonej na kierunku NNE-NE (zob. batymetria początkowa na rys. 1)

¹ Jak należało się spodziewać, wyniki przeprowadzonych obliczeń modelowych pokazały, że interwencje techniczne poprawiające w mniejszym lub większym stopniu drożność ujścia skutkują bardzo podobnymi jakościowo i ilościowo zjawiskami morfodynamicznymi w ujściowym odcinku koryta Wisły, prawie identycznymi jak prognozowane przez model dla stanu istniejącego.



Rys. 1. Układ batymetryczny ujścia Wisły w warunkach początkowych i końcowych, stan istniejący, $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 4$ doby

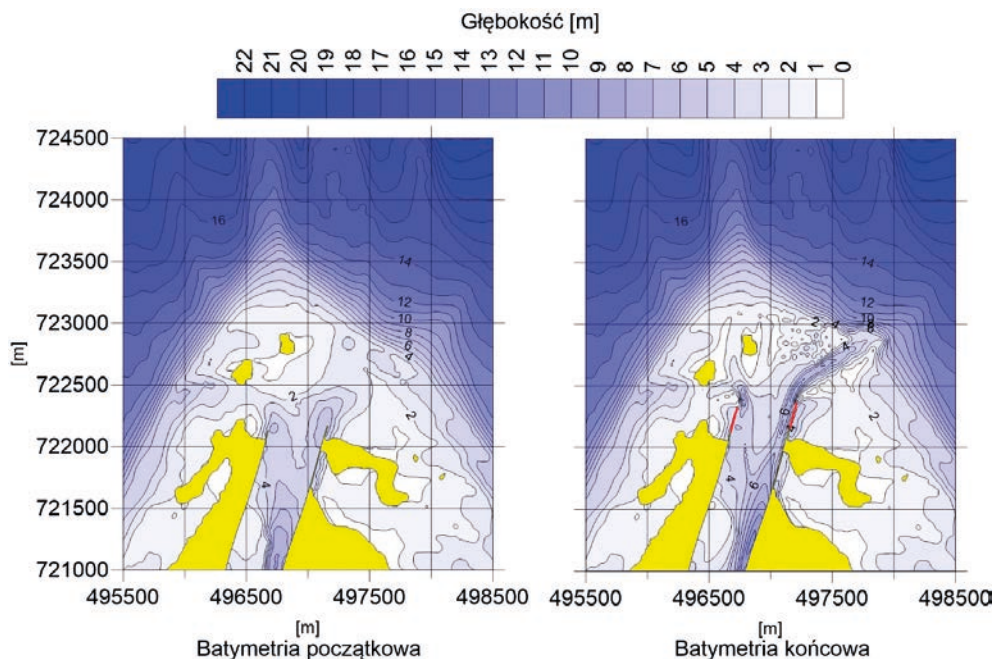


Rys. 2. Układ batymetryczny ujścia Wisły w warunkach początkowych i końcowych po wykonaniu kinety, $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 4$ doby

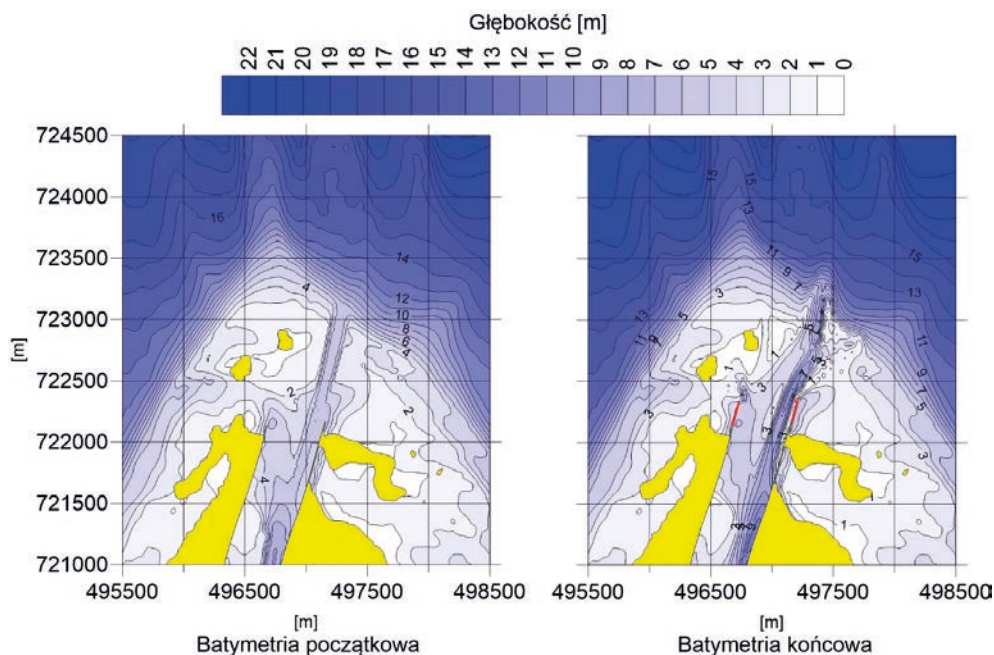
i maksymalnie $1,5 \text{ m/s}$ w rynn timer ujściowej na kierunku WNW (zob. batymetria początkowa na rys. 1), zaś w warstwie przydennej – w obu rynn timer maksymalnie $1,0 \text{ m/s}$. Należy zaznaczyć, że prędkości przepływu wody w warstwie przydennej o wartościach powyżej $0,5 \text{ m/s}$ generują masowy („dywanowy”) ruch piaszczystego rumowiska (ang. *sheet flow*). Po 4 dobach nastąpi pogłębienie się obu rynn timer w bezpośrednim sąsiedztwie głowicy kierownic z 5 m do 6 m . W pozostałym obszarze stożka ujściowego głębokość rynn timer WNW na prawie całej długości zwiększy się z $2 \div 3 \text{ m}$ do $3 \div 4 \text{ m}$, to jest o około 1 m , zaś minimalna głębokość rynn timer NNE-NE pozostanie bez zmian, to jest rzędu $2 \div 3 \text{ m}$ (zob. rys. 1). Ponadto wyniki obliczeń sugerują,

że pogłębieniu się obu rynn timer w sąsiedztwie głowicy kierownic towarzyszyć będzie znaczne spłytenie obszaru między nimi.

W przypadku wykonania kinety sięgającej izobaty -5 m na podmorskim skłonie stożka w tych samych warunkach finalnie po 4 dobach (zob. rys. 2) spodziewać się można wystąpienia lokalnych przegłębień w rynn timer NNE-NE w sąsiedztwie głowicy kierownicy wschodniej (do $6 \div 7 \text{ m}$) i niewielkich przegłębień – do $3 \div 4 \text{ m}$ – w części tej rynn timer przylegającej do podmorskiej krawędzi stożka. Wskutek pojawienia się dominującego odpływu wód rzecznych w kiniecie minimalne głębokości w obrębie rynn timer WNW pozostaną prawie niezmienne.



Rys. 3. Układ batymetryczny ujścia Wisły w warunkach początkowych i końcowych po wydłużeniu obu kierownic o 200 m, $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 4$ doby



Rys. 4. Układ batymetryczny ujścia Wisły w warunkach początkowych i końcowych po wydłużeniu obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety, $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 4$ doby

Wydłużenie obu kierownic o 200 m będzie skutkowało po 4 dobach oddziaływania reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego ($Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$) zwiększeniem prędkości uśrednionej w kolumnie wody w rozległym obszarze rynny ujściowej na kierunku NNE-NE do maksymalnej wartości przekraczającej 2 m/s, zaś w rynnie ujściowej na kierunku WNW – do maksymalnej wartości wynoszącej około 2 m/s. Prędkości przydenne osiągną natomiast wartości odpowiednio 1,0 ÷ 1,25 m/s i około 0,75 m/s. W porównaniu ze stanem istniejącym nastąpi – wskutek oddziaływania wydłużonych kierownic – przesunięcie miejsc występowania silnych prądów rzecznych w rynnach

odpływowych w stronę odmorskich granic stożka. Zaowocuje to (zob. rys. 3) pogłębieniem się rynny NNE-NE na prawie całej długości do 6 ÷ 7 m, a w rejonie krawędzi platformy stożka do 4 ÷ 5 m. W zachodniej części stożka zajdą mniejsze zmiany rzędnych dna. Wypadkowa drożność rynny WNW w zasadzie nie zmieni się. Nastąpi bowiem jej podział na kierunek W, z redukcją minimalnych głębokości do 1 ÷ 2 m, oraz kierunek N (z głębokościami rzędu 1 ÷ 2 m). Na wschód od tej ostatniej – po drugiej stronie północnej łący – pojawi się dodatkowa mini-rynną (również na kierunku N i również z głębokościami wynoszącymi 1 ÷ 2 m).

W wariancie wydłużenia kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety (zob. rys. 4) otrzymano pogłębienie się całej rynny NNE-NE do co najmniej $6 \div 7$ m. Kształt rynny wyprostował się, a jej uśredniony kierunek uległ zmianie na NNE. Wskutek pojawienia się dominującego odpływu wód rzecznych w kiniecie i odcięcia rynny WNW wydłużoną kierownicą zachodnią głębokości w obrębie tej rynny zmniejszą się do $1 \div 2$ m.

Z analizy wszystkich wyników modelowania wyciągnięto następujące wnioski:

- wydłużenie kierownic o 200 m spowoduje wyraźne pogłębienie rynien odpływowych w stożku ujściowym i poprawę warunków odprowadzania wody, osadów oraz lodu,
- wykonanie kinety spowoduje doraźne niewielkie pogłębienie rynien, zaś trwała poprawa warunków odpływu wody, rumowiska i lodu będzie wiązać się z koniecznością powtarzania prac pogłębiarskich,
- zwężenie rozstawu kierownic nie spowoduje zmian w morfologii stożka sprzyjających poprawie warunków odpływu wody, rumowiska i lodu,
- podwyższenie rzędnych istniejących kierownic nie będzie miało wpływu na morfodynamikę stożka ujściowego,
- wydłużenie kierownic o 200 m z jednoczesnym stopniowym zwiększeniem ich rozstawu będzie mniej skuteczne od wydłużenia kierownic o 200 m z zachowaniem istniejącego rozstawu,
- wydłużenie kierownic o 200 m z jednoczesnym pozostawieniem/skonstruowaniem w kierownicy wschodniej niezabudowanego/otwieranego segmentu wywoła nieznaczłą erozję dna w jego bezpośrednim sąsiedztwie, z widocznym (aczkolwiek niewielkim) ujemnym wpływem na skuteczność wydłużenia kierownic,
- wydłużenie kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety poprawi drożność ujścia w nieco większym stopniu niż samo wydłużenie kierownic o 200 m,
- wydłużenie tylko kierownicy wschodniej o 200 m będzie mniej skuteczne od wydłużenia obu kierownic o 200 m w kontekście rynny NNE-NE i odpowiednio skuteczniejsze w kontekście rynny WNW,
- wydłużenie tylko kierownicy wschodniej o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety doprowadzi do uzyskania nieco lepszej drożności ujścia niż w analogicznym przypadku bez kinety,
- wydłużenie kierownicy zachodniej o 80 m i wschodniej o 200 m będzie nieco mniej skuteczne od wydłużenia obu kierownic o 200 m w kontekście rynny NNE-NE i odpowiednio nieco skuteczniejsze w kontekście rynny WNW,
- wydłużenie kierownicy zachodniej o 400 m i wschodniej o 600 m z jednoczesnym wykonaniem kinety nie skutkuje znacznym wzrostem skuteczności płukania ujścia w stosunku do wariantu wydłużenia tych kierownic odpowiednio o 200 m i 400 m (również z wykonaniem kinety, a tym bardziej w stosunku do wariantu wydłużenia obu kierownic o 400 m (z kinetą),
- skuteczność wydłużenia kierownicy wschodniej o 200 m jest w umiarkowanym stopniu mniejsza niż jej wydłużenie o 400 m,

- wariant „200+400+kineta” uznać należy za optymalny, zaś wariant „200+200+kineta” traktować należy jako wariant minimum albo wariant optymalny zredukowany (oszczędnościowy).

UWAGI UZUPEŁNIAJĄCE

Przebudowa kierownic związana z podwyższeniem rzędnej ich korony zmienia kształt i powierzchnię przekroju koryta rzeki w stopniu tak znikomym, że nie ma to znaczenia dla parametrów przepływu. Poza tym rzędna korony kierownic nie ma wpływu na rzeczne procesy morfodynamiczne, ponieważ ruch piaszczystych osadów odbywa się w postaci wlezionej na dnie oraz zawieszanej w warstwie przydennej o niewielkiej miąższości. Dlatego podwyższenie rzędnej korony kierownic uznano za rozwiązanie nieefektywne. Stwierdzono ponadto, że ewentualne podwyższenie rzędnej korony kierownic mogłoby okazać się katastrofalnie niekorzystne w przypadku wystąpienia zatoru lodowego (co ma miejsce przeważnie przy podniesionym poziomie morza). Ograniczona wysokość kierownic umożliwia bowiem w takiej sytuacji odpływ spiętrzonej wody oraz kry lodowej ponad kierownicami.

Wyniki badań modelowych wskazały na to, że zmniejszenie przekroju poprzecznego ujścia rzeki nie poprawiłoby warunków wypływu wody i osadów w stosunku do stanu istniejącego. Rezultaty obliczeń pokazały również, że wydłużenie kierownic z jednoczesnym stopniowym zwiększeniem ich rozstawu byłoby mniej skuteczne od wydłużenia kierownic z zachowaniem istniejącego rozstawu.

Modelowaniu poddano również wariant wydłużenia kierownic o 200 m z jednoczesnym pozostawieniem w kierownicy wschodniej niezabudowanego segmentu o długości 90 m – pomiędzy głowicą istniejącej kierownicy wschodniej i rozważaną częścią wydłużoną. Niezabudowany segment mógłby być wyposażony w okresowo zamykane i otwierane wrota. Tego rodzaju techniczne rozwiązania są jednakże bardzo kosztowne i znajdują zastosowanie jako wrota przeciwpowodziowe (przeciwsztormowe) w zupełnie innych okolicznościach. Można rozważyć pozostawienie trwale niezabudowanego (i niezamykanego) segmentu w celu obniżenia kosztów wydłużenia kierownicy, ale rozwiązanie takie ma pewne wady. Po pierwsze, wydłużona kierownica miałaby charakter wyspowy i wymagałaby skonstruowania dwóch głowic – odlądowej i odmorskiej. Po drugie, uniemożliwiony byłby dostęp do wyspowej kierownicy od strony lądu – bardzo przydatny na przykład w celu obsługi oznakowania nawigacyjnego, inspekcji stanu technicznego budowli, obserwacji przyrodniczych itp.

Ograniczenie działań tylko do przeprowadzenia robót pogłębiarskich, czyli wykonanie kinety, w niewielkim stopniu poprawia drożność ujścia Wisły. W wyniku badań wykonanych przez Ostrowskiego i in. [5] okazało się, że „ograniczenie prac regulujących ujście Wisły tylko do podjęcia prac bagrowniczych jest rozwiązaniem mało efektywnym”. W dużym stopniu potwierdziły to wyniki ostatnich badań [4], w świetle których wykonanie kinety skutkuje znacznie mniejszą poprawą drożności ujścia niż w przypadku wydłużenia kierownic. Analiza danych archiwalnych przez Majewskiego i in. [3] dowiodła, że „... wykonanie kinety w celu ułatwienia rozmycia stożka nie rozwiązuje pro-

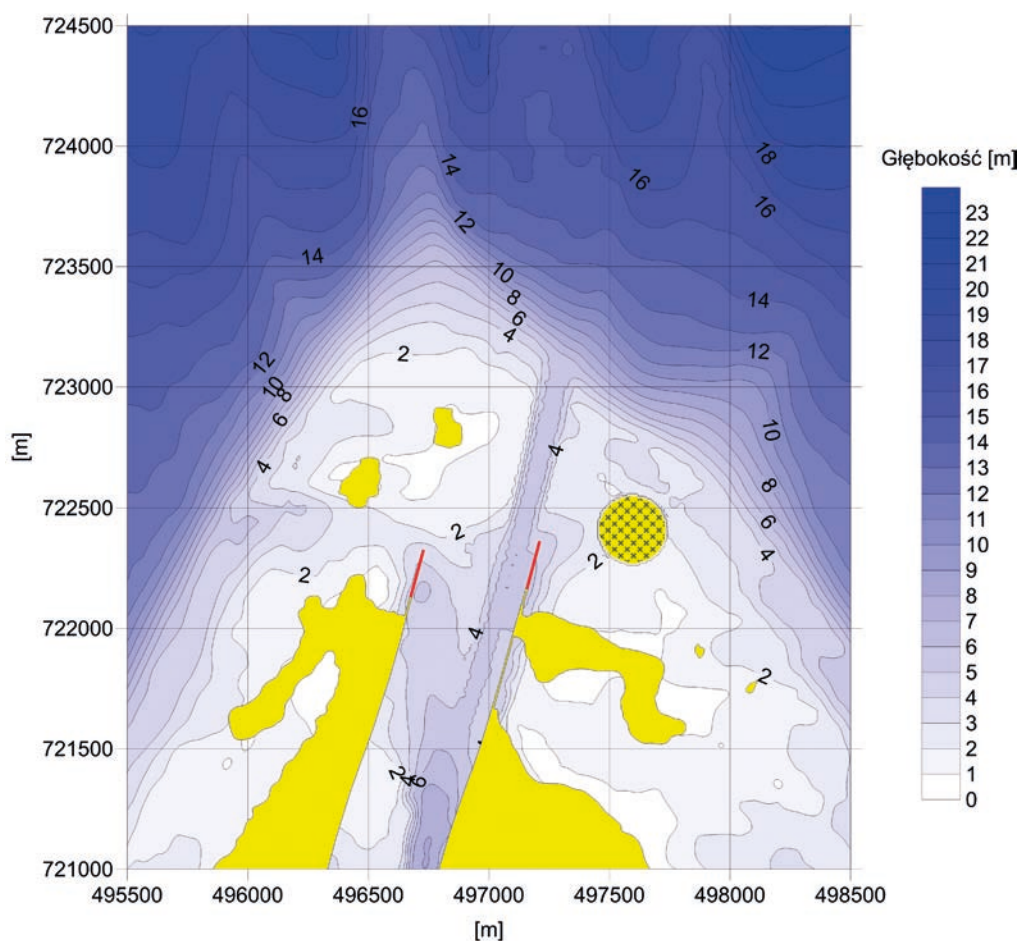
blemu poprawienia drożności uścia w dłuższych skalach czasowych. Słuszności tej tezy dowodzą znikome pozytywne efekty prowadzonych w okresie przed II wojną światową, począwszy od 1906 roku, prac pogłębiarskich w ujściu mających głównie za zadanie utrzymanie głębokości żeglownych rzędu $4 \div 5$ m. W okresie 1906-1937 wydobyto ogółem 2,2 mln m^3 piasku, w latach 1906-1914 wydobywano rocznie od 95 do 346 tys. m^3 , zaś w latach 1923-1928 – od 45 do 105 tys. m^3 . Prowadzone prace pogłębiarskie w rejonie stożka przynosiły tylko krótkotrwały skutek i nie rozwiązywały problemu poprawy warunków odpływu wód ani nie potrafiły zapobiec tworzeniu się zatorów lodowych”. Wyniki ostatnio przeprowadzonego modelowania pokazały jednak, że wydłużenie kierownic z jednoczesnym wykonaniem kinety poprawi drożność uścia w nieco większym stopniu niż samo wydłużenie kierownic.

Odległość odmorskiej krawędzi *plateau* stożka ujściowego Wisły od głównej kierownicy jest obecnie dosyć znaczna i wynosi około 1 km, co utrudnia odprowadzenie rumowiska rzeczno-ego na większe głębokości. Predyktoryjne obliczenia modelowe w małej skali czasowej pokazały, że już wydłużenie kierownicy tylko o 200 m poprawia warunki odpływu wód i osadów w rejonie ujściowym. Jak pokazują liczne analizy, zawarte między innymi w niedawno opublikowanej pracy [2], również w skali długookresowej – obejmującej dziesięciolecia – proces wydłużania ujściowych falochronów kierujących ma kluczowy wpływ na morfodynamikę stożka, a drożność uścia jest ściśle skorelowana z odmorskim zasięgiem kierownicy.

Analiza wyników badań modelowych oraz studia literaturowe pokazały, że wykonanie kinety w celu poprawy drożności uścia jest rozwiązaniem mało efektywnym. Z drugiej strony okazało się, że wydłużenie kierownic z jednoczesnym wykonaniem kinety poprawi drożność uścia w nieco większym stopniu niż samo wydłużenie kierownic.

Celem badań Ostrowskiego i in. [4] było wskazanie optymalnego rozwiązania technicznego spełniającego kryteria zrównoważonego rozwoju i uwzględniającego zasady ochrony środowiska naturalnego. Nie ulega wątpliwości, że wydłużanie kierownicy stanowi oddziaływanie na lokalne środowisko przyrodnicze (obszar Natura 2000, rezerwat przyrody). Efektem wydłużania kierownicy jest bowiem z jednej strony poprawa drożności uścia, z drugiej zaś – zaburzenie procesu naturalnego powstawania i ewolucji piaszczystych łach. Dlatego zakres prac regulacyjnych w ujściu Wisły z lat 2011-2015 obejmował między innymi wykorzystanie materiału z robót czerpalnych (w ilości około 180 000 m^3) do usypiania sztucznej łachy. Realizacja zasady przezorności – poprzez wdrożenie tego działania stowarzyszonego już wcześniej wiosną 2011 roku – okazała się korzystna w skutkach, tworząc dodatkową powierzchnię piaszczystych siedlisk dla ptaków i fok.

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, przyjęto wykonanie kinety jako niezbędnego środka uzupełniającego wydłużenie



Rys. 5. Lokalizacja planowanej sztucznej wyspy

kierownic. Założono, że bardzo niewielka część urobku z tych robót czerpalnych może być wykorzystana na miejscu, na przykład do zasypów konstrukcji kierownic i głowic kierownic.

Prace pogłębiarskie związane z wykonaniem kinety o szerokości 60 m i rzędnej dna -5 m wiązać się będą z wyczerpaniem piaszczystego rumowiska o objętości około 250 000 m³. Zaproponowano wykorzystanie tego urobku do uformowania sztucznej wyspy jako działania stowarzyszonego stanowiącego kompensację przyrodniczą robót hydrotechnicznych w ujściu Wisły. Podobnie jak w przypadku sztucznej wyspy usypanej w 2011 roku lokalizację proponowanej sztucznej wyspy przewidziano po wschodniej stronie ujścia. Lokalizacja taka jest korzystna, ponieważ nie koliduje z kierunkiem udrożniania ujścia, gdyż migracja sztucznej wyspy następować będzie najprawdopodobniej w kierunku południowym, tak jak migracja wyspy narefulowanej w 2011 roku. Za optymalny uznano kształt kolisty, z jednej strony zapewniający maksymalną trwałość wyspy, z drugiej zaś – będący najbardziej neutralnym dla morskich procesów hydrodynamicznych i umożliwiający ewolucję sztucznej wyspy pod wpływem tych procesów w sposób najbardziej harmonijny z naturą. Przyjęto średnicę wyspy wynoszącą około 275 m. Z kubatury dostępnego materiału i naturalnych głębokości w miejscu planowanej refulacji (średnio około 2 m) wynikała rzędna powierzchni wyspy, wynosząca około 2,2 m n.p.m. Lokalizację planowanej sztucznej wyspy przedstawiono na rys. 5.

DŁUGOTERMINOWE EFEKTY DZIAŁANIA FAL I PRĄDÓW

Zmiany dna morskiego w obrębie stożka ujściowego Wisły poza okresami występowania przepływów płuczących zachodzą wskutek występowania złożonych warunków prądowo-falowych (fal i prądów pochodzenia falowego oraz prądu rzeczno-). Do określenia reprezentatywnych warunków falowych powodujących erozję stożka posłużyły wyniki analizy falowania z wielolecia. Ze względu na to, że parametry warunków falowych są nieskorelowane z natężeniem przepływu w rzece, podczas falowania o dowolnych parametrach wystąpić może dowolny przepływ rzeczny. Na potrzeby realizacji niniejszych badań założono oddziaływanie reprezentatywnych warunków falowych występujących w średnim roku statystycznym z jednoczesnym przepływem średnim z wielolecia SSQ (1048 m³/s).

Kolejność wystąpienia warunków falowych (wpływających na procesy morfodynamiczne) – w odniesieniu zarówno do wysokości, jak i kierunku podchodzenia fal – jest losowa. Dlatego w toku analizy wyników modelowania procesów erozyjno-akumulacyjnych zachodzących na stożku w okresach poza występowaniem przepływów płuczących zastosowano metodę obwiedni, to jest przedstawiania możliwych zmian dennych wywołanych przez falowanie z dziewięciu kierunków (W, WNW, NW, NNW, N, NNE, NE, ENE i E) we wszystkich klasach wysokości fal znacznych (co 0,5 m). Ogółem analizie poddano zmiany denne zachodzące pod wpływem 78 zestawów warunków falowych z przypisanym im czasem trwania w średnim roku statystycznym oraz pod wpływem jednoczesnego oddziaływania przepływu SSQ = 1048 m³/s.

W ramach modelowania długoterminowych oddziaływań prądowo-falowych przeprowadzono symulacje dwóch scenariuszy:

- oddziaływania warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym,
- oddziaływania warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym po uprzednim przejściu reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego.

Uprzednio – w toku modelowania efektów oddziaływania przepływu płuczącego – stwierdzono, że wydłużanie kierownicy zachodniej o więcej niż 200 m i wschodniej o więcej niż 400 m skutkuje korzyściami (przejawiającymi się poprawą drożności ujścia) niewspółmiernie małymi w relacji ze zwiększeniem nakładów inwestycyjnych. Jednocześnie ustalono, że zaprzestanie dalszej regulacji ujścia lub wydłużanie kierownic o mniej niż około 200 m może być działaniem niewystarczającym. Z drugiej strony, korzystniejsze wydaje się wydłużanie kierownic krótkimi odcinkami przy jednoczesnej obserwacji zmian zachodzących w ujściu. W latach 2011-2015 wyremontowano obie kierownice, zaś wydłużono tylko wschodnią o 200 m, między innymi ze względu na minimalizację oddziaływań na środowisko przyrodnicze (przy czym osiągnięto istotną doraźną poprawę drożności ujścia). Uznano, że aspekt uwzględniający uwarunkowania przyrodnicze powinien znaleźć zastosowanie również przy realizacji obecnie planowanej przebudowy ujścia.

Z powyższych względów badaniom długoterminowych efektów oddziaływań prądowo-falowych poddano następujące warianty:

- stan istniejący, to jest pozostawienie kierownic bez dalszej rozbudowy,
- wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m (wariant optymalny zredukowany, czyli oszczędnościowy),
- wydłużenie kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 200 m i 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m (wariant optymalny).

Wartości uzyskanych w wyniku modelowania zmian erozyjnych i akumulacyjnych w przypadku poszczególnych sytuacji prądowo-falowych mieściły się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu centymetrów. Najintensywniejszą erozję otrzymywano dla odmorskich skłonów stożka, akumulację zaś – dla odmorskich rejonów *plateau* stożka.

Pomimo uzyskanych na drodze modelowania znacznych zmian dennych we wszystkich analizowanych wariantach każdorazowo utrzymywała się na płaszczyźnie stożka rynna odpływowa. Jako miarę drożności ujścia przyjęto minimalne głębokości w owej rynnie po modelowym oddziaływaniu poszczególnych sytuacji hydrodynamicznych.

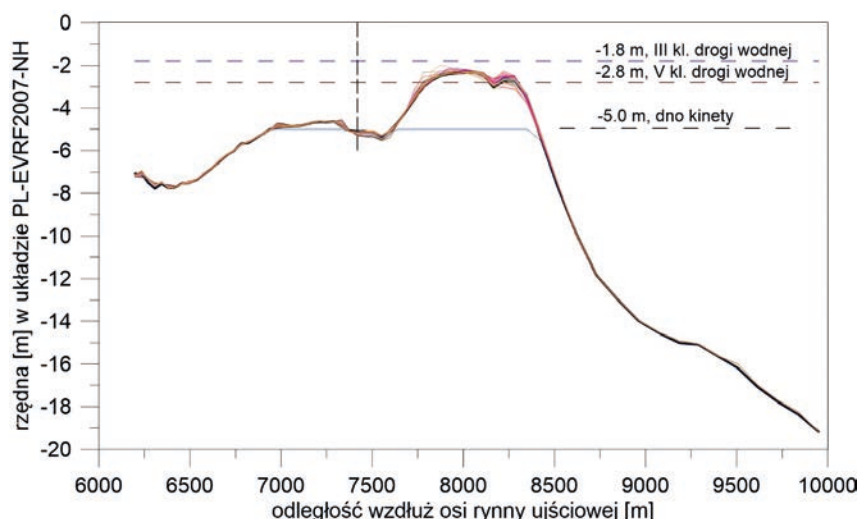
W toku badań przyjęto dwa kryteria drożności ujścia Wisły: 1) zapewnienie głębokości umożliwiających pracę lodołamaczy, to jest minimum 1,8 m oraz 2) zapewnienie głębokości żeglugowych na torze o szerokości minimum 50 m i głębokości tranzytowej 2,8 m. Powyższe parametry określają odpowiednio III (szerokość szlaku 40 m i głębokość 1,8 m) i V (szerokość szlaku 50 m i głębokość 2,8 m) klasę drogi wodnej.

W każdym modelowym przypadku (wariancie zabudowy i zestawu parametrów oddziaływania hydrodynamicznego) w batymetrii końcowej (wynikowej) zidentyfikowano profil dna o szerokości wynoszącej co najmniej 40 m, przebiegający po najmniejszych głębokościach rynny odpływowej w obrębie platformy stożka. Wartość 40 m odpowiada szerokości szlaku żeglownego wymaganej dla III klasy drogi wodnej. Poniżej zamieszczono rysunki (rys. 6 ÷ 10) przedstawiające wyniki obliczeń dla następujących przypadków:

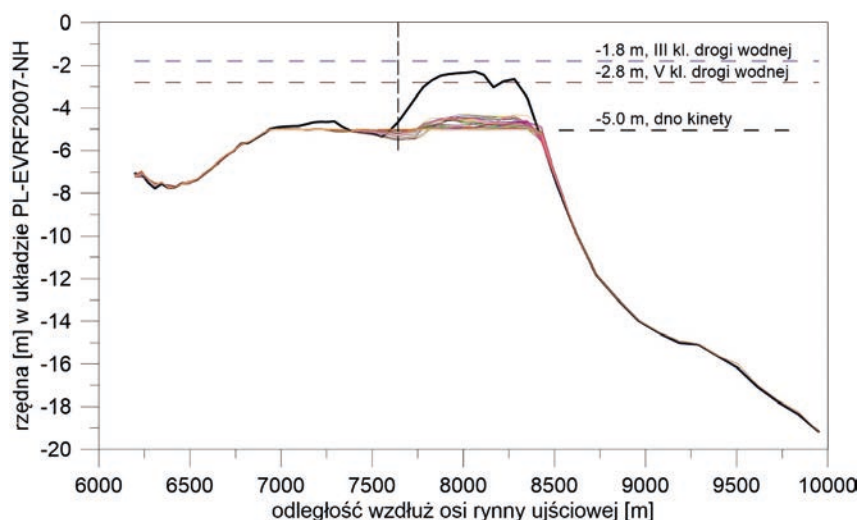
- stan istniejący, obwiednie końcowej batymetrii po oddziaływaniu 78 zestawów falowania wraz z przepływem SSQ (rys. 6),
- obie kierownice wydłużone o 200 m i wykonana kineta, obwiednie końcowej batymetrii po oddziaływaniu 78 zestawów falowania wraz z przepływem SSQ (rys. 7),
- obie kierownice wydłużone o 200 m i wykonana kineta, obwiednie końcowej batymetrii po przejściu reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego i następującym po nim oddziaływaniu 78 zestawów falowania wraz z przepływem SSQ (rys. 8),

- kierownica zachodnia i wschodnia wydłużone odpowiednio o 200 m i 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety, obwiednie końcowej batymetrii po oddziaływaniu 78 zestawów falowania wraz z przepływem SSQ (rys. 9),
- kierownica zachodnia i wschodnia wydłużone odpowiednio o 200 m i 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety, obwiednie końcowej batymetrii po przejściu reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego i następującym po nim oddziaływaniu 78 zestawów falowania wraz z przepływem SSQ (rys. 10).

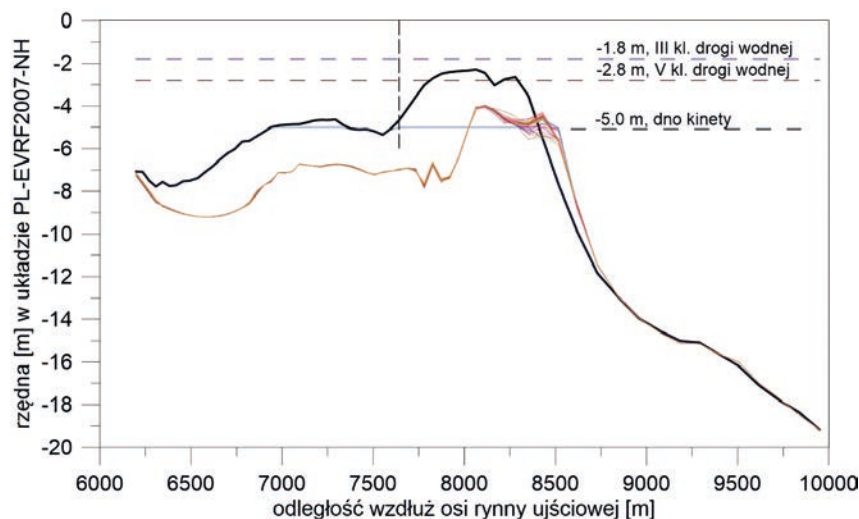
Na rys. 6 ÷ 10 pionowymi liniami przerywanymi zaznaczono odmorski zasięg kierownic istniejący w analizowanych przypadkach. Na każdym rysunku poziomymi liniami zaznaczono rzędne dna -1,8 m oraz -2,8 m, odpowiadające odpowiednio III i V klasie drogi wodnej. Krzywa wykreślona grubą linią – łatwa do zidentyfikowania na rys. 7 ÷ 10, nie wyróżniająca się natomiast wśród obwiedni wyników na rys. 6 – oznacza profil głębokości w stanie istniejącym. Profil ten charakteryzuje się znaczną wypukłością dna o głębokościach leżących pomiędzy rzędnymi -1,8 m i -2,8 m. W stanie istniejącym (początkowym) widoczny



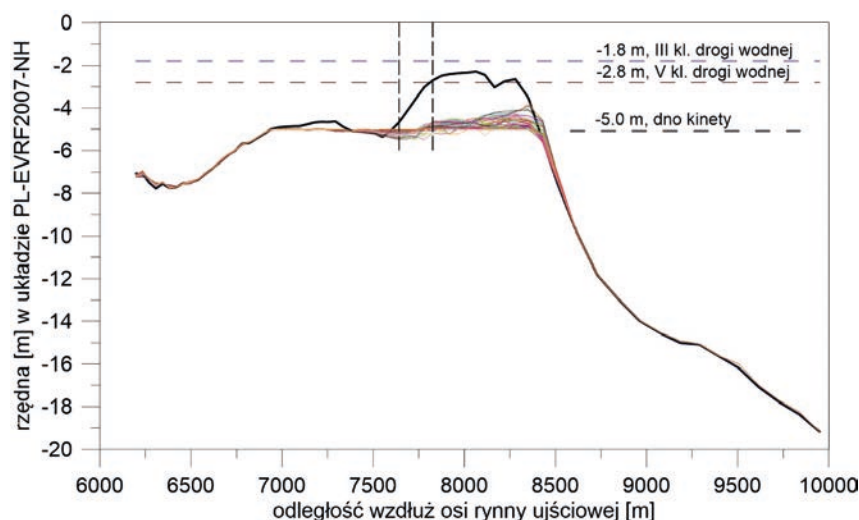
Rys. 6. Obwiednie końcowej batymetrii rynny odpływowej na stożku ujściowym Wisły dla stanu istniejącego po oddziaływaniu reprezentatywnych warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym (pokazano również teoretyczny poziom dna kinety)



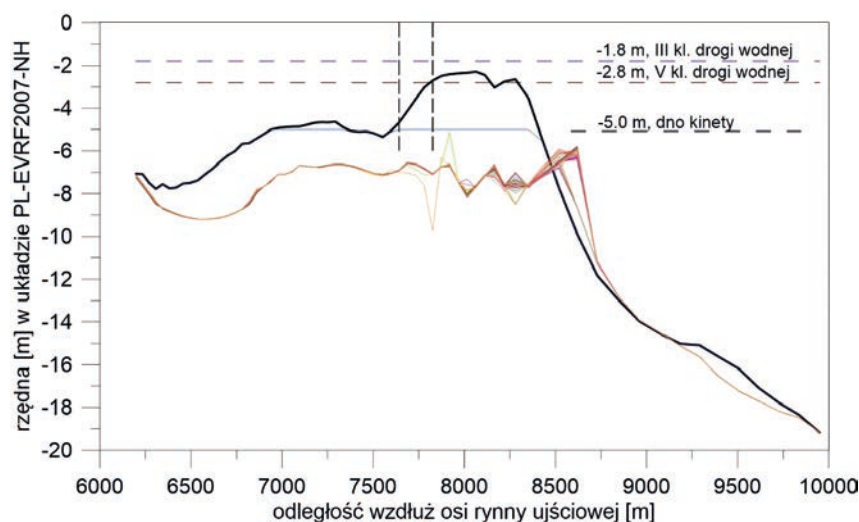
Rys. 7. Obwiednie końcowej batymetrii rynny odpływowej na stożku ujściowym Wisły dla wariantu obu kierownic wydłużonych o 200 m i wykonanej kinety po oddziaływaniu reprezentatywnych warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym



Rys. 8. Obwiednie końcowej batymetrii rynny odpływowej na stożku ujściowym Wisły dla wariantu wydłużenia obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety po przejściu reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego i następującym po nim oddziaływaniu reprezentatywnych warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym



Rys. 9. Obwiednie końcowej batymetrii rynny odpływowej na stożku ujściowym Wisły dla wariantu wydłużenia kierownicy zachodniej o 200 m i wschodniej o 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety po oddziaływaniu reprezentatywnych warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym



Rys. 10. Obwiednie końcowej batymetrii rynny odpływowej na stożku ujściowym Wisły dla wariantu wydłużenia kierownicy zachodniej o 200 m i wschodniej o 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety po przejściu reprezentatywnego granicznego przepływu płuczącego i następującym po nim oddziaływaniu reprezentatywnych warunków prądowo-falowych w średnim roku statystycznym

jest zatem fakt spełnienia głębokościowego kryterium III klasy drogi wodnej (aczkolwiek z niewielkim zapasem). Nie jest natomiast spełnione kryterium V klasy drogi wodnej.

Każdy z rys. 6 ÷ 10 zawiera wyniki modelowania dla 78 wymuszeń hydrodynamicznych i dlatego – jak uprzednio przyjęto (wobec losowości i nieprzewidywalności kolejności występowania poszczególnych zestawów warunków falowych wyznaczonych dla średniego roku statystycznego) – wyniki obliczeń zinterpretowano metodą obwiedni. W ramach tej analizy kluczowe znaczenie miały obliczone ekstremalne rzędne dna wzdłuż profilu, w szczególności – skrajnie wysokie rzędne dna, kształtujące warunki odpływu wód, rumowiska i kry lodowej oraz warunki żeglugowe drogi wodnej.

W wyniku obliczeń zmian dennych okazało się, że oddziaływanie jednego tylko zestawu parametrów hydrodynamicznych (czyli warunków falowych ze współoddziaływaniem przepływu SSQ) może spłycić drogę wodną lokalnie nawet o 40 ÷ 50 cm. Obwiednie potencjalnych zmian dennych wskazują na możliwość wystąpienia jeszcze większych spłyceń przy wystąpieniu niekorzystnej sekwencji warunków falowych.

W przypadku wykonania kinety zapas głębokości jest wystarczający, aby z dużym prawdopodobieństwem po zaistnieniu wszystkich warunków falowych w średnim roku statystycznym utrzymała się III klasa drogi wodnej, a w skali kilku miesięcy – po zaistnieniu części z nich – nawet klasa V. Jeżeli niedługo po wykonaniu kinety wystąpi reprezentatywny graniczny przepływ płuczący, to – pomimo spowodowanego jego oddziaływaniem lokalnego spłyceń w obrębie kinety – następujące w dalszej kolejności zmiany denne wywołane falowaniem wystąpią głównie na odmorskim skraju stożka ujściowego, w małym stopniu oddziałując na głębokość drogi wodnej.

Powyższe wyniki modelowania potwierdzają uprzednio wysnuty wniosek, że wykonanie kinety jako środek uzupełniający wydłużenie kierownic byłoby korzystne.

OCENA OPTYMALNEGO ROZWIĄZANIA W PERSPEKTYWIE 10 LAT

Kineta w wersji oszczędnościowej

Kwestia robót czerpalnych ukierunkowanych na pozyskanie materiału piaszczystego do usypania sztucznej wyspy w ramach kompensacji przyrodniczej ma dużą rangę. Szacunkowy (na podstawie ekspertyzy Ostrowskiego i in. [5]) koszt wykonania kinety stanowiłby kilka procent kosztów wydłużenia obu kierownic o 200 m. W celu redukcji nakładów inwestycyjnych z jednoczesnym zachowaniem planu usypania wyspy rozważyć można wykonanie kinety o rzędnej dna wynoszącej -4 m (zamiast zakładanej w modelowaniu rzędnej -5 m), z utrzymaniem planowanej szerokości w dnie 60 m. W takim przypadku kubatura robót pogłębiarsko-refulacyjnych wyniosłaby około 125 000 m³ (zamiast 250 000 m³).

Ze względu na intensywność zmian dennych w obrębie stożka ujściowego pod wpływem łącznego oddziaływania warunków falowo-prądowych w średnim roku statystycznym i możliwość szybkiego spływania się kinety rzędna dna wynosząca -4 m stanowi mały zapas głębokości, szczególnie w odniesieniu

do kryterium V klasy drogi wodnej. Dlatego kinetę o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -4 m traktować należy jako kinetę w wariancie minimum.

W przypadku wykonania kinety o rzędnej dna wynoszącej -5 m i przy występowaniu warunków falowo-prądowych charakterystycznych dla średniego roku statystycznego w celu utrzymania w ujściu V klasy drogi wodnej prace pogłębiarskie trzeba będzie powtarzać w odstępie około 2 lat. Biorąc pod uwagę prawdopodobne niecałkowite zapiaszczanie się kinety, kubatura tych prac wyniesie około 1 mln m³/10 lat.

W przypadku wykonania kinety o rzędnej dna wynoszącej -4 m i przy występowaniu warunków falowo-prądowych charakterystycznych dla średniego roku statystycznego w celu utrzymania w ujściu V klasy drogi wodnej prace pogłębiarskie trzeba będzie powtarzać w odstępie co najmniej 1 roku. Biorąc pod uwagę prawdopodobne całkowite zapiaszczanie się kinety, kubatura tych prac wyniesie około 1,25 mln m³/10 lat.

Powyższe szacunki odnoszą się do wariantu działań polegających na pracach bagrowniczych (wykonanie kinety) oraz do wariantu wykonania kinety wraz z wydłużeniem obu kierownic o 200 m, jak również do wariantu wykonania kinety wraz z wydłużeniem kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 200 m i 400 m. Mechanika ruchu osadów morskich przesądza o tym, że kineta o rzędnej dna -5 m lub -4 m wykopana na naturalnych głębokościach 2 ÷ 3 m podlegać będzie systematycznemu zapiaszczaniu nie tylko podczas warunków sztormowych, ale również w warunkach oddziaływania falowania o umiarkowanej intensywności. Tego rodzaju podwodne wykopy, na przykład portowe tory podejściowe, nie mają szans utrzymania się przez dłuższy czas. Dlatego falochrony portowe wyprowadzane są najczęściej na głębokości odpowiadające wymaganiom głębokościowym obowiązującym w tych portach². W przypadku ujścia Wisły długoterminowe samoistne utrzymanie się kinety wymagałoby wydłużenia obu kierownic o około 1 km. Ewentualność tak znacznego wydłużenia kierownic omówiono w dalszej części artykułu.

Identyfikacja istniejącego profilu dna o szerokości wynoszącej co najmniej 40 m, przebiegającego po najmniejszych głębokościach rynny odpływowej w obrębie platformy stożka (na przykład rys. 7) o rzędnych niższych niż -1,8 m świadczy o tym, że obecnie parametry szlaku żeglownego wymagane dla III klasy drogi wodnej są spełnione. Na mapach batymetrycznych z lat 2009-2019 widać co najmniej jedną rynną ujściową (w różnych lokalizacjach i o różnym kształcie) o głębokości wynoszącej co najmniej 2 m. Mogłoby się wydawać, że do utrzymania III klasy drogi wodnej niepotrzebne są prace bagrownicze. Problemem nie jest jednakże brak rynny odpływowej o minimalnej szerokości 40 m i głębokości 1,8 m, ale częsta zmienność jej położenia i wynikająca z tego faktu trudność w ewentualnym utrzymaniu odpowiedniego nawigacyjnego oznakowania toru wodnego. Dlatego – mając na względzie przewidywany proces systematycznego zapiaszczania – utrzymanie stałego oznakowanego toru wodnego gwarantującego kryteria III klasy drogi wodnej

² Dotyczy to w szczególności małych portów, o wymaganych głębokościach nawigacyjnych rzędu 4 ÷ 5 m (na przykład Łeba, Władysławowo), w których i tak – pomimo wyprowadzenia falochronów na duże odległości od brzegu – konieczne są okresowe roboty czerpalne na wejściach portowych. Inaczej jest w dużych portach, na przykład w Porcie Północnym w Gdańsku, z falochronami sięgającymi głębokości kilkunastu metrów, gdzie wejścia portowe i portowe tory podejściowe są zapiaszczane ze znacznie mniejszą intensywnością.

wymagałoby wykonania kinety o rzędnej dna wynoszącej -4 m. Utrzymanie kształtu i głębokości tej kinety wymagałoby okresowego wykonywania prac pogłębiarskich o uprzednio oszacowanej kubaturze, to jest około 1,25 mln m³/10 lat.

Wykonanie kinety jako środka uzupełniającego wydłużenie kierownic będzie korzystne jako natychmiastowe uzyskanie V klasy drogi wodnej z dużym zapasem głębokości na okres co najmniej kilku miesięcy. Będzie również korzystne w celu utrzymania III klasy drogi wodnej z dużym zapasem głębokości najprawdopodobniej na okres kilkunastu miesięcy.

Przewidywane kubatury robót bagrowniczych zapewniających utrzymanie V klasy drogi wodnej w ujściu Wisły są w perspektywie 10 lat znaczne. Nie są jednak zadziwiające, gdy uwzględnimy fakt, że jest to ujście typu deltowego. O ile ujścia rzek typu lejkowatego (ze względu na płuczące działanie prądów pływowych) sprzyjają żegludze, a nawet funkcjonowaniu dużych portów morskich, o tyle ujścia typu deltowego (w szczególności dużych rzek, niosących znaczne ilości rumowiska) stwarzają problemy żeglugowe nawet dla jednostek o niewielkim zanurzeniu. W świetle powyższego korzystną okolicznością jest z pewnością istnienie połączenia dolnej Wisły z morskimi wodami wewnętrznymi poprzez służę w Przegalinie i Martwą Wisłę oraz Wisłę Śmiałą drogą wodną o klasie Vb³. W takiej sytuacji należałoby się zastanowić nad sensem działań zmierzających do uzyskania w ujściu Wisły wyższej klasy drogi wodnej niż obowiązującej obecnie klasy III.

Skuteczność planowanych działań w perspektywie 10 lat

W opracowaniu Majewskiego i in. [3] zalecono – w ramach tak zwanego wariantu optymalnego – przedłużenie kierownicy zachodniej o 560 m i wschodniej o 760 m. Odległości pomiędzy głowicą kierownicy zachodniej i wschodniej (na przedłużeniu osi kierownic) a izobatą -5 m wynosiły wówczas odpowiednio około 750 m i 950 m.

W ramach kolejnej ekspertyzy Ostrowski i in. [5] stwierdzili, że najskuteczniejszym długofalowym rozwiązaniem będzie wydłużenie kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 1170 m i 900 m z jednoczesnym wykonaniem kinety wzdłuż kierownicy wschodniej, zaś za kompromisowe rozwiązanie uznali wydłużenie kierownic odpowiednio o 770 m i 900 m z jednoczesnym wybagrowaniem kinety. Czas skutecznego oddziaływania kierownic wydłużonych według powyższych wariantów szacowano odpowiednio na około 15 i 10 lat, przy czym jako kryterium skuteczności przyjęto utrzymywanie się w ujściu głębokości co najmniej 3 m na szerokości około 50 m. Odległości pomiędzy głowicą kierownicy zachodniej i wschodniej (na przedłużeniu osi kierownic) a izobatą -5 m wynosiły wówczas odpowiednio około 1250 m i 900 m. Proponowano zatem utrzymanie drożności ujścia w skali wielolecia poprzez wydłużenie kierownic do miejsc występowania głębokości rzędu 4 ÷ 5 m.

Według batymetrii z jesieni 2019 roku odległość pomiędzy głowicą wyremontowanej kierownicy zachodniej (w osi kierownicy) a izobatą -5 m wynosi nadal około 1250 m, zaś pomiędzy

głowicą wydłużonej o 200 m kierownicy wschodniej (w osi kierownicy) a izobatą -5 m – około 870 m. W toku obecnego modelowania stwierdzono, że wydłużanie kierownicy zachodniej o więcej niż 200 m i wschodniej o więcej niż 400 m skutkuje korzyściami (przejawiającymi się poprawą drożności ujścia) niewspółmiernie małymi w relacji ze zwiększeniem nakładów inwestycyjnych. Ponadto, co należy jeszcze raz podkreślić, korzystniejsze jest wydłużanie kierownic krótkimi odcinkami przy jednoczesnej obserwacji zmian zachodzących w ujściu. Ostatnia inwestycja w ujściu Wisły z lat 2011-2015 ograniczała się do remontu obu istniejących kierownic i wydłużeniu tylko kierownicy wschodniej o 200 m głównie ze względu na minimalizację oddziaływań na środowisko przyrodnicze (przy czym osiągnięto istotną doraźną poprawę drożności ujścia). Biorąc pod uwagę presję, której oddziaływania można się spodziewać ze strony instytucji i organizacji reprezentujących ekologiczny/środowiskowy punkt widzenia, autorzy niniejszej pracy stoją na stanowisku, że ten aspekt zasady przeczności, uwzględniający uwarunkowania przyrodnicze, powinien znaleźć zastosowanie również przy realizacji obecnie planowanego przedsięwzięcia. Oczywiście są ponadto różnice w kosztach⁴ wydłużenia kierownic o 200 ÷ 400 m a 900 ÷ 1100 m.

Zarówno w wariantcie optymalnym (polegającym na wydłużeniu kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 200 m i 400 m), jak i w wariantcie optymalnym zredukowanym (polegającym na wydłużeniu obu kierownic o 200 m) zalecono wykonanie kinety. Istnienie kinety znacznie poprawi efektywność rzeczno przepływu płuczającego (jeżeli taki wystąpi w okresie kilku-kilkunastu miesięcy po wykonaniu kinety), a ponadto natychmiast polepszy walory żeglugowe ujścia Wisły. Trwałe utrzymanie tych walorów – w postaci stałego oznakowanego toru wodnego spełniającego kryteria III lub V klasy drogi wodnej – wymagać będzie okresowych prac pogłębiarskich. Według szacunków z poprzednich rozdziałów artykułu, częstotliwość prac bagrowniczych mających na celu utrzymanie III i V klasy drogi wodnej wyniesie odpowiednio kilka miesięcy (do 1 roku) i kilkanaście miesięcy (do 2 lat) w kubaturach odpowiednio około 200 000 m³/2 lata i około 125 000 m³/rok. W przypadku wydłużenia kierownic w wariantcie optymalnym lub optymalnym zredukowanym z jednoczesnym wykonaniem kinety i zaniechaniem powtarzania w następnych latach robót pogłębiarskich zachowana będzie początkowa korzyść w postaci zwiększenia efektywności oddziaływania przepływu płuczającego.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynikają następujące wnioski:

długości kierownic

- wydłużenie kierownicy zachodniej o 200 m i wschodniej o 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety należy uznać za wariant optymalny,
- wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety należy traktować jako wariant minimum albo wariant optymalny zredukowany (oszczędnościowy),

³ Niestety służa w Przegalinie jako budowla stanowiąca główny element stopnia wodnego ma znacznie niższą klasę niż przylegająca do niej droga wodna do Zatoki Gdańskiej.

⁴ Należy dodatkowo mieć świadomość, że koszty te rosną nieliniowo – wraz z wyprawdaniem budowli na coraz większe głębokości.

- wykonanie tylko kinety spowoduje doraźne niewielkie pogłębienie rynien, trwała poprawa warunków odpływu wody, rumowiska i lodu wiązać się będzie z koniecznością częstego powtarzania prac pogłębiarskich,
- prace pogłębiarskie związane z wykonaniem kinety o szerokości w dnie wynoszącej 60 m i rzędnej dna wynoszącej -5 m wiązać się będą z wyczerpaniem piaszczystego rumowiska o objętości około 250 000 m³, opcjonalnie (przy rzędnej dna kinety wynoszącej -4 m) – około 125 000 m³,

sztuczna wyspa

- refulat pochodzący z wykonania kinety będzie wykorzystany do usypania sztucznej wyspy (łachy) w ramach kompensacji przyrodniczej,
- lokalizację kolistej sztucznej wyspy przewidziano po wschodniej stronie ujścia,
- dla kubatury prac czerpально-refulacyjnych wynoszącej 250 000 m³ średnica sztucznej wyspy wynosi około 275 m, zaś jej rzędna około 2,2 m n.p.m.,
- z dużym prawdopodobieństwem nastąpi przemieszczanie się sztucznej wyspy w kierunku południowym, z możliwym połączeniem się w ciągu kilku lat z istniejącą formą piaszczystą przy kierownicy wschodniej,

możliwości utrzymania obecnej III klasy drogi wodnej lub zapewnienia klasy V

- dla układu kierownic:
 - wydłużenie obu kierownic o 200 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,
 - wydłużenie kierownicy zachodniej i wschodniej odpowiednio o 200 m i 400 m z jednoczesnym wykonaniem kinety o szerokości w dnie 60 m i rzędnej dna -5 m,

z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć utrzymanie się III klasy drogi wodnej w średnim roku statystycznym, a klasy V – w skali kilku miesięcy.

Wykonanie kinety jako środka uzupełniającego wydłużenie kierownic będzie korzystne jako natychmiastowe uzyskanie V klasy drogi wodnej z dużym zapasem głębokości.

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, 2020, 05019002-1-05019002-11, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000529).
3. Majewski W., Jasińska E., Kapiński J., Ostrowski R., Robakiewicz M., Szmytkiewicz M., Walter M., Gąsiorowski D., Kolerski 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 PBH Aquaprojekt, Gdańsk 2003.
4. Ostrowski R., Cerkowniak G.R., Piotrowska D., Schönhof J., Skaja M., Stella M., Szmytkiewicz M., Szmytkiewicz P.: Ujście Wisły – Modelowanie – 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., Schönhof 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.

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 roku. 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.