

Wykorzystanie metod geoinformacyjnych w badaniach morfodynamiki koryta Wisły w Warszawie

Tomasz Falkowski¹, Piotr Ostrowski¹



T. Falkowski



P. Ostrowski

The use of geoinformation methods in Vistula channel morphodynamic research in Warsaw. *Prz. Geol.*, 63: 186–194.

Abstract. Prerequisite for rational river valleys management is estimation of its evolution processes causes and directions. Such analysis requires from geologist great number of different information, acquisition of which is very often associated with difficulties resulting (for instance) from channel zone inaccessibility. Besides accuracy in location of the observation points such works require also ability in registration of environment changes during short observation periods (e.g. on the base of subsequent measurement campaigns results) as well as during long periods (e.g. comparison of the topographic or remote sensing archival data). The perfect tool for such purposes, which is capable to integrating various research results are geographic information systems.

In the regulated, downtown section of the Warsaw Vistula channel since the 60s of the last century to the early XXI century was recorded a steady decline in the level of the medium and low water flow. This process became a threat for the channel zone infrastructure. At the same time above and below this channel section, in the zone less equipped with the hydro-technical structures the process of aggradation was observed. This leads to increase of flood risk. The paper presents results of investigations, which were conducted in the Vistula River channel zone in Warsaw. During the research it was found that the reason for a particular channel environment behaviour in reaction on the management is the channel geology. In the narrow, regulated downtown channel section the contemporary alluvia substrate (built up with erosion resistant deposits) creates morphologically diverse protrusion. Upstream and downstream of that channel section the roof of alluvia substratum lowers. Lack of possibilities to deepening channel during the high waters passage in downtown narrowed channel reach affects the higher flow speeds and creates conditions of sediment transit. Shallow position of erosion resistant deposits floor affects also the thalweg course. Beyond the culmination of substratum Vistula represents the wild river, overloaded by alluvia.

Keywords: channel processes, alluvia substratum, hydrotechnical constructions, GIS



I Ogólnopolskie Sympozjum
Geointerdyscyplinarnych
Metod Badawczych

Doliny rzeczne, a szczególnie ich strefy korytowe, są wymagającym obiektem aplikacyjnych badań geologicznych.

Ogromne znaczenie przyrodnicze (Kajak, 1992; Tomiałojć, 1993) i gospodarcze tych obszarów narzuca konieczność precyzyjnego i wyczerpującego formułowania rozwiązań problemów związanych z ich zagospodarowaniem. Gromadzenie danych o środowisku dolin rzecznych wiąże się często z trudnościami technicznymi, które wynikają chociażby z sezonowej niedostępności znacznej części równi zalewowej. Także wyjątkowa dynamika środowiska fluwialnego (Vanderberghe, 2002) zmusza do formułowania prognoz jego rozwoju (np. prognoz geologiczno-inżynierskich; Kowalski, 1988) w oparciu o precyzyjną lokalizację geoprzestrzenną elementów, których powstanie i właściwości wynikają z geologicznej historii formy. Do najważniejszych z nich należą: morfologia doliny, cechy strukturalne osadów, występowanie i przepływ wód podziemnych, warunki hydrauliczne w korycie, środowisko glebowe czy też siedliska występujące na równi zalewowej. Dobrym narzędziem do prowadzenia tego typu złożonych analiz są programy/platformy geoinformacyjne (Ostrowski & Falkowski, 2012). W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań (głównie geologicznych) strefy korytovej

Wisły warszawskiej (od 495 do 520 km biegu rzeki), które prowadzono z zastosowaniem technik geoinformacyjnych.

Charakter procesów erozji i akumulacji rzecznej wpływa bezpośrednio na warunki działania infrastruktury związanej z korytem. Na miejskim odcinku koryta Wisły (od Mokotowa do Żoliborza) od połowy XX w. obserwuje się stałe obniżanie poziomu przepływu średnich i niskich wód (Kornacki, 1960; Zielińska, 1960; Skibiński, 1963). Proces ten wiązany jest z obniżeniem dna koryta. To niebezpieczne m.in. dla ujęć wody i budowli regulacyjnych zjawisko wiązane jest głównie z eksploatacją rumowiska z dna koryta (Skibiński, 1963; Popek & Żelazo, 2000; Żelaziński i in., 2005). Skala takiej eksploatacji przez ostatnie kilkadziesiąt lat przekraczała często ilość rumowiska docierającego do odcinka warszawskiego koryta Wisły (Żelaziński i in., 2005). Istotnymi przyczynami obniżania się poziomu przepływu średnich i niskich wód były także regulacja koryta i zwężenie szerokości trasy regulacyjnej na odcinku śródmiejskim z 340 do 220 m (Popek i in., 2009). Zmiana ta doprowadziła do ukształtowania się wyraźnych różnic prędkości przepływu w korycie pomiędzy odcinkiem miejskim (od Mokotowa do Żoliborza) i odcinkami położonymi powyżej i poniżej niego (Gutry-Korycka i in., 2006). W efekcie, jednocześnie z obniżaniem się na odcinku miejskim poziomu przepływu wód średnich i niskich, powyżej i poniżej niego rejestrowano

¹ Katedra Geoinżynierii, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; tomasz_falkowski@sggw.pl, piotr_ostrowski@sggw.pl.

nadbudowywanie powierzchni strefy korytowej (międzywala). Proces ten powoduje zwiększenie zagrożenia powodziowego (Magnuszewski, 2013), które jest szczególnie istotne w kontekście możliwości poszukiwania nowych miejsc pod zabudowę i wkraczania inwestorów na obszar równi zalewowej. W dolinie Wisły warszawskiej na przełomie wieków zabudowane zostały na przykład: znaczna część rejonu Siekierok i Kępy Zawadowskiej, a także znaczne obszary w okolicach Tarchomina. Ewentualne zalanie tych terenów (Magnuszewski & Gutry-Korycka, 2009; Magnuszewski i in., 2012) spowoduje poważne problemy ekonomiczne i społeczne.

Charakter współczesnych procesów rzecznych na odcinku Wisły warszawskiej zależy także od jego budowy geologicznej i morfologii. Strefa miejska odcinka Wisły warszawskiej, obejmująca Mokotów, Śródmieście i Żoliborz, to zwężenie równi zalewowej (tarasu zalewowego), nazwane „gorsetem warszawskim” (Różycki, 1972; Biernacki 1975; Falkowski, 1990). W tej strefie zbudowane z trudno rozmywalnych osadów podłoże współczesnych aluwiów korytowych Wisły tworzy kulminację o złożonej morfologii. Formę tę budują przykryte zazwyczaj rezydualnym brukiem trzeciorzędowe ility pstry (plioceniczne) oraz różnorodne osady plejstoceny – gliny zwałowe, osady zastoiskowe, a także gruboziarniste, zagęszczone osady plejstoceny rzek (Różycki & Sujkowski, 1936; Należyty, 1972; Watyha, 1973; Brykczyńska & Brykczyński, 1974; Falkowski, 1990; Sarnacka, 1992; Falkowski & Ostrowski, 2009). Utwory te odsłaniają się w dnie koryta lub przykryte są warstwą współczesnych aluwiów o zmiennych miąższościach (Falkowski & Ostrowski, 2012).

Celem badań, które prowadzono od 2008 r., było określenie wpływu budowy geologicznej na zmiany morfologii koryta Wisły warszawskiej, wywołane jego zagospodarowaniem. Wykonane prace terenowe i kameralne pozwoliły także na ocenę przydatności i potencjału aplikacyjnego zastosowanych metod geoinformacyjnych.

ZAŁOŻENIA PROCEDURY BADAWCZEJ

Określenie wpływu i interakcji wielu czynników na morfodynamikę koryta wymagało wspólnej analizy różnych typów danych, pozyskanych odmiennymi technikami i różnym sprzętem badawczym. Zarówno techniki pomiarowe, stosowany sprzęt badawczy, jak i obowiązujące standardy dotyczące zapisu i opracowywania wyników zmieniły się znacząco w okresie kilkunastu, a uwzględniając materiały archiwalne, kilkudziesięciu lat prowadzenia badań. Dlatego też, aby skutecznie rozwiązać złożony problem, koniecznością stało się zastosowanie metod geoinformacyjnych. Podstawowym założeniem prowadzonych prac było nadanie wszystkim danym atrybutów georeferencyjnych. Umożliwiło to umieszczenie ich we wspólnej bazie danych GIS, w której prowadzono prace kameralne – analizę i wizualizację ich wyników.

Jak wspomniano, odcinek Wisły warszawskiej składa się z tranzytowego odcinka miejskiego, o największych prędkościach przepływu wody w korycie, oraz odcinków, w których w warunkach mniejszych prędkości dominuje akumulacja osadów. W pierwszym etapie badań, który realizowany był w 2008 r., dokumentowano stan tranzytowego odcinka miejskiego od 508 do 520 kilometra (ryc. 1). W dru-

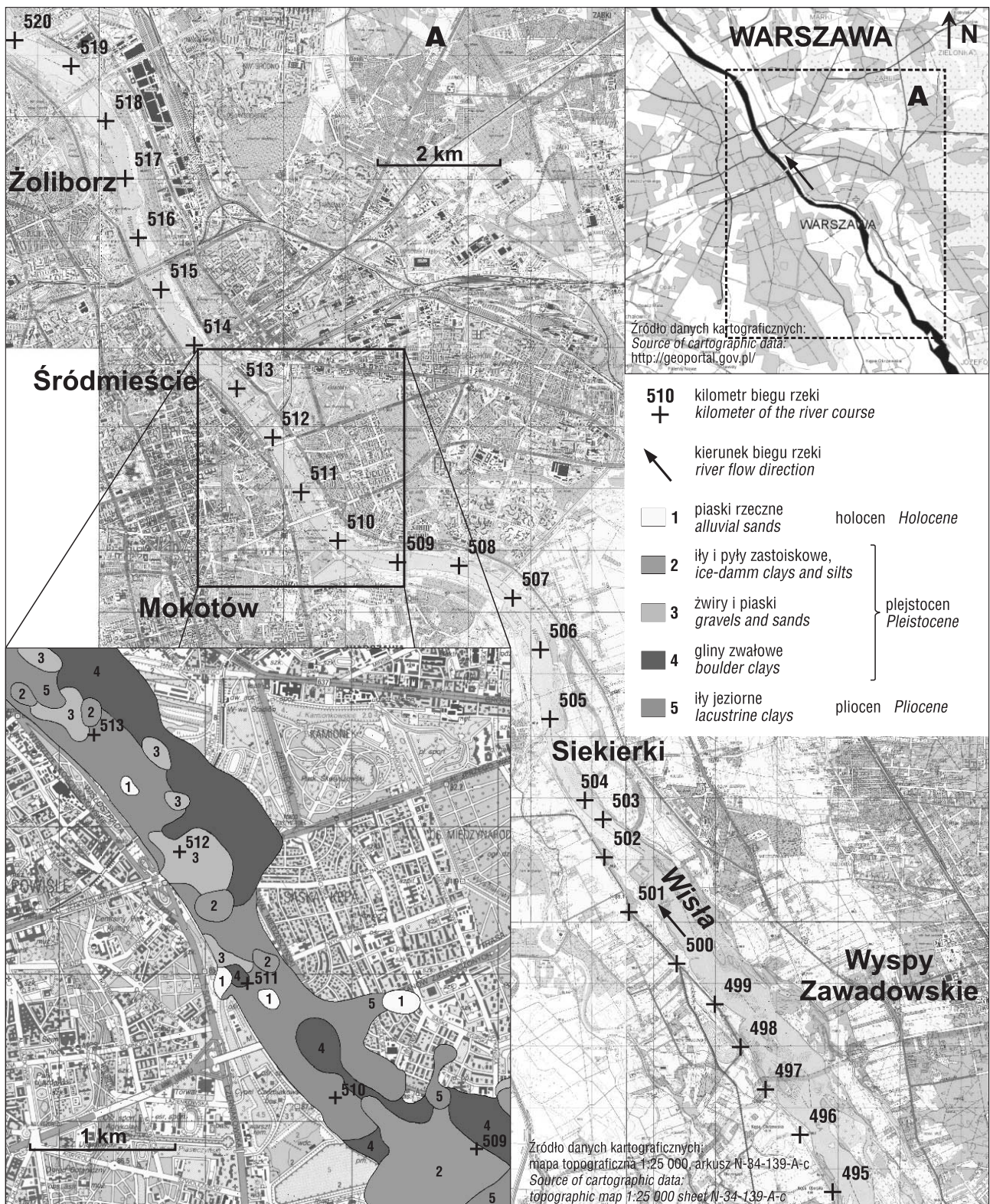
gim etapie (w 2011 r.) skoncentrowano się na badaniach dynamiki zmian morfologii koryta w strefie przejściowej od Wysp Zawadowskich do Siekierok (495–503 km). Mimo największego nasilenia prac badawczych w latach 2008 i 2011 oraz zakończenia obu ich etapów wnioskami, rozbudowa bazy GIS trwa do dziś.

BADANIA TERENOWE

W trakcie badań terenowych szczególną wagę przykładano do ich precyzyjnej lokalizacji. W tym celu, w zależności od typu badań, zastosowano odbiorniki globalnych systemów pozycjonowania o różnej dokładności. W pierwszym etapie badań odbiorniki DGPS (Differential GPS), wspomagane przez system EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), oraz odbiorniki DGPS-RTK. W drugim etapie badań, w związku z osiągnięciem pełnej funkcjonalności przez system GLONASS (Globalna Nawigacyjna Sputnikowa Systema), korzystano także z odbiorników GNSS (Global Navigation Satellite System), działających w trybie różnicowym.

W pierwszym etapie badań na odcinku miejskim (508 do 520 km) wykonano 81 wierceń w dnie koryta. Wiercenia zlokalizowane były w 25 przekrojach (średnio trzy sondy w przekroju). Linie przekrojów na odcinku miejskim dzięki pomiarom w bazie danych wyznaczano tak, aby znajdowały się w liniach przekrojów opisywanych w serii opracowań Zakładu Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, wykonanej pod kierownictwem J. Wierzbickiego (1997). Otwory wykonywano zestawem do wierceń ręcznych firmy Eijkelkamp. W badaniach wykorzystywano dwie łodzie hybrydowe z silnikami zaburtowymi. Głębokość otworów (od poziomu zwierciadła wody) wynosiła od 4 do 12,5 m. Celem tych prac było określenie profilu litologicznego współczesnych osadów facji korytowej, a także położenia (głębokości w profilu) oraz litologii utworów stanowiących ich podłoże. Wyniki badań posłużyły do uszczegółowienia obrazu układu granic wydzielen litologicznych w powierzchni stropu podłoża współczesnych aluwiów (Falkowski i in., 1992). Na odcinku miejskim w 2008 r. przeprowadzono tylko jeden echosondaż. Pomiar wykonano zestawem składającym się z echosondy jednowiązkowej Sonar-Lite firmy Ohmex zintegrowanej z odbiornikiem DGPS działającym w systemie EGNOS. Punktowe pomiary głębokości były wykonywane ze sprzętu pływającego z częstotliwością 1 pomiaru na sekundę (prędkość pływającego zestawu wynosiła od 3 do 5 m/s). Równoległe z echosondażem na odcinku koryta objętym badaniami batymetrycznymi wykonano punktowe pomiary rzędnej zwierciadła wody za pomocą zestawu GPS-RTK.

W drugim etapie badań prowadzonych głównie w rejonie Wysp Zawadowskich wykonano 60 wierceń w dnie koryta rozmieszczonych w 17 przekrojach poprzecznych. Ze względu na charakter odcinka rzeki w znacznie szerszym zakresie wykonano pomiary hydrograficzne. Założeniem było przeprowadzenie serii pomiarów w różnych warunkach hydrologicznych. Badania prowadzono od 18.05.2011 r. do 27.07.2011 r. przy niskich średnich i wysokich stanach wody. Wykonane one zostały sprzętem i według metodyki przyjętej w 2008 r. Dla każdego echoson-



Ryc. 1. Mapa lokalizacyjna terenu badań
Fig. 1. Location map of the studied area

dażu wykonano także pomiary rzędnej zwierciadła wody w korycie za pomocą odbiornika GPS-RTK. Ze względu na roztokowy charakter koryta (szczególnie w górnej części odcinka) konieczne było wyznaczenie granic mezoform korytowych (wysp i łach) oraz granic koryta w dniu każdego pomiaru. Kartowanie koryta wykonano za pomocą mobilnego GIS-u z oprogramowaniem ArcPad. Dane te posłużyły do korekty map batymetrycznych i hipsome-

trycznych w strefach, gdzie głębokość wody uniemożliwiała prawidłowe działanie echosondy (<0,3 m).

ETAPY BUDOWY I ROZBUDOWY BAZY DANYCH GIS

Baza danych wykonana na potrzeby badań obejmowała odcinek Wisły warszawskiej od 495 do 529 km (ryc. 1).

Podkład rastrowy stanowiły mapy topograficzne w skali 1 : 25 000 i PUWG Pułkowo 1942 strefa 4. Wszystkie dane w celu wspólnej analizy pozyskano lub przekonwertowano do tego układu współrzędnych. W związku z pełną dostępnością komercyjnego oprogramowania GIS zrezygnowano z używania aplikacji typu OpenSource. Podstawową platformę informatyczną stanowił pakiet ArcGIS firmy ESRI. W czasie trwania prac posługiwano się kolejnymi pakietami oprogramowania od wersji 8.1 w roku 2007 do wersji 10.2.1 obecnie. W pierwszym etapie prac wystarczające okazało się oprogramowanie o funkcjonalności ArcView (ArcView 8.1, ArcView 8.2). W drugim, ze względu na zróżnicowanie badań, zdecydowano się na produkty o najwyższej funkcjonalności (ArcInfo). Korzystano głównie z ArcGIS 9.1 i 9.3.1, a do rozbudowy projektu podczas prac terenowych używano także oprogramowanie GIS w wersji mobilnej (ArcPad 7.0). Tylko nieliczne analizy, takie jak modelowanie przepływów w korycie czy interpolacja wyników pomiarów hydrograficznych, odbywały się częściowo poza strukturą bazy danych. Jednak ich wyniki na etapach pośrednich lub końcowych zostały umieszczone w środowisku GIS (ryc. 2).

Początkowym etapem budowy bazy danych było umieszczenie w niej dostępnych materiałów archiwalnych. Podstawowymi rastrowymi materiałami archiwalnymi były: plan odcinka miejskiego Wisły zawierający mapę batymetryczną koryta w skali 1: 10 000, wykonaną na potrzeby budowy wodociągów w Warszawie w 1901 r.; mapa litologii i morfologii podłoża aluwiiów wykonana przez Falkowskiego wraz z zespołem (Falkowski i in., 1992); mapa dokumentacyjna międzywała na podkładzie ortofotomapy ze zdjęć PHARE oraz ortofotomapa wykonana w 2008 r. na podstawie kolorowych zdjęć lotniczych pochodzących z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (GUGiK). Jedynie w przypadku ortofotomapy z 2008 r. dysponowano jej wersją elektroniczną. Pozostałe materiały poddane zostały cyfryzacji i zarejestrowane w bazie danych jako rastrowe warstwy informacyjne. Mapa litologii i morfologii podłoża aluwiiów została dodatkowo zwektoryzowana. W bazie GIS umieszczono także wektorową warstwę informacyjną z kilometrażem Wisły (RZGW), stanowiącą element bazy danych, wykonanej na potrzeby projektu badawczego „Związek dynamiki wybranych procesów korytowych ze zróżnicowaniem rzeźby i litologii podłoża aluwiiów na przykładzie doliny Wisły od Annapola do Modlina”, realizowanego w latach 2001–2004 (projekt badawczy nr 8 TO7G 020 21). Kilometraż ten, w ramach prac Zakładu Hydrogeologii SGGW w Warszawie, został w 2001 r. zwektoryzowany na podstawie czarno-białych panchromatycznych zdjęć lotniczych.

Kolejnymi etapami rozbudowy bazy danych było systematyczne umieszczanie w niej wyników badań terenowych wykonywanych w 2008 r. (tranzytowy odcinek miejski), a następnie w 2011 r. (strefa przejściowa od Wysp Zawadowskich do Siekierok). Każdy z etapów zakończony był analizą, w wyniku której generowane były kolejne warstwy informacyjne oraz powiązane z nimi dane opisowe. Ich synteza była podstawą określenia zależności między budową geologiczną, rzeźbą, warunkami hydrologicznymi i czynnikami antropogenicznymi a morfologią badanego odcinka koryta. Efektem końcowym każdego etapu prac była wizualizacja wyników w postaci warstw informacyj-

nych i szeregu map tematycznych stanowiących ich graficzną ilustrację.

W bazie danych w postaci wektorowych warstw informacyjnych umieszczono między innymi: lokalizację sondowań i wierceń w korycie, pomiary rzędnej zwierciadła wody, aktualne granice koryta oraz położenie elementów jego zabudowy hydrotechnicznej. Na tej podstawie wyznaczono linie przekrojów geologicznych. Pomiary wykonane w bazie danych umożliwiły ich poprawną lokalizację w terenie. Na podstawie analizy związków przestrzennych pomiędzy lokalizacją wierceń, ich interpretacją (przekroje geologiczne) a archiwalną mapą litologii i morfologii podłoża aluwiiów (Falkowski i in., 1992) wykonano wektorową warstwę informacyjną, obrazującą przebieg izolacji odpornej na erozję stropu ich podłoża. Była ona kluczowa dla określenia wpływu budowy geologicznej strefy korytowej na morfogenezę odcinka Wisły warszawskiej.

W przypadku opracowania wyników pomiarów batymetrycznych dane, oddzielnie dla każdego echosondażu, były interpolowane z wykorzystaniem programu Surfer firmy Golden Software. Wyniki interpolacji zostały skorygowane na podstawie danych (głównie położenia granic mezoform korytowych), pozyskanych w czasie kartowania strefy korytowej w dniu wykonywania echosondażu. Efektem interpolacji były wektorowe mapy batymetryczne i hipsometryczne odpowiadające różnym warunkom hydrologicznym (stany wody). Dzięki przypisanym atrybutom georeferencyjnym zostały one umieszczone w bazie danych w celu dalszej analizy.

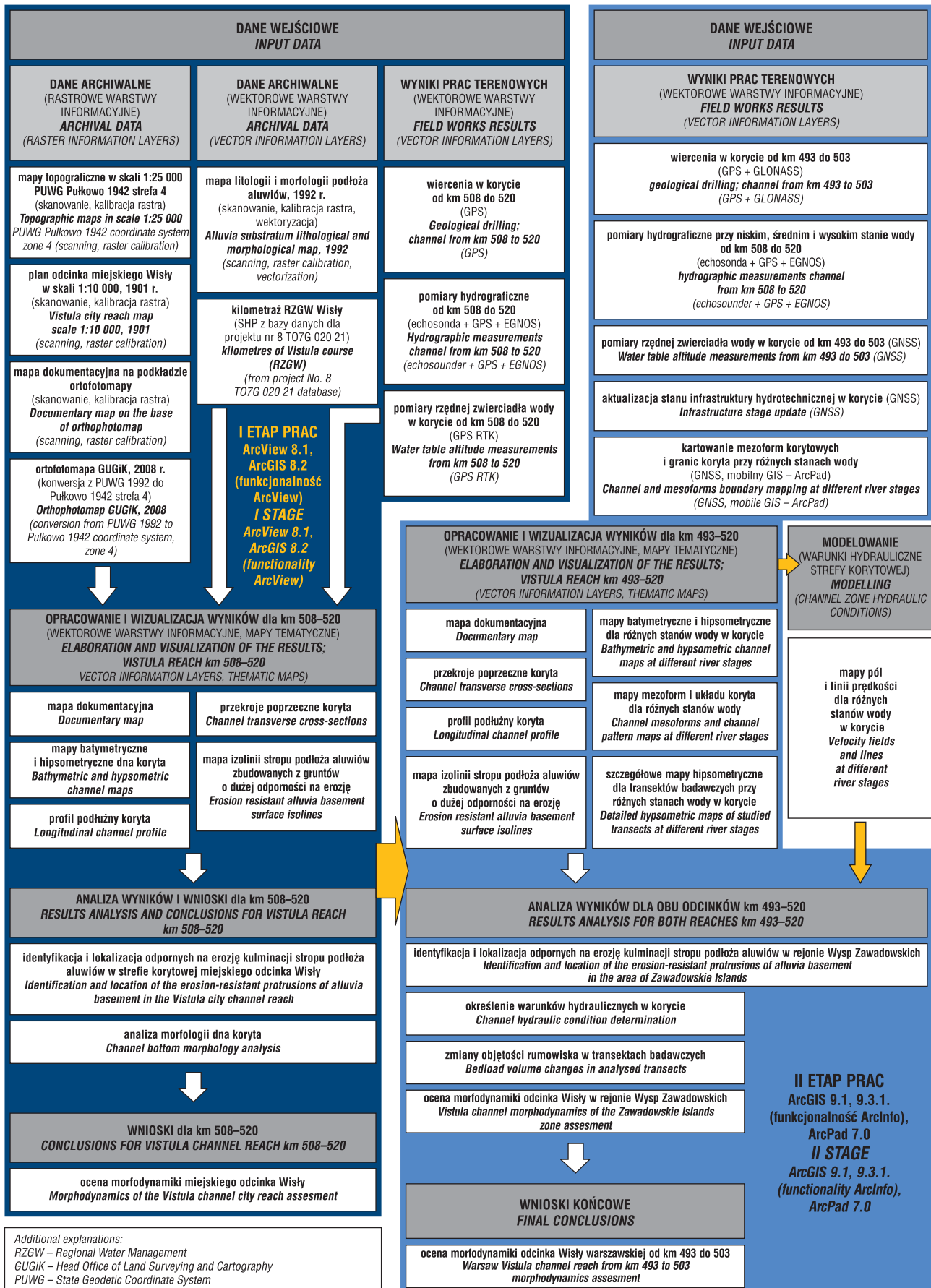
Poza bazą danych dokonano także określenia warunków hydraulicznych strefy korytowej dla obu analizowanych odcinków. Do obliczeń zastosowano program OpenFOAM, w którym za pomocą dwuwymiarowego modelu hydrodynamicznego CFD, wykorzystującego metodę elementów skończonych, przeprowadzona została przez P. Siwickiego symulacja numeryczna przepływu. Geometria koryta wprowadzona do modelu pochodziła z wygenerowanych map batymetrycznych. Modelowanie wykonano dla różnych wartości natężenia przepływu odpowiadającym niskim, średnim i wysokim stanom wody. Efektem tych prac były mapy pól i linii prędkości dla analizowanych przepływów (Falkowski i in., 2011).

Umieszczenie w bazie danych map batymetrycznych i hipsometrycznych, wykonanych na podstawie wszystkich echosondaży, pozwoliło na porównanie morfologii dna koryta w kreślonym przedziale czasowym, a w konsekwencji analizę tempa i skali zachodzących zmian. Szczegółową analizę przeprowadzono dodatkowo w trzech wybranych transektach. Transekty te miały postać prostopadłych do głównego nurtu prostokątnych poligonów o szerokości 200 m (ryc. 3). Na podstawie obliczeń zmian objętości aluwiiów korytowych w wyznaczonych poligonach podczas poszczególnych echosondaży (wykonanych przy różnych stanach wody) oszacowano zmiany dynamiki transportu rumowiska.

Uproszczony schemat struktury bazy GIS i sposobu analizy danych przedstawia rycina 2.

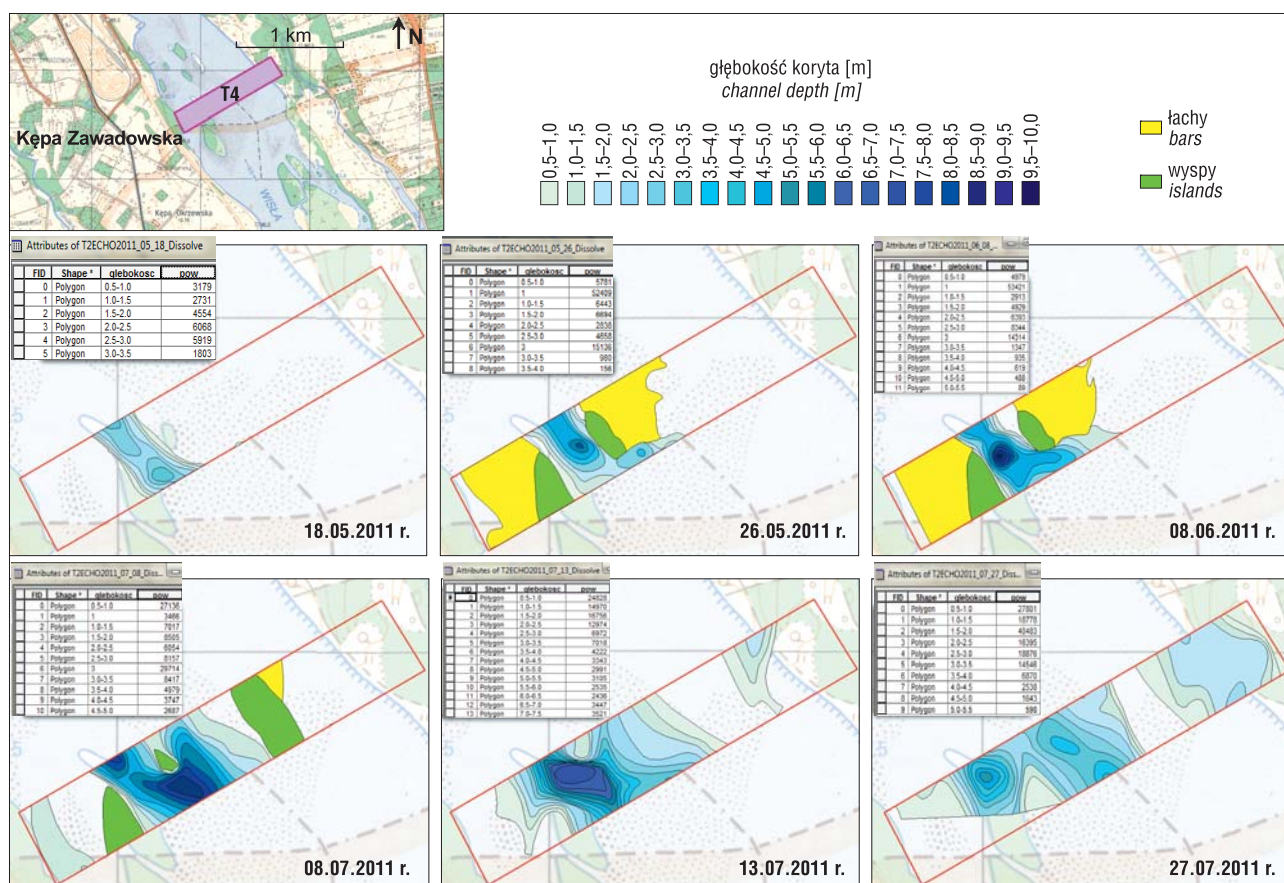
WYNIKI I DYSKUSJA

Podłoże współczesnych aluwiiów korytowych Wisły na analizowanym odcinku budują osady pliocenu i plejstoce-



Ryc. 2. Schemat struktury bazy GIS i analizy danych; w przypadku danych wejściowych w nawiasach podano sposób ich pozyskania lub źródło atrybutów georeferencyjnych

Fig. 2. Simplified scheme of the GIS database structure and data analysis; the source georeferenced attributes of the input data or the way was obtained is shown in the parentheses



Ryc. 3. Mapy batymetryczne w obrębie transektu T4 na podstawie echosondaży i kartowania strefy korytovej

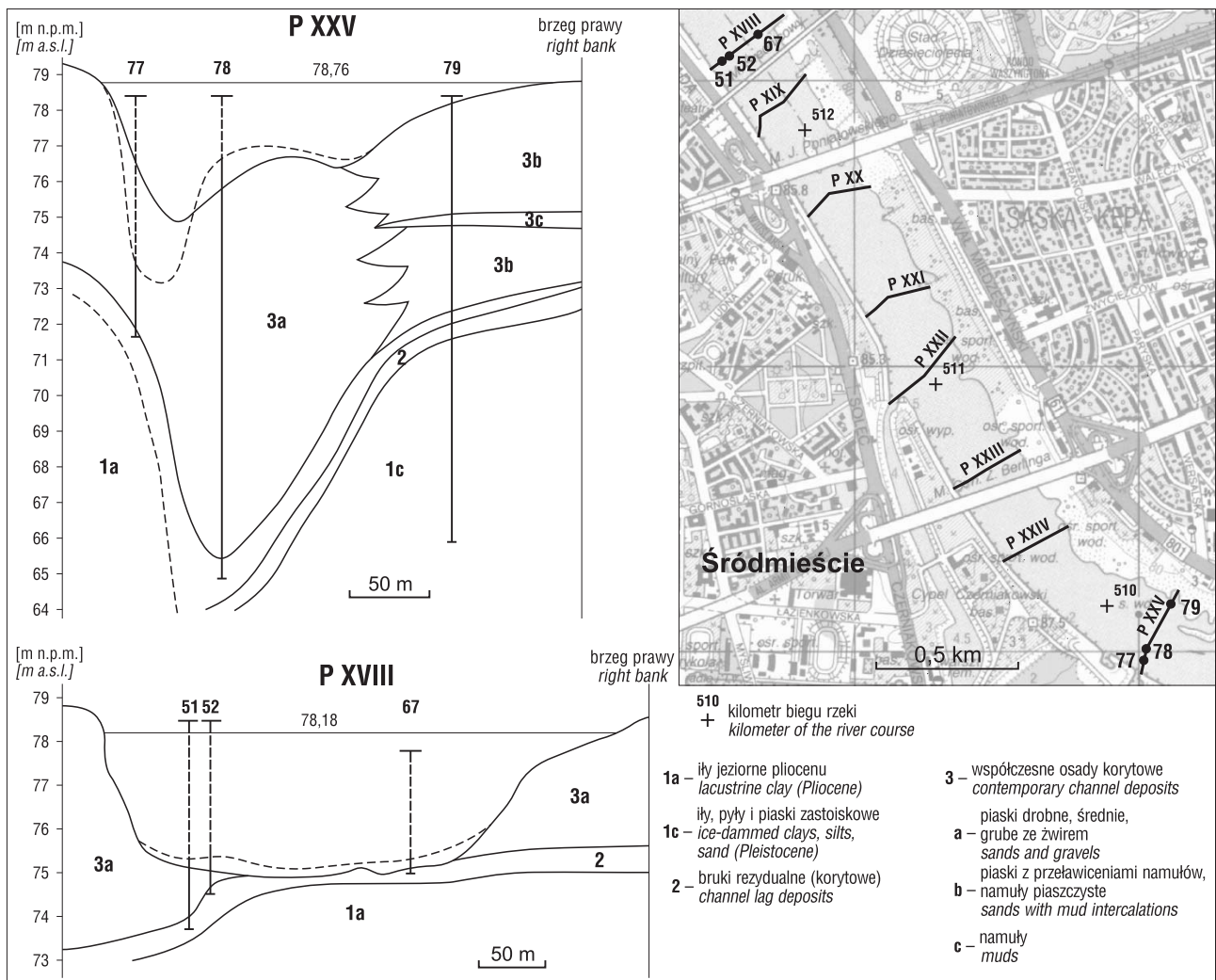
Fig. 3. Bathymetric maps of transect T4 based on the echosoundings and channel mapping

nu, przykryte warstwą rezydualną złożoną z grubych żwirów, otoczków i głazów. Powierzchnia ta posiada w analizowanej strefie złożoną morfologię, na którą składają się: rynny – wąskie strefy obniżenia powierzchni podłoża holocenijskich aluwów, ciągnące się przeważnie zgodnie z biegiem współczesnego koryta rzeki, rygle – formy kopulaste występujące często łącznie z rynnami, progi – poprzeczne garby przegradzające strefę korytową oraz wypłaszczenia. Dominujące w budowie powierzchni podłoża współczesnych aluwów korytowych utwory spiste (iły pliocenu, gliny zwałowe i iły zastoijskowe) charakteryzują się większą odpornością na rozmywanie (por. Hjulström, 1935). Proces ten potęgowany jest silnym glaciotektonicznym ich skompresowaniem, które w przypadku iłów pliocenijskich objawia się występowaniem charakterystycznych złuskowaczeń. Podobnie trudno rozmywalne (termin wprowadzony przez Falkowskiego, 1990) są plejstocenijskie, gruboziarniste osady rzeczne. Tego typu osady wiązała Sarnacka (1992) z działalnością Wisły w czasie interglacjału eemskiego. Opisywane przez tę autorkę w dolinie Wisły warszawskiej osady rzeczne zawierają ziarna o średnicy do 15 cm, co zdecydowanie przekracza kompetencję współczesnej, jak i najprawdopodobniej eemskiej rzeki. Warstwy wzbogacone w grube ziarna mają zatem charakter residuum. Odporność na rozmywanie utworów budujących podłoże współczesnych aluwów zwiększa powszechne obrukowanie ich powierzchni takim właśnie materiałem rezydualnym. Zjawisko to w najbardziej spektakularny sposób jest widoczne przy niskich stanach wody

w strefie tzw. progu żoliborskiego (Falkowski & Ostrowski, 2012).

Złożona pod względem morfologicznym kulminacja trudno rozmywalnego podłoża współczesnych aluwów pełni na odcinku Wisły warszawskiej rolę lokalnej bazy erozyjnej. O jej znaczeniu dla stabilności środowiska współczesnej równi zalewowej świadczą doświadczenia zarządcy tego odcinka rzeki – Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej (RZGW) w Warszawie, którego służby zarejestrowały obniżenie dna koryta, jakie nastąpiło po prowadzonej lokalnie eksploatacji głazów z koryta Wisły (Wierzbicki i in., 1997). W latach 1989–1991 na odcinku koryta od 508 do 518 km wydobyto około 2845 m³ głazów, co doprowadziło do obniżenia stropu kulminacji nawet o ponad 3 m (Wierzbicki i in., 1997). Obniżanie powierzchni dna Wisły związane jest jednak głównie z eksploatacją piasku z dna koryta (Zielińska, 1960; Skibiński, 1963; Popek & Żelazo, 2000). Skala tej eksploatacji w poszczególnych latach przekraczała wielokrotnie szacowany na podstawie analiz hydrologicznych transport rumowiska wlezonego (Skibiński, 1963; Żelaziński i in., 2005).

Jak wykazały wyniki przeprowadzonych badań, miąższość współczesnych aluwów w dnie koryta zmienia się w czasie. W strefie głównego nurtu nie przekracza zazwyczaj 1 m. W strefach obniżenia powierzchni stropu trudno rozmywanego podłoża aluwów może, w warunkach stanów średnich i niskich, przekraczać 15 m. Aluwia korytowe Wisły to głównie piaski średnie i drobne z przelawiczeniami żwirów. Warstwy wzbogacone o grubsze



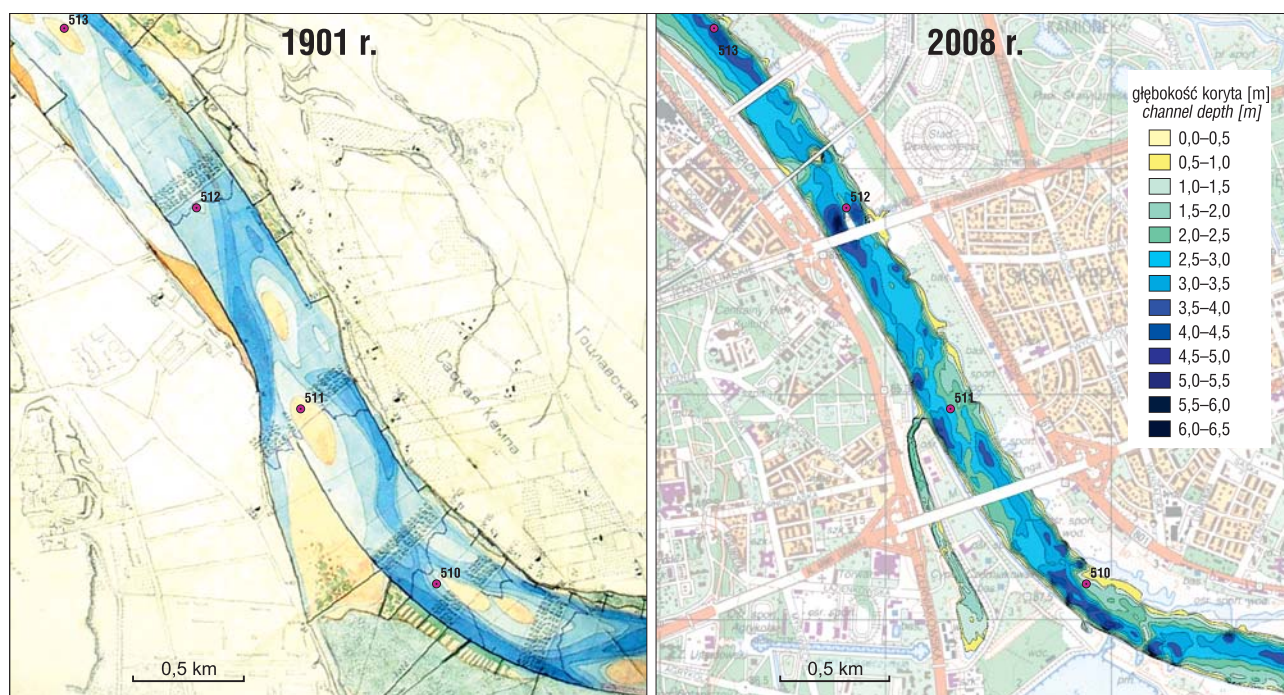
Ryc. 4. Wybrane przekroje geologiczne fragmentu strefy korytowej Wisły
Fig. 4. Chosen geological cross-sections of the Vistula channel zone

ziarna wskazują głębokość przeróbki wezbraniowej. Dowodzą tego spotykane wśród żwirów i otoczków budujących takie przewarstwienia okruchy betonu. W strefach zwolnienia prędkości przepływu wody i okresowej jej stagnacji deponowane są piaski z przeławieniami namulów oraz namuły. Osady takie rejestrowane były np. w przestrzeniach międzyostrogowych albo w strefach, w których ze względu na sztuczną zmianę morfologii stropu podłoża współczesnych aluwii dochodziło do zmian położenia głównego nurtu. Przykładem takiego miejsca jest rejon ujęcia wód przy ul. Czerniakowskiej, gdzie w stropie iltów pliocenijskich dla poprawy warunków żeglugi wycięto rynę, co spowodowało koncentrację nurtu w jej strefie. Znajdujące się po drugiej stronie koryta ujęcie poddenne „Gruba Kaśka” znalazło się w związku z tym w strefie okresowej stagnacji wód. W aluwach korytowych, stanowiących złożę filtracyjne tego ujęcia, zaczęły pojawiać się przeławienia organiczne (namuły) (ryc. 4). Fakt ten wpłynął na incydentalne pogarszanie się jakości wód eksploatowanych tym ujęciem (Falkowski i in., 2004).

Najmniejsze głębokości występowania stropu podłoża aluwii rejestruje się na śródmiejskim odcinku koryta poniżej Siekier (506 km). W połączeniu ze zwężeniem koryta zabudową regulacyjną jest to przyczyną zwiększonych prędkości przepływu (Gutry-Korycka i in., 2006) i

dominacji na tym odcinku tranzytu rumowiska. Zjawisko to występuje najsilniej na odcinku śródmiejskim. Rejestrowane tu zmiany morfologii koryta (w warstwie współczesnych aluwii facji korytowej) wynikają głównie z dostosowywania się krzywizny linii nurtu i wielkości kotłów eworsyjnych powstających w sąsiedztwie ostróg regulacyjnych (tam poprzecznych) do zmian natężenia przepływu (por. Leopold & Wolmann, 1957).

Porównanie wyników badań prowadzonych w 2008 r. z wynikami badań archiwalnych (Popek i in., 2009) wskazuje, że pod koniec XX w. położenie dna w strefie nurtowej odcinka śródmiejskiego ustabilizowało się. Dno koryta osiągnęło w wielu miejscach poziom stropu trudno rozmywanego podłoża współczesnych aluwii. Fakt ten potwierdzają także wyniki obliczeń przeprowadzonych przez Żelazińskiego z zespołem (2005). Od 2000 r. obserwuje się nawet niewielkie podnoszenie się powierzchni dna w wyniku akumulacji piasków (Popek i in., 2009). Na odcinku śródmiejskim morfologia stropu podłoża aluwii warunkuje układ głównego nurtu. Dowodzi tego ukształtowanie powierzchni dna koryta w rejonie Portu Czerniakowskiego. Kanał i basen portu zlokalizowano w odnodze roztokowego koryta Wisły. Przed regulacją pełniła ona rolę wezbraniowego koryta przelewowego o założeniach strukturalnych. Potwierdza to mapa batymetryczna, wykonana



Ryc. 5. Porównanie przebiegu głównego nurtu Wisły warszawskiej (509–513 km) w latach 1901 i 2008 na podstawie „Planu odcinka miejskiego Wisły w skali 1: 10 000” oraz echosondaży wykonanych w dniach 9, 12 kwietnia 2008 r. (Falkowski & Ostrowski, 2009)
Fig. 5. Comparison between the Warsaw Vistula reach (km 509–513) thalweg direction of 1901 and 2008 on the base of “Map of the city reach of Vistula River on a scale of 1:10 000” and echo sounding results accomplished in 9 and 12 of April 2008 (Falkowski & Ostrowski, 2009)

w 1901 r. w związku z budową ujęcia wody dla miasta, zlokalizowanego przy ulicy Czerniakowskiej. Obraz batymetrii tej strefy nie uległ od tamtych czasów znaczącej zmianie (ryc. 5), mimo że rejon portu w efekcie zabudowy brzegów nie jest już strefą przepływu wód wezbraniowych. W stagnującej wodzie przebiega obecnie sedimentacja organiczna, a miąższość luźnych osadów sarpopelowych osiąga w centralnej części basenu portu 2 m.

Głębokość występowania stropu trudno rozmywanego podłoża współczesnych aluwiów zwiększa się w górę biegu rzeki. W rejonie Wysp Zawadowskich nie stwierdzono jego obecności do głębokości 12,5 m poniżej poziomu średniej wody (Falkowski & Ostrowski, 2012). Na tym odcinku szerokość międzywała zwiększa się ponad dwukrotnie w stosunku do odcinka śródmiejskiego i wynosi ok. 1000 m. Mniej intensywna jest także zabudowa hydrotechniczna koryta. Na odcinku tym zarejestrowano dużą dynamikę zmian morfologii koryta (Kałmykow-Piwińska & Falkowski, 2012). W warunkach dużej podaży rumowiska okresowo obserwuje się tutaj nadbudowywanie powierzchni międzywała. Odcinek ten można określić jako rzekę quasi-dojrzałą swobodną (por. Falkowski, 1971). Podobny charakter ma odcinek koryta poniżej Portu Żerańskiego.

Rejon od Wysp Zawadowskich do Siekierok jest strefą przejściową pomiędzy odcinkiem koryta rzeki quasi-dojrzałej swobodnej, a odcinkiem koryta rzeki młodej, z nie w pełni wykształconym cokołem erozyjnym, skrepowanej zabudową hydrotechniczną (Falkowski, 1971).

WNIOSKI

Zastosowanie metod geoinformacyjnych umożliwiło wspólną analizę geoprzestrzenną wielu materiałów archi-

walnych oraz danych pozyskanych różnymi technikami na poszczególnych etapach badań strefy korytowej Wisły warszawskiej. Pozwoliło to na precyzyjne wyznaczenie stref o zróżnicowanej morfodynamice oraz wskazanie przyczyn takiego zróżnicowania.

W warunkach ewolucji charakteru procesów morfodynamicznych, będącej cechą środowisk fluwialnych Niżu Polskiego (Starkel, 1983), specyfikę odcinka Wisły warszawskiej kształtują dwa czynniki: morfologia stropu podłoża współczesnych aluwiów oraz zabudowa regulacyjna koryta. Wpływ tych czynników jest największy w dolnej (śródmiejskiej) części badanego odcinka i stopniowo maleje w górę biegu rzeki.

W analizowanym odcinku wyróżnić można trzy strefy morfogenetyczne: rzeki quasi-dojrzałej swobodnej (rejonu Wysp Zawadowskich), strefę rzeki młodej skrepowanej budowlami regulacyjnymi (od Siekierok do Portu Żerańskiego – odcinek śródmiejski) oraz łączącą je strefę przejściową.

Uwarunkowana budową geologiczną i sposobem zagospodarowania duża dynamika przepływu na odcinku śródmiejskim jest przyczyną tranzytowego pod względem bilansu rumowiska jego charakteru.

Znaczenie ukształtowania powierzchni stropowej podłoża współczesnych aluwiów korytowych w stabilizacji erozji głębszej narzuca konieczność jego ochrony.

Autorzy dziękują recenzentom niniejszej pracy za cenne uwagi do pierwotnej wersji artykułu.

LITERATURA

BIERNACKI Z. 1975 – Holocene and Late Pleistocene alluvial sediments of the Vistula River near Warsaw. *Biul. Geol.*, 19: 199–217.

- BRYKCYŃSKA E. & BRYKCYŃSKI M. 1974 – Geologia przekopu Trasy Łazienkowskiej na tle problematyki osadów trzeciorzędu i czwartorzędu w Warszawie. Pr. Muz. Ziemi, 22: 199–218.
- FALKOWSKI E. 1971 – Historia i prognoza rozwoju układu koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski. Biul. Geol., 12: 5–121.
- FALKOWSKI E. 1990 – Morphogenetic classification of river valleys developing in formerly glaciated areas for needs of mathematical and physical modeling in hydro technical projects. Geogr. Pol., 58: 55–67.
- FALKOWSKI E., KRAŻULIS K., GRANACKI W., FALKOWSKI T. & BIEGANOWSKI R. 1992 – Mapa stropu gruntów trudnorozróżnialnych wraz z ich litologią w korycie Wisły. Zakład Badań Geologicznych dla Budownictwa, Warszawa.
- FALKOWSKI T., KIEDRYŃSKA L., NOWAK B., PACHOLEC B. & ŻŁOTOSZEWSKA-NIEDZIAŁEK H. 2004 – Jakość wód eksploatowanych ujęciem podziemnym w Warszawie. Prz. Nauk. Inż. Kształt. Środ., 13: 126–137.
- FALKOWSKI T. & OSTROWSKI P. 2009 – Budowa geologiczna strefy korytowej Wisły warszawskiej i jej znaczenie dla związanej z korytem infrastruktury. Nauka Przyroda Technika, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, dział: Melioracje i Inżynieria Środowiska, 3 (3): 82.
- FALKOWSKI T., OSTROWSKI P., SIWICKI P., WIERZBICKI G., KAŁMYKOW-PIWIŃSKA A. & BUJAKOWSKI F. 2011 – Badania geologiczne strefy korytowej Wisły na odcinku od Wysp Zawadowskich do ujścia Wilanówki w celu oceny wielkości transportu i depozycji rumowiska, maszynopis, Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie.
- FALKOWSKI T. & OSTROWSKI P. 2012 – Wpływ budowy geologicznej na zróżnicowanie dynamiki procesów korytowych w warunkach silnej antropopresji na przykładzie Wisły warszawskiej. Acta Geographica Lodziensia, 100: 51–63.
- GUTRY-KORYCKA M., MAGNUSZEWSKI A., SUCHOŻEBERSKI J., JAWORSKI W., MARCINKOWSKI M. & SZYDŁOWSKI M. 2006 – Numerical estimation of flood zones in the Vistula River Valley, Warsaw, Poland. Int. Assoc. Hydr. Sci. Publ., 308: 191–195.
- HJULSTRÖM F. 1935 – Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fryis. Bull. Geol. Inst. Uppsala, 25: 221–527.
- KAJAK Z. 1992 – The river Vistula and its floodplain valley (Poland) – its ecology and importance for conservation. [W:] Boon P., Petts G.E., Calow P. (red.), River conservation and management, J. Wiley & Sons: 35–49.
- KAŁMYKOW-PIWIŃSKA A. & FALKOWSKI T. 2012 – Ocena stabilności morfologii koryta w oparciu o analizę archiwalnych materiałów kartograficznych i fotogrametrycznych wykonywana w środowisku GIS. Prz. Nauk. Inż. i Kształt. Środ., 58: 251–262.
- KORNACKI Z. 1960 – Przyczyny obniżania się dna Wisły w Warszawie. Gosp. Wodna, 7: 305–307.
- KOWALSKI W.C. 1988 – Geologia inżynierska. Wyd. Geol., Warszawa.
- LEOPOLD L.B. & WOLMAN M.G. 1957 – River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers 14, U.S. Geological Survey, Professional Paper: 282–300.
- MAGNUSZEWSKI A. 2013 – Procesy korytowe rzek nizinnych a bezpieczeństwo powodziowe. WGSr UW, Warszawa: 170.
- MAGNUSZEWSKI A. & GUTRY-KORYCKA M. 2009 – Rekonstrukcja przepływu wielkich wód Wisły w Warszawie w warunkach naturalnych. Pr. i Stud. Geogr., 43: 141–151.
- MAGNUSZEWSKI A., GUTRY-KORYCKA M. & MIKULSKI Z. 2012 – Historyczne i współczesne warunki przepływu wód wielkich Wisły w Warszawie cz. I i II. Gosp. Wodna, 1: 9–17.
- NALEŻYTY W.Z. 1972 – Przekrój geologiczny trasy mostowej „Łazienkowskiej” w Warszawie. Prz. Geol., 2: 93–97.
- OSTROWSKI P. & FALKOWSKI T. 2012 – GIS jako narzędzie integrujące metody badań morfologii dna doliny Bugu na odcinku jego Podlaskiego Przełomu. Przegląd Naukowy. Inż. i Kształt. Środ., 21 (3): 151–158.
- POPEK Z., FALKOWSKI T. & OSTROWSKI P. 2009 – Analiza potrzeb i możliwości przebudowy koryta Wisły w Warszawie. Nauka Przyroda Technologie, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, dział: Melioracje i Inżynieria Środowiska, 3 (3): 97.
- POPEK Z. & ŻELAZO J. 2000 – Analiza zmian przekrojów poprzecznych i profilu podłużnego koryta Wisły w rejonie Warszawy. Zesz. Nauk. AR Wrocł. 385, Inż. Środ., 11: 377–388.
- RÓŻYCKI S.Z. 1972 – Plejstocen Polski środkowej na tle przeszłości w późnym trzeciorzędzie. PWN, Warszawa.
- RÓŻYCKI S.Z. & SUJKOWSKI Z. 1936 – Profile geologiczne przez Warszawę. Zarząd Miejski w Warszawie.
- SARNACKA Z. 1992 – Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. Pr. Państw. Inst. Geol., nr 138.
- SKIBIŃSKI J. 1963 – Włoczenie rumowiska dennego przez Wisłę w rejonie Warszawy. Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, 53: 58–63.
- STARKEL L. 1983 – The reflection of hydrologic changes in fluvial environment of the temperate zone during the last 15 000 years. [W:] Gregory J. (red.), Background to Paleohydrology, J. Wiley, Chichester: 213–234.
- TOMIAŁOJĆ J. 1993 – Uwagi wstępne i podsumowujące. [W:] L. Tomiałojć (red.), Ochrona przyrody i środowiska w dolinach nizinnych rzek Polski. Wydawnictwo Instytutu Ochrony Przyrody PAN, Kraków: 1–7.
- VANDERBERGHE J. 2002 – The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary. Quaternary International 91, Pergamon: 17–23.
- WATYCHA L. 1973 – Uwagi o budowie geologicznej „Trasy Łazienkowskiej” w Warszawie. Prz. Geol., 21 (8/9), 458–465.
- WIERZBICKI J., KUŻNIAR P. & WILK E. 1997 – Stałość pionowego układu i morfologii koryta oraz zwierciadła wody Wisły Warszawskiej na odcinku położonym między ujściem rzeki Pilicy a ujściem rzeki Narwi. Zakładu Budownictwa Wodnego Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej; maszynopis, archiwum ODGW Warszawa.
- ZIELIŃSKA M. 1960 – Zmiana niwelety Wisły w Warszawie na tle zmian profilu podłużnego środkowej Wisły. Gosp. Wodna, 11: 477–480.
- ŻELAZIŃSKI J., BARAŃSKI J., KADŁUBOWSKI A. & WERESKI S. 2005 – Application of the CCHE Models for Explanation of Factors Causing Deep Erosion of Vistula River Bed in Warsaw. Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., E-5 (387): 87–113.

Praca wpłynęła do redakcji 16.06.2014 r.

Akceptowano do druku 20.02.2015 r.