

Artykuł pochodzi z archiwalnych zasobów firmy EKO-KONSULT sp. z o.o. 80-557 Gdańsk, ul. Narwicka 6.

Wszystkie prawa zastrzeżone.

Korzystanie za zgodą firmy EKO-KONSULT [biuro@ekokonsult.pl](mailto:biuro@ekokonsult.pl)



*Kwartalnik „Problemy Ocen Środowiskowych” wydawany cyklicznie w latach 1998 – 2012, przez EKO-KONSULT był jedynym wydawnictwem w Polsce, poświęconym wyłącznie ocenom środowiskowym planowanych inwestycji oraz strategicznym ocenom oddziaływania na środowisko. Dla praktyków OOS, ale również dla osób początkujących może nadal stanowić wartościowe źródło wiedzy np. w zakresie prezentowanych case study i przeglądu stosowanych metodyk - w tym kontekście znaczna część artykułów zachowuje sporo aktualności.*

---

Artur Magnuszewski

## **Problematyka hydrologiczna w ocenach oddziaływania na środowisko przekroczeń dużych rzek**

### **Wstęp**

Projektowanie przekroczenia rzeki np. w postaci przeprawy mostowej lub rurociągu jest jednym z trudniejszych zadań inżynierskich, zarówno od strony technicznej, jak też spełnienia wymogów ochrony środowiska. Uwzględnić bowiem musi warunki hydrologiczne (wielkość i czas wystąpienia wezbrań), geologiczne (wielkość erozji lub akumulacji osadów rzecznych),

biologiczne (odpowiedni czas i technika wykonania prac w korycie). Podobne zagadnienia powinna rozpatrywać ocena oddziaływania na środowisko.

W tym artykule, na przykładzie odcinka Wisły pod Płockiem, przedstawiono możliwości jakie daje zastosowanie systemów geoinformacyjnych (GIS) w badaniach dynamiki koryt rzecznych - ważnego elementu, mającego znaczenie dla bezpieczeństwa i żywotności budowli wodnych. Jedną z cennych właściwości systemów geoinformacyjnych jest zdolność do integracji danych, a więc łączenia informacji w postaci odpowiednich map zwanych warstwami tematycznymi. Daje to możliwość wielowymiarowej analizy danych o środowisku i wykonywania symulacji zjawisk ekstremalnych o małym prawdopodobieństwie wystąpienia.

## **Dynamika form korytowych**

Lokalizacja przekroczenia rzeki wymaga wybrania miejsca w korycie nie podlegającego deformacjom nieodwracalnym, a więc stałej erozji lub akumulacji rumowiska rzeczno. W warunkach naturalnych koryto rzeki pozostaje w stanie równowagi dynamicznej, zmienia swój kształt w niewielkim zakresie, okresowo podlega erozji np. w trakcie wezbrania lub zamulaniu w okresach niżówkowych. Zaburzenie równowagi dynamicznej procesu transportu rumowiska rzeczno może nastąpić w wyniku zmiany wielkości odpływu, ładunku i rodzaju osadów, zmiany spadku podłużnego. W perspektywie czasu geologicznego każdy z czynników określających równowagę koryta rzeczno może podlegać zaburzeniom np. w wyniku zmian klimatu i wielkości odpływu rzeczno. Dobrym przykładem zmian transportu rumowiska rzeczno i towarzyszących im zmian układu koryta może być Wisła pod Płockiem. Historię rozwoju koryta rzeki na tym odcinku odtworzono na podstawie badań paleohydrologicznych z zastosowaniem metody datowania osadów organicznych. Współczesna rzeka na odcinku między Kępą Polską a Płockiem ma układ koryta typowy dla rzek roztokowo-anastomozujących, a więc pośredni między meandrującym a wieloramiennym. Taki układ koryta wynika z ewolucji całego systemu rzeczno na przestrzeni Holocenu, kiedy miało miejsce przejście od rzeki roztokowej, poprzez meandrującą do roztokowo-anastomozującej (Rys.1a-d).

Współcześnie typowe dla omawianego odcinka Wisły jest nagromadzenie w jej korycie nieregularnie rozmieszczonych łach i wysp. Podlegają one deformacjom wywołanym przez erozyjno-akumulacyjną działalność płynącej wody. W rzece roztokowej oprócz głównego nurtu o nieregularnym przebiegu występują liczne prądy boczne, opływające łachy środkowe i wyspy. Taki układ strumieni powoduje erozję doprądowej części wysp i akumulację materiału w części zaprądowej, a w efekcie powolny ruch całej wyspy z biegiem rzeki. Tempo deformacji i jej kierunek zależą od warunków hydrologicznych i hydraulicznych w rzece, duże znaczenie w kształtowaniu tych form mają wezbrania, a zwłaszcza wezbrania katastrofalne. Wyspy charakteryzują się większą odpornością na działanie erozyjne wody, ponieważ chroni je pokrywa roślinna, która zmniejsza prędkości rozmywające płynącej wody. Deformacje mniejszych form

korytowych przez płynącą wodę, należą do najbardziej dynamicznych i zachodzą w krótkich przedziałach czasu (Rys.2). W przypadku większych form i całego układu koryta czynnik wywołujący ten proces (wezbrania ekstremalne) nie pojawia się często, a zatem proces formowania koryta rzeki zachodzi na przestrzeni dziesiątków lat.

Wezbrania ekstremalne często dokonują przebudowy koryta, a nawet łóżyska rzeki, kształtują orientację form korytowych, które następnie są modyfikowane przez przepływy niskie. Do analizy zmian morfologii koryta rzeczno nadają się np. archiwalne mapy topograficzne. W celu sprowadzenia starych map do jednakowej skali i usunięcia ich zniekształceń można wykorzystać np. program służący do wektoryzacji obrazów rastrowych, który jest wyposażony w funkcję kalibracji. Na rysunkach 3a-b pokazano przykładowe szkice układu koryta Wisły pod Wyszogrodem uzyskane w wyniku wektoryzacji dokonanej na rastrowym obrazie map archiwalnych, poddanych wcześniej kalibracji za pomocą transformacji afinicznej w programie komputerowym CADRaster. Transformacja afiniczna jest przekształceniem geometrycznym, w wyniku którego punkt o współrzędnych  $(x,y)$  zostaje przeniesiony do nowego położenia o współrzędnych  $(x',y')$  obliczonych ze wzorów:  $x'=ax+by+e$ ,  $y'=cx+dy+f$ . W celu zastosowania takiego przekształcenia do kalibracji map należy wskazać wektory przesunięć punktów do nowego, poprawnego położenia. Jako wzorzec, w stosunku do którego odniesiono wektory przesunięć, wykorzystano stałe punkty terenowe, których położenie i współrzędne wprowadzono z mapy topograficznej z 1974 roku.

Analiza sekwencji map pokazała, że rozpoczęcie tworzenia się Kępy Wyszogrodzkiej można w przybliżeniu datować na koniec XIX wieku. Jednak dopiero wezbrania ekstremalne w 1909r. i 1924r. ukształtowały jej główny trzon. Wezbranie wiosenne na dolnej Wiśle z 1924 roku miało najwyższy przepływ w tym stuleciu  $8\,300\text{ m}^3/\text{s}$  (średni przepływ w profilu Kępa Polska to  $655 - 1\,050\text{ m}^3/\text{s}$ ) i doprowadziło do przebudowy całego koryta Wisły w tym rejonie. Wyspy A, B, C (Rys.3a) powstały z rozmycia cypla w ujściu Bzury. Ponadto nastąpiła zmiana układu nurtu, która polegała na uaktywnieniu prawego ramienia rzeki oraz rozpoczęciu formowania Kępy Wyszogrodzkiej. Po 1937 roku położenie wysp nie uległo dużym zmianom, zaznaczył się przyrost wielkości wyspy A oraz przemieściły się w dół rzeki wyspy B, C. Duże zmiany zaszły w kształcie Kępy Wyszogrodzkiej, która generalnie ulega erozji od strony głównego nurtu (północny brzeg), zaś od końca lat 50-tych powiększa swoją powierzchnię od strony brzegu południowego. Uzyskane tą drogą informacje o rozwoju Kępy Wyszogrodzkiej posłużyły do opracowania OOS prac regulacyjnych odcinka rzeki w pobliżu nowego mostu w Wyszogrodzie.

Podobną technikę zastosowano przy ocenie sposobu przejścia przez Wisłę pod Włocławkiem rurociągu Jamał - Europa Zachodnia. Analiza archiwalnych map i procesów korytowych zachodzących poniżej stopnia Włocławek pomogły wskazać optymalne miejsce składowania urobku z wykopu w dnie Wisły.

## Procesy korytowe w czaszy zbiornika wodnego

Budowa każdego stopnia wodnego zaburza stan równowagi koryta rzecznego przez zmianę spadku zwierciadła wody, a zatem również prędkości przepływu wody i jej zdolności do transportu rumowiska. Powrót do zrównoważonych warunków transportu rumowiska odbywa się przez agradację koryta rzecznego, czyli stopniowego zamulania zbiornika. Tempo zamulania określa żywotność zbiornika, a także ma znaczenie przy bieżącej eksploatacji obiektu i lokalizacji przepraw mostowych. Istnieje kilka metod badania tempa wypełniania czaszy zbiornika rumowiskiem rzeczonym, począwszy od prostych wzorów empirycznych, przez obliczenia bilansowe oparte na pomiarach hydrometrycznych, do złożonych modeli matematycznych wykorzystujących równania hydrodynamiczne. Jeśli są prowadzone systematyczne pomiary głębokości zbiornika w okresie jego istnienia, obliczenia tempa zamulania i zmian ukształtowania dna można wykonać za pomocą cyfrowego modelu terenu - DTM (ang. digital terrain model) zapisanego w postaci map cyfrowych w systemie geoinformacyjnym.

Na Jeziorze Włocławskim od chwili jego powstania, w kilkuletnich odstępach, prowadzone są pomiary głębokości. Pomiary wykonuje Hydroprojekt z Włocławka za pomocą echosondy sprzężonej z dalmierzem radarowym. W trakcie pomiaru niwelacyjnie określa się wysokość zwierciadła wody nad poziom morza, co umożliwia przeliczenie głębokości na rzędne dna w przekrojach. Na całej długości Jeziora Włocławskiego wyznaczono 81 przekrojów. Wyniki są udostępniane w postaci albumu wykresów przekrojów poprzecznych, z zaznaczonymi rzędnymi dna, ze skalą pionową 1 : 100 i poziomą 1 : 2 000. Rzędne dna z wykresów przekrojów poprzecznych obejmujące odcinek rzeki w pobliżu Płocka przeniesiono na mapę topograficzną koryta Wisły w skali 1 : 10 000 (układ współrzędnych 1942). Następnie odręcznie wykreślono izoliny uzyskując plany rzeźby dna Jeziora Włocławskiego. Przyjęto cięcie co 1 m, obejmujące zakres rzędnych 49 - 60 m npm. Na mapach oprócz rzędnych dna narysowano także linię brzegową, ważniejsze punkty terenowe, zaznaczono położenie przekrojów sondowania. Przygotowane w ten sposób mapy dna poddano digitalizacji za pomocą programu Atlas GIS, jako punkty kontrolne przy rejestracji mapy przyjęto węzły siatki kilometrowej, podając ich współrzędne w metrach. Współrzędne wektorowe określające położenie punktów opisujących morfologię dna zapisano następnie w tabeli przechowującej wartości (x,y,z). Punkty przeniesione do programu interpolującego Surfer posłużyły do interpolacji przestrzennej, której wynikiem jest regularna siatka punktów węzłowych. Z kilku metod interpolacji przestrzennej,

jakie są do dyspozycji w tym programie, wybrano kriging<sup>1</sup>. W interpolacji przyjęto rozdzielczość przestrzenną 10x10 m, co przy założonym zakresie współrzędnych (x,y), dało macierz o wymiarze 11 000x15 000. Obliczenia wykonane na komputerze PC Pentium 120 MHz trwały około 24 godzin. Wartości wyinterpolowane w węzłach regularnej siatki zostały następnie przeniesione do programu klasy GIS o nazwie ILWIS, gdzie zamieniono je na obraz rastrowy. Wartość piksela w takim obrazie odpowiada średniej rzędnej pola elementarnego o boku 10x10 m. Taki zapis pozwala dokonywać na obrazach rastrowych (warstwach tematycznych) wszelkich działań arytmetycznych. Przez odejmowanie poszczególnych warstw od siebie uzyskano mapy bilansowe, które pokazują różnice rzędnych dna i przyrost lub ubytek objętości osadów w analizowanych przedziałach czasu (Rys.4). Mapy te, ze względu na rastrową strukturę mają cechę kartogramu. Zaznaczono na nich te zmiany dna, które są większe od 2 m. Mniejsze deformacje dna koryta (na mapach barwa biała), nie zostały uwzględnione ze względu na ograniczoną dokładność wyjściowego modelu poziomicowego.

Analiza map pokazuje, że akumulacja osadów następuje głównie w formie łach śródkorytowych, a więc zachodzi w sposób typowy dla naturalnej rzeki. Jedynie w dolnej części analizowanego odcinka jest widoczny przyrost osadów przy brzegach, w wyniku odkładania materiału z pogłębiania zbiornika. Wykonane tą techniką mapy pozwalają wskazać kierunki deformacji dna rzeki w obrębie Jeziora Włocławskiego, co ma znaczenie przy projektowaniu przepraw drogowych (np. nowego mostu w Płocku) i innych obiektów wodnych.

---

<sup>1</sup> Nazwa metody pochodzi od nazwiska jej twórcy, D.G. Krige'a, który zastosował ją dla potrzeb przemysłu wydobywczego. W metodzie wykorzystuje się semiwariogram jako funkcję określającą stopień oddziaływania punktów pomiarowych na węzeł interpolacji.

## Zasięg wezbrań ekstremalnych w dolinie rzecznej

Obok określenia stabilności form korytowych, dla oceny poprawności lokalizacji przejścia przez rzekę równie ważne jest poznanie relacji między wyższymi formami doliny rzecznej, a poziomem wody w korycie rzecznej. Takie podejście pozwala zanalizować przestrzenny obraz zasięgu wezbrań ekstremalnych, a także położenie i zasięg obszarów zatopionych w stosunku do projektowanego obiektu. W tym celu wykorzystuje się cyfrowy model terenu - DTM. Najczęściej stosowanym modelem zapisu danych wysokościowych, zwłaszcza w rastrowych programach GIS jest macierz. Każdy element macierzy przechowuje średnią wysokość pola elementarnego, którego wymiar zależy od przyjętej rozdzielczości przestrzennej DTM. Źródłem danych służących do utworzenia DTM jest zwykle mapa topograficzna. Dane pochodzące z digitalizacji poziomic na mapach topograficznych lub pomiarów geodezyjnych są nierównomiernie rozmieszczone, tak więc by uzyskać pełną macierz punktów wysokościowych konieczne jest zastosowanie procedury interpolacji, która pozwala oszacować wartość zmiennej, tam gdzie brakuje danych pomiarowych.

W przypadku doliny Wisły pod Płockiem model cyfrowy (DTM) powstał na podstawie digitalizacji poziomic z map topograficznych w skali 1 : 25 000. Przyjęta rozdzielczość przestrzenna modelu wynosi 25 m, dokładność zaś określenia rzędnej 0,5 - 1,0 m. Digitalizację wykonano na podstawie obrazu rastrowego zeskanowanych map w programie CAD-Raster, interpolację zaś przeprowadzono metodą odwrotnych odległości w programie Surfer. Rysunek 5 przedstawia model DTM doliny Wisły pod Płockiem przetworzony za pomocą filtra cyfrowego, tak by uzyskać efekt plastycznego odwzorowania rzeźby. Na modelu można wyróżnić duże formy fluwialne (porównaj Rys.1), z których szczególnie są widoczne tarasy zalewowe (holoceńskie) i nadzalewowe (plejstocenyjskie).

Symulacja wezbrań, wykonana na cyfrowym modelu wykazuje, że duże wyspy jak np. Kępa Ośnicka zostają zatopione jedynie przy ekstremalnych stanach wody, natomiast przy średniej wysokiej wodzie (SWW) zostają jedynie miejscami podtopione (Rys.6). Równina zalewowa w tzw. dolinie Dobrzykowsko-Iłowskiej w warunkach wezbrań ekstremalnych jest w stanie zgromadzić znaczną objętość wody, która stanowi poważny problem przy projektowaniu mostów w tym regionie. Przykładem może być awaria nasypu prowadzącego do mostu kolejowego w Płocku, w czasie powodzi w 1981 roku.

## Podsumowanie

Przekroczenia rzek w związku z budową przepraw mostowych lub przejść rurociągów stanowią jeden z trudniejszych problemów projektowych. Praktyka ostatnich lat wykazała, że tradycyjne podejście inżynierskie, z wypracowanymi wzorami i schematami obliczeniowymi, w konfrontacji ze zmieniającym się (nieomal na naszych oczach) środowiskiem, nie sprawdza się. Coraz częściej mówi się o konieczności projektowania budowli wodnych nie tylko na podstawie

klasycznych metod obliczeniowych, lecz także przewidywania sytuacji ekstremalnych, występujących w wyniku złożenia się szeregu najbardziej niekorzystnych czynników. Przedstawione w artykule metody sięgają do paleohydrologii i modelowania z wykorzystaniem systemów geoinformacyjnych (GIS), jako metod, które pomagają poszerzyć nasze wyobrażenia o funkcjonowaniu rzek w przeszłości, a także przyszłości. Przy wykonywaniu ocen oddziaływania na środowisko takie podejście okazało się bardzo owocne, pozwoliło bowiem uzyskać mocne argumenty, wykorzystane z pożytkiem dla przyrody.

Dr Artur Magnuszewski  
Zakład Hydrologii,  
Uniwersytet Warszawski

## Literatura

1. Costa J.E., 1988, *Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flow, and debris flow*, [w:] Baker V.R., Kochel R.C. Patton P.C. (red.) *Flood geomorphology*, J. Wiley & Sons, New York
2. Dziurzyński T., Magnuszewski A., 1998, *Nowa metoda zobrazowania i obliczeń tempa sedymentacji w Jeziorze Włocławskim za pomocą systemu geoinformacyjnego*, *Gospodarka Wodna*, nr 6
3. Lane E.W., 1955, *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*, ASCE Proceedings 81.
4. MacEachren A., Davidson J.V., 1987, *Sampling and Isometric Mapping of Continuous Geographic Surfaces*, *The American Cartographer*, Vol. 14, No 4
5. Magnuszewski A., 1996, *Geneza równin zalewowych i zastosowanie cyfrowego modelu terenu (DTM) w badaniach hydrologicznych doliny rzeki*, [w:] Mikulski Z., Bajkiewicz-Grabowska E. (red.) *Ekologiczne podstawy zagospodarowania dolin rzecznych*, Towarzystwo Naukowe Warszawskie, Retro-Art, Warszawa
6. Magnuszewski A., 1996, *Wezbrania ekstremalne a zmiany koryta Wisły pod Wyszogrodem* [w:] Mikulski Z., Bajkiewicz-Grabowska E. (red.) *Ekologiczne podstawy zagospodarowania dolin rzecznych*, Towarzystwo Naukowe Warszawskie, Retro-Art, Warszawa
7. Mycielska-Dowgiałło E., Chormański J., 1996, *Ewolucja doliny Wisły od Kępy Polskiej do Płocka w okresie ostatniego zlodowacenia i holocenu*, [w:] Mikulski Z., Bajkiewicz E. (red.) *Ekologiczne podstawy zagospodarowania dolin rzecznych (na przykładzie Wisły pod Płockiem)*, Towarzystwo Naukowe Warszawskie, RetroArt, Warszawa
8. Weibel R., Heller M., 1991, *Digital Terrain Modelling*, [w:] Maguire D., Goodchild M.F., Rhind D. (red.) *Geographical Information Systems, Principles and Application*, Longman Scientific & Technical, Burnt Mill, Harlow
9. Zober S., Magnuszewski A., 1998, *Zawartość metali ciężkich w osadach Kępy Wyszogrodzkiej - interpretacja hydrologiczna*, [w:] Magnuszewski A., Soczyńska U. (red.) *Hydrologia u progu XXI wieku*, Polskie Towarzystwo Geograficzne, Retro Art, Warszawa.



Podpisy pod rysunkami

Rys.1. Zmiany układu koryta Wisły w okresie od ostatniego zlodowacenia: a/ tworzenie się tarasu kemowego wzdłuż brył martwego lodu; b/ etap rzeki roztokowej w okresie poprzedzającym stadią Epe; c/ etap rzeki meandrowej; d/ zmiany koryta rzeki w ostatnim 1000-leciu

Rys.2. Przykładowe roczne zmiany ukształtowania form dennych w pobliżu wyspy na Wiśle w rejonie Czosnowa, zarejestrowane jako obraz lotniczy techniką wideo (Ośrodek Hydrologii IMGW)

Rys.3. Układ koryta Wisły pod Wyszogrodem: a/ według mapy nawigacyjnej opracowanej przez Rosyjską Komisję Nawigacyjną Ministerstwa Żeglugi Parowej w 1877r.; b/ na podstawie interpretacji zdjęcia lotniczego z 1992r.

Rys.4. Mapa bilansu rumowiska rzecznoego w górnej części Jeziora Włocławskiego a/ w latach 1971-1984

Rys.5. Cyfrowy model terenu doliny Wisły

Rys.6. Symulacja wezbrań w dolinie Wisły pod Płockiem; NW - niska woda, SW - średnia woda, SWW - średnia wysoka woda, WWW - najwyższa woda