

## ANALIZA POTENCJALNEJ INTENSYWNOŚCI TRANSPORTU RUMOWISKA NA ODCINKU RZEKI NER

Ewelina Szałkiewicz<sup>1</sup>, Tomasz Dysarz<sup>1</sup>, Joanna Wicher-Dysarz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań, e-mail: sonnenbergewelina@gmail.com, dysarz@up.poznan.pl, jwicher@up.poznan.pl

### STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy było wykonanie analiz symulacji transportu rumowiska dla wybranego odcinka rzeki Ner, z jednoczesnym wykorzystaniem narzędzi GIS. Praca została wykonana na przekrojach z 2012 roku wykonanych na potrzeby ISOK (Informatyczny System Ochrony Kraju). Przy pomocy programu ArcGIS został przygotowany numeryczny model koryta i doliny cieku, natomiast symulacje ruchu ustalonego i transportu rumowiska dla 5 okresów dziesięcioletnich przeprowadzono w programie HEC-RAS 5.0 Beta. Po przeprowadzeniu obliczeń zaktualizowana geometria koryta została utworzona za pomocą narzędzi RAS Mapper i ponownie zostało wygenerowane nowe koryto po symulacjach. ArcGIS został wykorzystany powtórnie podczas opracowywania wyników i posłużył do wygenerowania nowych rzędnych dna w stanie początkowym i końcowym. Różnica między nimi zobrazowała wielkość zachodzącej erozji i akumulacji. Proces erozji zaszedł w 13 przekrojach na analizowanym odcinku (średnia różnica rzędnych ujemna), natomiast akumulację zaobserwowano w 53 przekrojach. Maksymalna wartość spłylenia dna wyniosła 1,24 m w przekroju w km 18+868, natomiast największe pogłębienie wystąpiło w km 8+654 i wyniosło – 0,76 m. Wszystkie wartości ponownie zostały naniesione na mapę topograficzną dla lepszego zobrazowania uzyskanych wyników.

**Słowa kluczowe:** transport rumowiska, rzeka Ner, modelowanie procesów rzecznych, zastosowanie GIS w hydrologii.

### ANALYSIS OF POTENTIAL INTENSITY OF SEDIMENT TRANSPORT ON SELECTED REACH OF THE NER RIVER

#### ABSTRACT

The aim of this study was to perform a simulation of sediment transport for the section of the river Ner, while also utilizing GIS tools. Using the ArcGIS numerical model of channel and stream valleys were developed, and motion simulations and sediment transport set for 5 ten-year periods were performed in HEC-RAS. Updated geometries after the simulations were created using the tools of RAS Mapper. ArcGIS was used again for analysing the results. It was used to generate ordinates of bottom in the initial state and final. The difference between them illustrated the magnitude of erosion and accumulation. The process of erosion occurred in 13 sections of the analysed model (the standard differential ordinates negative), while the accumulation in 53 sections. The maximum value of shallowing bottom was 1.24 m (cross-section at km 18 + 868), while the largest deepening occurred at km 8 + 654 (– 0.76 m). All values, using ArcGIS, were marked on orthophotomap.

**Keywords:** sediment transport, Ner river, sediment transport modeling, GIS in hydrology.

#### WSTĘP

Głównym przedmiotem badań jest analiza zmian dna koryta rzeki wywołanych transportem rumowiska. Temat ten jest stałym przedmiotem badań naukowców. Zagadnienie to jest ważne z punktu widzenia gospodarki wodnej, ochrony

przeciwpowodziowej, budownictwa wodnego czy też ochrony środowiska. Nagromadzenie osadów powoduje zmniejszenie się przepustowości koryt, podniesienie się dna oraz zwierciadła wody w korycie, co może mieć katastrofalne skutki podczas przejścia fali powodziowej i zalania terenów przyległych. Pogłębienie dna w

wyniku erozji również jest niepożądane. W pobliżu budowli wodnych może nastąpić naruszenie stateczności całej konstrukcji, a zmiana położenia linii brzegowej utrudnia pobór wody na cele gospodarcze czy też komunalne [Bednarczyk i Duszynski 2008]. Należy także pamiętać, iż transportowany materiał rzeczny niesie ze sobą duże ilości zanieczyszczeń [Wu 2007]. Ma to ogromny wpływ na ekosystemy nie tylko w dolnym i środkowym biegu rzeki, ale także przy ujściu [Wang i Andutta 2013].

W ostatnich dwudziestu latach XXI wieku nastąpił dynamiczny rozwój nauk związanych z modelowaniem zjawisk przyrodniczych. Modelowanie i zrozumienie procesów transportu rumowiska pozwala na przewidywanie zmian zachodzących w obrębie koryta i wiążących się z tym negatywnych skutków. Dużą trudność w tej dziedzinie stanowią problemy związane ze zdefiniowaniem modelu właściwie odwzorowującego zjawisko w skali makroskopowej, które ma swoją bardzo złożoną strukturę w skali mikro. Są to właściwie problemy dotyczące wszystkich obszarów modelowania hydrodynamicznego [Szymkiewicz, 2000], jednak w tej dziedzinie ich skomplikowanie wydają się większe. Stąd w literaturze można spotkać różne modele matematyczne za pomocą, których próbuje się symulować przebieg procesów sedymentacji i erozji, np. Parker [2004], Wu [2007], Brunner [2010] i inni.

Niezależnie od zastosowanego modelu, konieczne jest określenie szeregu parametrów opisujących charakterystyki odwzorowywanego zjawiska. Nieznane wartości parametrów można pomierzyć w terenie, lecz często jest to trudne i kosztowne. Z tego też powodu próbuje się je zastąpić formułami empirycznymi lub przybliżać za pomocą różnego rodzaju oszacowań. Należy jednak pamiętać, że im więcej jest zastosowanych przybliżeń, tym dany model coraz bardziej odbiega od obiektu rzeczywistego i wyniki uzyskane podczas symulacji są mniej wiarygodne [Ozga-Zielińska 1976].

W literaturze krajowej i zagranicznej istnieje wiele doniesień dotyczących modelowania transportu rumowiska w programie HEC-RAS. Symulacje związane z sedymentacją materiału rzecznoego zostały przeprowadzone m.in. dla rzeki Widawa [Kasperek i in. 2013]. Autorzy publikacji zbadali ładunek zanieczyszczeń, który jest transportowany wzdłuż cieku wraz z rumowiskiem rzecznoym. Innym takim doniesieniem są badania prowadzone na zbiorniku zaporowym

Stare Miasto na rzece Powie [Dysarz i in. 2013], które dotyczyły wpływu autostrady A2 na redystrybucję osadów w zbiorniku. Do obliczeń wykorzystano moduł SIAM (The Sediment Impact Analysis Method). Innymi przykładami są zbiorniki: Jeziorsko na rzece Warcie [Dysarz i Wicherek-Dysarz 2011] oraz zbiorniki Jezioro Kowalskie na rzece Głównej [Jaskuła i in. 2015], gdzie były prowadzone badania wpływu transportu rumowiska na podniesienie dna na wlocie do zbiornika. Natomiast Beebo i Bilal [2012] badali wpływ transportu materiału rzecznoego dla odcinka rzeki Tenryu w okolicach zapory Sakuma w Japonii. Autorzy wykorzystali w tym celu również pakiet HEC-RAS, a wyniki zostały wykorzystane do stworzenia scenariuszy zamulenia koryta na danym odcinku rzeki i opracowania działań zapobiegawczych.

Podstawą symulacji transportu rumowiska za pomocą HEC-RASa jest równanie Exnera uzupełnione odpowiednią formułą empiryczną opisującą natężenie transportu. W oprogramowaniu dostępnych jest osiem formuł. Jedną z nich jest bardzo popularna i wyjątkowo solidnie opracowana formuła Meyer-Petera i Müllera. Na polskich rzekach obliczenia z wykorzystaniem tej metody wykorzystano m. in. w badaniach nad środkową Odrą oraz na Powie [Parzonka i Kasperek 2012, Dysarz i in. 2014]. Autorzy w swojej pracy sprawdzali wpływ przepływów powodziowych na degradację koryta rzeki. Innym przykładem wykorzystania tej formuły jest publikacja dotycząca rzeki Skawy [Książek 2006].

Celem niniejszego opracowania jest analiza intensywności transportowanego materiału rzecznoego na wybranym odcinku rzeki Ner. Obliczenia zostały wykonane przy wykorzystaniu ArcGIS oraz jednowymiarowego modelu hydrodynamicznego HEC-RAS.

## CHARAKTERYSTYKA WYBRANEGO ODCINKA RZEKI NER

Obiektem badań jest ok. 20 km odcinek rzeki Ner znajdujący się w województwie wielkopolskim. Jest to druga pod względem wielkości rzeka, która jest prawobrzeżnym dopływem Warty. Łączna długość cieku wynosi 125,9 km, powierzchnia zlewni wynosi 1866 km<sup>2</sup>, a średni przepływ w ujściu wynosi 10 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. W pracy analizowany jest odcinek rzeki o długości 18961 m, który kończy się ok. 900 m przed ujściem

do rzeki Warty. Analizowany ciek płynie przez tereny dwóch województw, a mianowicie wielkopolskiego i łódzkiego. Źródła zlokalizowane są w Łodzi na terenie dzielnicy Widzew [Bieżanowski 2001], a ujście do rzeki Warty w 444+400 km (okolice wsi Majdany). Rzeka płynie na całej długości przez tereny pastwisk, łąk i nieużytków. Jej dno jest przede wszystkim muliste albo piaszczysto-muliste [Penczak i in. 2010].

Na całej długości rzeki Ner występują zarówno odcinki uregulowane jak i naturalne. W latach 80-tych ubiegłego wieku uregulowano koryto ciek na długości od km 15+500 (powyżej miejscowości Dąbie) aż do Łodzi. W wyniku przeprowadzonych prac regulacyjnych na danym odcinku powstało sztuczne koryto o szerokości w dnie od 14 do 16 m. Wprowadzone zmiany spowodowały wzrost spadku podłużnego dna i tym samym wzrost prędkości wody [Lipiński i Franczak 2005]. W 2007 roku Wojewódzki Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych (WZMiUW) zdecydował się na ponowne odmulenie rzeki na odcinku od ujścia do km 19+930, w granicach naturalnej linii brzegowej. Koryto zostało zaprojektowane na rzędne z 1983 roku, lecz dokładne odtworzenie poprzedniej geometrii nie powiodło się. Wiele odcinków zostało wykopanych poniżej zaplanowanej rzędnej. Zmiana geometrii koryta przyczyniła się do znacznego wzrostu przepustowości ciek [Wicher-Dysarz i Dysarz 2010]. Pośrednim skutkiem zmiany geometrii koryta było zmniejszenie się stref zagrożenia powodziowego (rys. 1).

W pracy wykorzystano dane hydrologiczne z wielolecia 1970–2013 z wodowskazu zlokalizowanego w miejscowości Dąbie znajdującego się w km 12+900 biegu rzeki Ner. Na ich podstawie wykonano analizę hydrologiczną, dla wybranego odcinka rzeki. Zaobserwowana zmienność wielkości przepływu rzeki Ner w profilu Dąbie w latach 1970–2013 wynosiła od  $NNQ = 0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  do  $WWQ = 86,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , natomiast średni roczny przepływ (SSQ) rzeki wyniósł  $10,93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  [Szałkiewicz 2015].

## WYKORZYSTANE MATERIAŁY

W pracy, do utworzenia przestrzennego modelu analizowanego odcinka rzeki Ner oraz jej doliny, zostały wykorzystane dane topograficzne. Podstawą do wyznaczenia geometrii przekrojów dolinowych był Numeryczny Model Terenu (NMT). Wykorzystany w pracy NMT miał postać siatki GRID o wymiarach komórki  $5 \times 5 \text{ m}$ . Rozdzielczość numerycznego modelu terenu okazała się niewystarczająca, dlatego też do wyznaczenia granicy doliny wykorzystano także podkłady WMS pochodzące ze strony internetowej geportal.gov.pl. W celu określenia granic doliny Neru wykorzystano WMS-y z mapą hipsometryczną, topograficzną i ortofotomapą.

Do utworzenia numerycznego modelu koryta posłużyły dane geodezyjne 24 przekrojów korytowych. Oprócz tego w pracy zostały wykorzystane także przekroje mostowe opisujące lo-



Rys. 1. Zasięg stref zagrożenia powodziowego wzdłuż analizowanego odcinka rzeki Ner przy prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi  $p = 0,2\%$  (<http://mapy.isok.gov.pl/imap>)

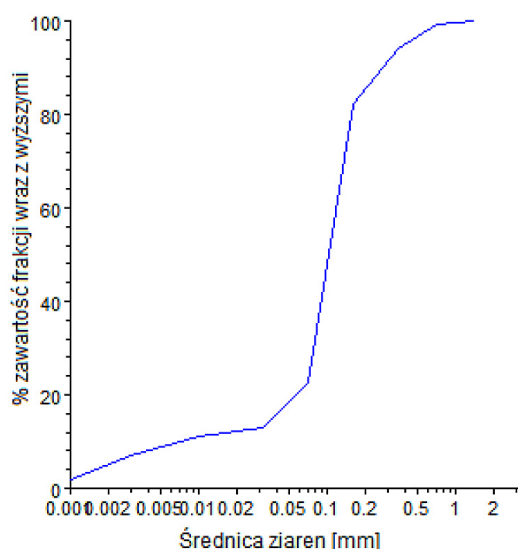
Fig. 1. The range of flood risk zones along the analyzed reach of the Ner river Ner with likelihood of flooding  $p = 0.2\%$  (<http://mapy.isok.gov.pl/imap>)

kalizację oraz geometrię 11 budowli mostowych usytuowanych wzdłuż badanego odcinka rzeki. Przekroje terenowe zostały wykonane w marcu 2012 w ramach projektu ISOK. W trakcie wykonywania przekrojów poprzecznych rzeki Ner w 2012 roku zostały również wykonane zdjęcia przekrojów, które wykorzystano do określenia współczynnika szorstkości.

Do analiz transportu rumowiska w rzece niezbędne są dane dotyczące charakterystyk rumowiska. Ze względu na brak danych próbek rumowiska z analizowanego odcinka rzeki Ner, do obliczeń transportu rumowiska przyjęto skład rumowiska zbliżony do charakterystyk sedymentu okolicznych rzek. Przy doborze składu granulometrycznego wykorzystano dane uzyskane podczas badań na rzece Powa w miejscowości Stare Miasto [Dysarz i in. 2013]. Rumowisko z tego miejsca charakteryzowało się dużą zawartością frakcji piaskowej i znacznym udziałem frakcji pyłowej (rys. 2).

## METODYKA

Specyfika modelowanych procesów, tzn. przepływu i transportu rumowiska, pozwala na zastosowanie modelu przepływu typu quasi-nieustalonego. W modelu tym obliczenia wykonywane są sekwencyjnie jak w modelu nieustalonym wykorzystującym równania St. Venanta, tzn. z kroku czasowego na krok czasowy. Jednak na każdym kroku czasowym wyznaczanie rozkładu



Rys. 2. Krzywa uziarnienia rumowiska rzeki Powa w miejscowości Stare Miasto

Fig. 2 Curve of sediment grain size for the river Powa in town Stare Miasto

na długości parametrów hydraulicznych odbywa się za pomocą algorytmu będącego implementacją równania Bernoulliego. Oznacza to, że wyznaczanie parametrów przepływu odbywa się na podstawie bilansu energii mechanicznej, który w tym przypadku daje równie zgodne ze statycznym bilansem transportowanego z wodą pędu. Efekty nieustalone wiążące aktualny stan warunków przepływu z „historią”, tzn. ze stanem poprzednim, są pomijane. W ten sposób model przepływu jest prosty i szybki. Ewentualna utrata dokładności nie ma dużego znaczenia w zagadnieniach transportu rumowiska. Procedura taka jest możliwa do zastosowania ze względu na dużą równicę skal czasowych przebiegu procesów przepływu i transportu rumowiska [Cao i in. 2007, Cao i in. 2011]. Dlatego zastosowanie koncepcji modelu quasi-nieustalonego jest bardzo efektywne.

Model przepływu musi być uzupełniony warunkami początkowo - brzegowymi. Warunek początkowy to rozkład podstawowych parametrów przepływu, np. natężenia przepływu i głębokości, na długości cieką odpowiadający początkowym warunkom przepływu. W większości zagadnień wystarczającym przybliżeniem warunków początkowych jest rozwiązanie równania ruchu ustalonego z zadanym początkowym przepływem i głębokością w jednym z przekrojów. W przypadku modelu quasi-nieustalonego, takie podejście jest standardową procedurą obliczeniową. Warunki brzegowe konieczne z punktu widzenia niniejszej metodyki powinny zawierać: (1) hydrogram przepływu w przekroju dopływowym, (2) hydrogram stanów lub inny warunek w przekroju odpływowym, np. warunek głębokości normalnej.

Najprostszym równaniem opisującym jednowymiarowy transport rumowiska na długości cieką jest tzw. równanie Exnera [Parker 2004, Wu 2007, Brunner 2010]. Jest to równanie różniczkowe cząstkowe będące matematycznym zapisem zasady zachowania masy transportowanego rumowiska. W równaniu tym zmiany rzędnych dna będące efektem akumulacji lub erozji są powiązane w sposób bezpośredni ze zmianami intensywności transportu rumowiska. Istotnym uzupełnieniem równania jest odpowiednia formuła na obliczanie intensywności transportu rumowiska. Formuła taka jednoznacznie uzależnia określaną wartość od podstawowych parametrów hydraulicznych, np. prędkości, głębokości, itp., oraz charakterystyk materiału transportowanego, np. składu granulometrycznego, prędkości



opadania, adhezji, itp.. Najbardziej znaną i najczęściej stosowaną formułą tego typu jest tzw. formuła Meyera-Petera i Mullera [1948] określana skrótowo MPM. Jest to jedno równanie algebraiczne pozwalające na wyznaczenie intensywności transportu rumowiska na jednostce szerokości koryta. Podstawą obliczeń jest analiza wymiarowa. Natężenie transportu jest ściśle zależne od wielkości naprężeń dennych, a dokładniej od ich nadwyżki w stosunku do naprężeń krytycznych, inicjujących ruch rumowiska.

W wielu zagadnieniach niejednorodność materiału transportowanego ma kluczowe znaczenia dla poprawnego modelowania procesów akumulacji i erozji. W taki przypadku, możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie równania Exnera dla każdej frakcji z osobna a następnie określenie transportu całkowitego z uwzględnieniem udziału poszczególnych frakcji w transportowanym materiale.

Skuteczne zastosowanie równania Exnera wymaga konfiguracji odpowiednich warunków początkowego i brzegowego. Warunek początkowy stanowi początkowy rozkład rzędnych dna na długości kanału. Informacje takie są bezpośrednio pozyskiwane z danych geometrycznych opisujących kształt cieku. Ze względu na typ równania, warunek brzegowy jest zadawany tylko w przekroju dopływowym. Najbardziej typowym przypadkiem jest hydrogram intensywności transportu rumowiska wraz z rozdziałem na frakcje. Jednak pozyskanie w celu modelowania tak złożonej informacji jest w wielu przypadkach trudne lub wręcz niemożliwe. Dlatego w praktyce wygodniej jest posługiwać się pewnymi uproszczeniami tego warunku, np. (1) warunkiem zerowego dopływu rumowiska, (2) warunkiem pełnego nasycenia rumowiskiem. Pierwszy z tych warunków odpowiada sytuacji wypływu cieku ze zbiornika, gdzie wcześniej nastąpiło zdeponowanie niesionego materiału. Natomiast drugi przypadek odpowiada warunkom równowagi w typowym cieku, gdzie ilość materiału zdeponowanego jest równoważona ilością materiału pobieranego z dna.

Wymienione powyżej warunki stawiane metodycznie są zaimplementowane w kilku powszechnie dostępnych solverach numerycznych. Jednak najbardziej efektywna i wygodna w użytkowaniu wydaje się metoda zastosowana w oprogramowaniu HEC-RAS 5.0 Beta [Brunner 2010]. Jest to model, przygotowany przez Hydrologic Engineering Center, będące częścią U.S. Army Corps

of Engineers. Metodyka zastosowana w programie HEC-RAS jest również silnie zorientowana na właściwe uwzględnianie oddziaływań między przepływem w korycie a przepływem na terenach zalewowych. Jest dość istotny problem w przypadku badanego systemu, ponieważ rozlewiska wokół rzeki Ner zajmują spory obszar.

Symulacje transportu rumowiska zostały przeprowadzone dla 5 okresów dziesięcioletnich (hydrogram przepływu jako warunek brzegowy na dopływie). Do każdego dziesięciolecia lata były wybierane w sposób losowy ze zbioru dostępnych hydrogramów historycznych. W efekcie obliczeń uzyskano 5 nowych układów dna, będących wynikiem 10-letnich symulacji. Różnica pomiędzy rzędnymi wyjściowymi a końcowymi dla każdego scenariusza pozwoliła określić wielkość zachodzącej erozji lub sedimentacji dla każdego scenariusza. Uzyskane wyniki uśredniono i wraz z wartościami ekstremalnymi wykorzystano do wizualizacji.

## ANALIZA WYNIKÓW I DISKUSJA

### Analiza zmian kształtu przekrojów poprzecznych i profilu podłużnego

Obliczenie przeprowadzono dla pięciu 10-letnich scenariuszy dopływu, przy czym każda symulacja rozpoczynała przebieg od tego samego układu dna koryta. Ze względu na duże odległości między przekrojami wahającymi się od 500 do 1000 m zostały wyinterpolowane dodatkowe przekroje. Dla każdego z 66 przekrojów poprzecznych zlokalizowanych na rzece, zostały określone różnice rzędnych dna w każdym z pięciu scenariuszy. Na podstawie tych wyników określono różnicę maksymalną, minimalną oraz średnią dla wszystkich pięciu scenariuszy. Dla procesu akumulacji wartości są dodatnie natomiast dla erozji ujemne. Przykładowe wartości w wybranych przekrojach poprzecznych zostały zestawione w tabeli 1. Odległość przedstawiona w pierwszej kolumnie tabeli jest liczona od przekroju odpływowego zgodnie z konwencją stosowaną w HEC-RASie. Następne kolumny zawierają zmiany rzędnych dna wyrażone w metrach, odpowiednio maksymalną, minimalną i średnią.

Przykładowe wyniki można również obejrzeć na zamieszczonych wykresach. Rysunek 3 przedstawia wyniki jednej z symulacji zmian dna. Na osi poziomej przedstawiono odległość liczoną wzdłuż kanału zgodnie z konwencją stosowaną

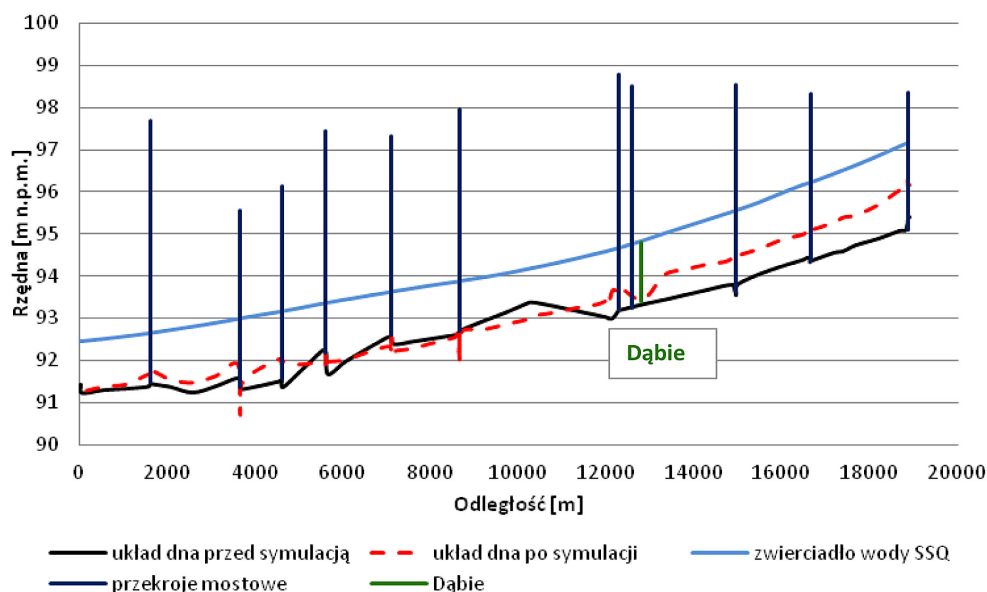
**Tabela 1.** Różnica rzędnych dna w wybranych przekrojach poprzecznych na analizowanym odcinku rzeki Ner  
**Table. 1.** The difference in ordinates of bottom in selected cross-sections in analyzed reach of the Ner river

Odległość [m]	Zmiana położenia dna		
	max [m]	min [m]	średnia [m]
18 868	1.24	0.9	1.04
16 643	0.86	0.79	0.83
14 956	0.98	0.89	0.93
12 299	0.51	0.4	0.46
12 056	0.46	0.36	0.42
8653	-0.76	-0.76	-0.76
7108	0.04	0.02	0.03
5617	-0.06	-0.06	-0.06
4608	0.41	0.4	0.4
3660	0.59	0.59	0.59
1623	0.17	0.11	0.16

w HEC-RASie. Z kolei oś pionowa reprezentuje rzędne. Linia czarną zaznaczono dno początkowe, natomiast linia czerwona przerywana przedstawia profil dna uzyskany w wyniku wybranej symulacji. Linia jasnoniebieska reprezentuje początkowy układ zwierciadła wody. Dodatkowo pionowymi granatowymi liniami zaznaczono lokalizację przekrojów mostowych. Wodowskaz Dąbie jest zaznaczony pionową zieloną linią i podpisany. Z kolei na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki dla dwóch wybranych przekrojów poprzecznych z tej samej symulacji.

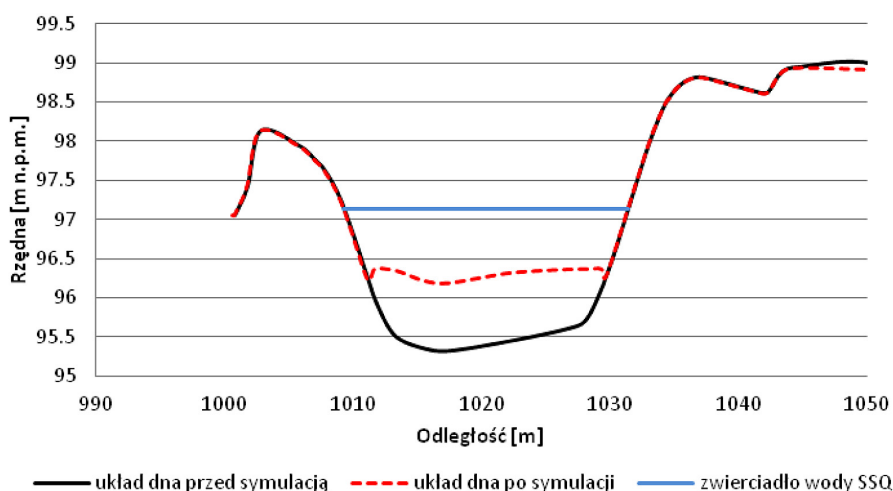
Największe spłylenie analizowanego odcinka rzeki Ner wystąpiło w jego górnym biegu od ok. 11500 m. Natomiast proces erozji w danym modelu najintensywniej zaszedł tylko w kilku punktach (nie miał charakteru ciągłego jak akumulacja). Proces erozji zaobserwowano w 13 przekrojach poprzecznych (średnia różnica rzędnych ujemna), natomiast akumulacja w 53 przekrojach. Na rysunku 3 został zobrazowany profil podłużny dna po obliczeniach wykonanych dla jednego ze scenariuszy. Maksymalna wartość spłylenia dna wyniosła 1,24 m (przekrój w km 18868 m, rys. 4), natomiast największe pogłębienie wystąpiło w pobliżu przekroju mostowego, w 8653 m (- 0,76 m, rys. 5).

Wykonane zostały także obliczenia ruchu ustalonego dla geometrii koryta powstałej po symulacjach transportu rumowiska. Do analiz wybrano trzy przepływy charakterystyczne, a mianowicie SNQ, SSQ oraz SWQ. Wyniki obliczeń opracowano podobnie jak wyniki zmian dna. Tzn. dla każdego przepływu charakterystycznego określono rzędne zwierciadła wody minimalne, średnie i maksymalne w każdym przekroju obliczeniowym. Analizy przedstawiono na rysunku 6. Podobnie jak w przypadku rysunku 3, osie pozioma i pionowa reprezentują odpowiednio odległość i rzędne. Na wykresie zamieszczono również układ dna przed symulacjami (czarna ciągła linia) i uśredniony układ dna po symulacjach (czerwona przerywana linia). Linie zielona, fioletowa i niebieska reprezentują uśrednione układy zwierciadła wody dla przepływów

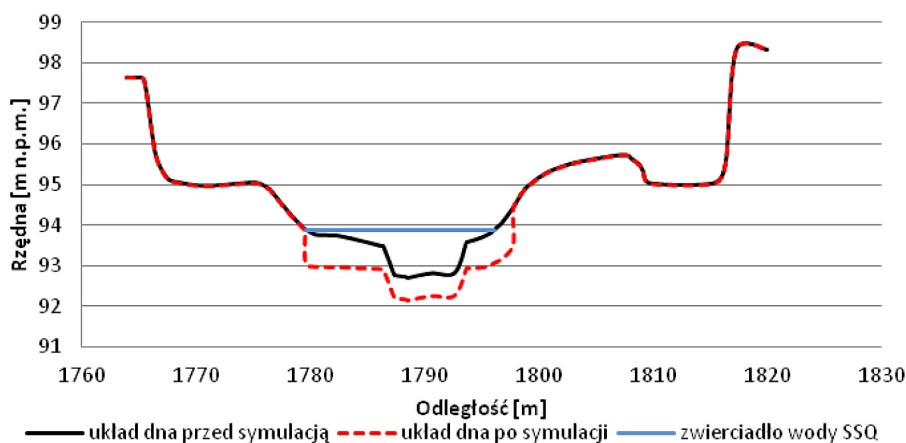


**Rys. 3.** Przykładowy profil podłużny dna analizowanego odcinka rzeki Ner w stanie wyjściowym i po przeprowadzeniu obliczeń transportu rumowiska

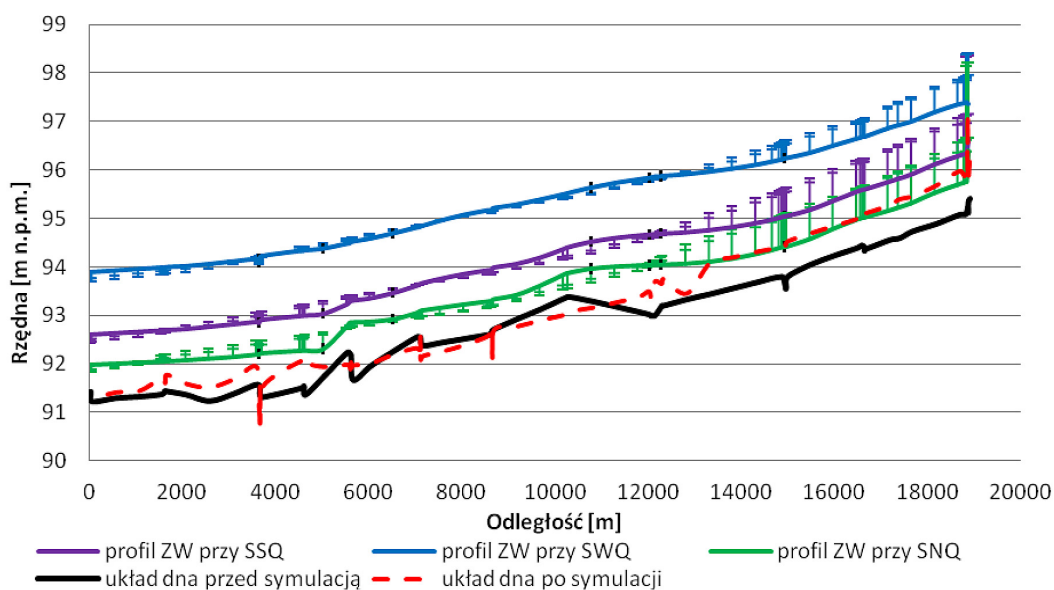
**Fig. 3.** Example of longitudinal profile of the bottom for analyzed reach of the Ner river at the initial state and after the calculation of sediment transport



Ryc. 4. Przekrój poprzeczny w 18868 m analizowanego odcinka rzeki Ner  
 Fig. 4. The cross-section in 18868 m of analyzed reach of the river Ner



Ryc. 5. Przekrój poprzeczny w 8653 m analizowanego odcinka rzeki Ner  
 Fig. 5. The cross-section in 8653 m of analyzed reach of the river Ner



Ryc. 6. Profil podłużny dna analizowanego odcinka rzeki Ner z zaznaczoną wysokością zwierciadła wody dla wybranych przepływów charakterystycznych w stanie wyjściowym i po przeprowadzeniu obliczeń transportu rumowiska

Fig. 6. Longitudinal profile of the bottom of the analyzed reach of the Ner river with marked the height of the water profile for the selected characteristics flow at initial state and after the calculation of sediment transport

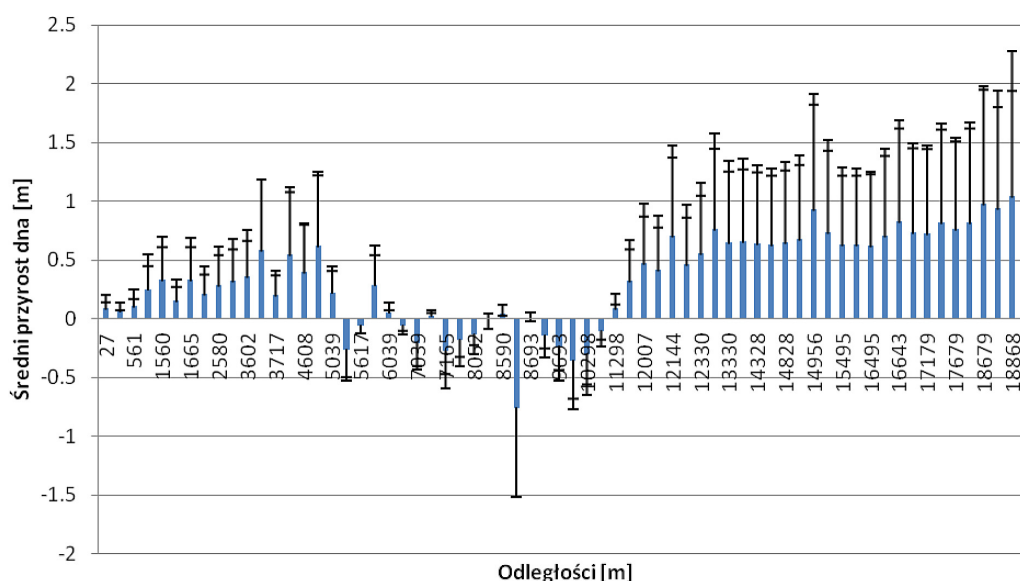
SNQ, SSQ oraz SWQ. Słupki błędów przypisane do poszczególnych linii pokazują rozrzut uzyskiwanych wartości, tzn. różnicę między wartością maksymalną i minimalną.

Największe różnice zaobserwowano dla przepływów niskich (SNQ) i średnich (SSQ). Dla przepływów wysokich SWQ zmiany profilu zwierciadła wody nie były aż tak drastyczne. Zależność tę łatwo daje się wyjaśnić rosnącym znaczeniem przepustowości doliny zalewowej wraz ze wzrostem natężenia przepływu. Natomiast w przypadku mniejszych natężeń, np. SNQ czy nawet SSQ, decydujące znaczenie dla kształtowania się układu zwierciadła wody ma przepustowość koryta rzeki.

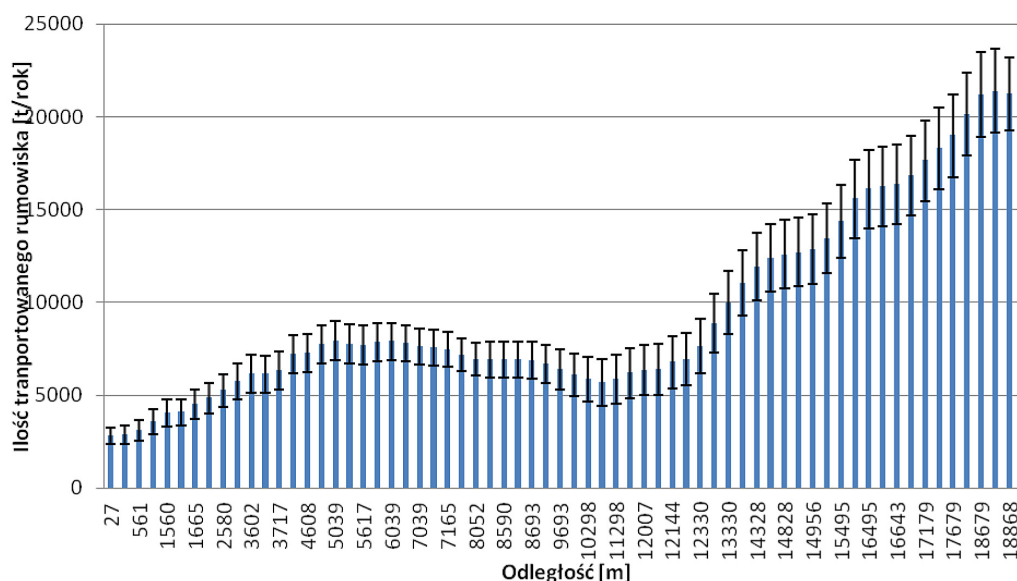
### Analiza zmian podłużnej intensywności morfodynamicznej

Wielkość zmian dna na analizowanym odcinku rzeki Ner została przedstawiona na rysunku 7. Na osi poziomej znajdują się odległości liczone wzdłuż koryta rzeki, natomiast oś pionowa przedstawia wartość średniej różnicy rzędnych dna wyznaczoną na podstawie przeprowadzonych pięciu symulacji. Rozpiętość pomiędzy wartością maksymalną i minimalną została przedstawiona w postaci słupków błędów.

Wyraźnie widać, że na długości analizowanego odcinka przeważa akumulacja rumowiska.



Ryc. 7. Intensywność zmian morfodynamicznych w wyniku przeprowadzonych symulacji dla odcinka rzeki Ner  
 Fig. 7. The intensity of morphodynamic changes as a result of the simulations for the reach of the Ne river



Ryc. 8. Średnia ilość transportowanego rumowiska na badanym odcinku rzeki Ner  
 Fig. 8. Average number of transported sediment in the analyzed reach of the Ner river



Zwłaszcza w części górnej pojawiają się warunki sprzyjające temu procesowi. Natomiast kumulacja miejsc pojawiania się erozji występuje w części środkowej. Największa różnica zaobserwowana wystąpiła w przekroju w 8868 m (-0,76 m).

Ostatnim z analizowanych elementów są zmiany natężenia transportu rumowiska na długości kanału. Wyniki te są przedstawione na rysunku 8. Analizy zostały przeprowadzone jak poprzednio. Zebrano wyniki z pięciu 10-letnich symulacji a następnie dla każdego przekroju określono wartości minimalne, średnie i maksymalne. Podobnie jak poprzednio, oś pozioma na rysunku 8 reprezentuje odległość liczoną wzdłuż kanału. Natomiast oś pionowa przedstawia natężenie transportowanego rumowiska w tonach na rok. Niebieskie słupki reprezentują wyznaczone wartości średnie, natomiast rozrzut uzyskanych wartości został zwizualizowany za pomocą słupków błędów.

Wyniki przedstawione na rysunku 8 wyraźnie pokazują, że intensywność transportowanego materiału jest największa w jego górnej części. Największa ilość transportowanego rumowiska obliczona za pomocą formuły Meyera-Petera Müllera wystąpiła w przekroju w 18868 m i było to 21241,16 t/rok. Jednak warunki korzystne dla akumulacji powodują szybkie zmniejszenie intensywności transportu. Lokalne minimum osiągane jest w przekroju w 10798 m i wynosi 5730,82 t/rok. Potem natężenie transportu rośnie na krótkim odcinku, aby ponownie maleć. Wartość najmniejszą zlokalizowano w przekroju odpływowym (2351,33 t/rok).

## PODSUMOWANIE

W pracy wykonano symulacje transportu rumowiska dla wybranego odcinka rzeki Ner. Prace te zostały poprzedzone przygotowaniem szczegółowego modelu hydrodynamicznego koryta rzeki wraz z doliną zalewową. Posłużono się w tym celu najnowszymi danymi oraz wyspecjalizowanymi narzędziami do obróbki danych przestrzennych. Badania przeprowadzono w postaci pięciu 10-letnich symulacji zmian dna zachodzących na skutek przepływu wody. Wyniki przeanalizowano na podstawie wartości minimalnych, średnich i maksymalnych z uzyskanych obliczeń.

Największe akumulacja materiału rzeczno-ego wystąpiła w górnym odcinku rzeki od ok. 11 500 km, natomiast erozja zaszła tylko w kilku miej-

scach. Maksymalne spłylenie dna osiągnęło wartość 1,24 m i wystąpiło w 18 868 m, natomiast największe pogłębienie wyniosło 0,76 m i było zlokalizowane w 8654 m. Obliczenia wykonane przy użyciu formuły Meyera-Petera Müllera dały stabilne i wiarygodne wyniki, które mogłyby wystąpić w warunkach naturalnych.

Połączenie programów HEC-RAS i ArcGIS w modelowaniu procesów hydraulicznych okazało się bardzo użyteczne. Wykorzystanie obu narzędzi jednocześnie stwarza nowe możliwości łatwiejszego wykorzystania danych przestrzennych i wizualizacji wyników.

## LITERATURA

1. Bednarczyk S., Duszyński R. 2008. Hydrauliczne i hydrotechniczne podstawy regulacji i rewitalizacji rzek. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
2. Biezanowski W. 2001. Łódka i inne rzeki łódzkie. Biblioteczka Towarzystwa Opieki nad Zabytkami w Łodzi. Wydawnictwo Oficyna Wydawnicza ZORA, Łódź.
3. Brunner G.W. 2010. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic References Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Report No. CPD-69.
4. Cao Z., Li Y., Yue Z. 2007. Multiple time scales of alluvial rivers carrying suspended sediment and their implications for mathematical modeling. *Advances in Water Resources*, 30, 715–729.
5. Cao Z., Hu P., Pender G. 2011. Multiple time scales of fluvial processes with bed load sediment and implications for mathematical modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (3), 267–276.
6. Dysarz T., Wicher-Dysarz J. 2011. Application of hydrodynamic simulation and frequency analysis for assessment of sediment deposition and vegetation impacts on floodplain inundation. *Polish Journal for Environmental Sciences*, 20(6), 1441–1451.
7. Dysarz T., Wicher-Dysarz J., Sojka M. 2013. Analysis of highway bridge impact on the sediment redistribution along the Stare Miasto reservoir, Poland. *Proceedings of IAHR Congress*, Tsinghua University Press, Beijing.
8. Dysarz T., Wicher-Dysarz J., Sojka M. 2014. Two approaches to forecasting of sedimentation in the Stare Miasto reservoir, Poland. In: Schleiss A.J., Cesare G., Franca M.J., Pfister M. (Eds.) *Reservoir Sedimentation*. CRC Press, 119–128.
9. Jaskuła J., Wicher-Dysarz J., Dysarz T., Sojka M. 2015. Modelowanie transportu rumowiska w zbiorniku Jezioro Kowalskie na rzece Główniej. *Inżynieria Ekologiczna*, 43, 131–138.

10. Kasperek R., Mokwa M, Wiatkowski M. 2013. Modelling of pollution transport with sediment on the example of the Widawa river. Archives of Environmental Protection, 39, 29–43.
11. Lipiński A., Franczak D. 2005. Regulacja rzeki Ner w granicach naturalnej linii brzegów – odbudowa w km 0+000 ÷ 19+930. Hydroprojekt Sp. z o.o. Poznań, maszynopis.
12. Meyer-Peter E., Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, 39–64.
13. Ozga-Zielińska M. 1976. Metody opisu i analizy systemów hydrologicznych. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
14. Parker G. 2004. 1D Sediment Transport Morphodynamics with Applications to Rivers and Turbidity Currents. E-book available at Gary Parker's Morphodynamics Web Page, last update April 13, 2006, webpage: <http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/>
15. Penczak T., Kruk A., Grabowska J., Śliwińska A., Koszaliński H., Zięba G., Tybulczuk Sz., Galicka W., Marszał L. 2010. Wpływ stopniowej poprawy jakości wody w rzece Ner na regenerację ichtiofauny, Roczniki Naukowe PZW 23, 97–117.
16. Szałkiewicz E. 2015. Symulacje przepływu i transportu rumowiska dla odcinka rzeki Ner z wykorzystaniem narzędzi GIS. Maszynopis pracy magisterskiej pod kierunkiem dr inż. T. Dysarza, UP Poznań.
17. Szymkiewicz R. 2000. Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
18. Wang X.H., Andutta F.P. 2013. Sediment Transport Dynamics in Ports, Estuaries and Other Coastal Environments. Sino-Australian Research Centre for Coastal Management Nr 10.
19. Wicher-Dysarz J., Dysarz T. 2010. Wstępna prognoza wpływu odmulenia rzeki Ner na warunki hydrauliczne jej koryta. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 9 (3), 55–62.
20. Wu W. 2007. Computational River Dynamics. Taylor & Francis Group, London.
21. <http://mapy.isok.gov.pl/imap>.
22. <http://geoportal.gov.pl>.