

Tomasz Falkowski

Analiza geomorfologiczna powierzchni tarasowej jako element prognozy geologiczno-inżynierskiej w budownictwie wodnym

Geomorphologic analysis of the river terrace as an element in the geological engineering prognosis of the regulation structures safety

Streszczenie: Badania prowadzone w dolinie Wisły środkowej wykazały występowanie w jej strefie korytowej kulminacji podłoża aluwiów, zbudowanych z utworów o większej odporności na erozję. Na odcinku przełomu Wisły są to grunty skaliste, głównie kredy i paleogenu, a poniżej niego grunty nieskaliste paleogenu i neogenu (w tym także różnorodne utwory glacialne). Utwory kenozoiku są często zaburzone glacictektonicznie. Na powierzchni tych osadów występują powszechnie rezydualne bruki zbudowane ze żwirów i otoczków. Ich obecność świadczy o odsłanianiu powierzchni kulminacji w czasie przepływu wielkich wód. Morfologia podłoża aluwiów wpływa wtedy na koncentrację strumienia wód rzeki. Zjawisko to przed wybudowaniem wałów objawiało się różnicowaniem stref erozji i depozycji wezbraniowej na powierzchni tarasu zalewowego, a obecnie jest przyczyną powtarzających się awarii budowli regulacyjnych.

Słowa kluczowe: dolina rzeczna, podłoże aluwiów, budowle hydrotechniczne

Abstract: Investigations within the channel zone of the Middle Vistula River have shown the presence of culminations of the basement composed of deposits resistant to erosion. On their surface in the bottom part of the present-day channel facies occur residual lags built of gravels and pebbles. They point to the exposure of the surface of the alluvial basement in the channel bottom during high-waters. Culminations of the resistant alluvial basement often reveal a complex morphology which influences the course of the main channel, particularly during high-water stages. The stable trend to concentrate the high-water stream may be the reason of the damage of regulating and flood control system structures. The influence of the basement on the concentration of the high-water flow may also induce the formation of specific erosional and depositional forms on the terrace surface. Such forms can thus serve as

indicators of these zones. The paper presents examples of three reaches from the analysed 250-km fragment of the Middle Vistula River Valley.

Key words: river valley, alluvial basement, hydrotechnical structures

Wstęp

Analiza geomorfologiczna jest istotnym elementem konstruowania modeli budowy geologicznej dolin rzecznych. Kształt sieci rzecznej bywa odzwierciedleniem tektoniki podłoża (Spitz, Schumm, 1997; Twindale, 2004). Kryteria geomorfologiczne umożliwiają wydzielenie tarasów rzecznych. Analiza geomorfologiczna powierzchni tarasu holoceniowego pozwala na wydzielenie w jego obrębie obszarów formowanych w warunkach odmiennych reżimów przepływu rzeki (Falkowski, 1971, 1990; Mycielska-Dowgiałło, 1978; Kozarski, 1983; Starkel, 1983; Szumański, 1986), które odtwarzać można na podstawie geometrii kopalnych koryt (Rotnicka, Rotnicki, 1988). W geomorfologii dna doliny rzecznej zapisane są także na przykład okresy wzrostu częstotliwości zjawisk powodziowych (Ralska-Jasiewiczowa, Starkel, 1988).

Charakter zjawisk fluwialnych odtwarzany jest na podstawie analizy sedymentologicznej zespołów warstw osadów w ramach geomorfologii szczegółowej (Gradziński, 1973; Zieliński, 1998; Gębica, 2004). Analiza geomorfologiczna może być też podstawą prognozowania przebiegu zjawisk geodynamicznych w dnie doliny w przyszłości (Falkowski, 1971; Falkowski, 2006).

Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie możliwości występowania naturalnych, związanych z budową strefy korytowej tendencji do koncentrowania nurtu wielkich wód w pewnych określonych jej strefach. Odczytanie takich tendencji powinno być istotą prognozy geologiczno-inżynierskiej opisującej interakcje pomiędzy hydrotechnicznymi budowlami regulacyjnymi a środowiskiem koryta rzeki. Zagadnienie to może być istotne dla obiektów wznoszonych zgodnie z zasadami tak zwanej regulacji naturalnej, w ramach której w trakcie wyznaczania przebiegu trasy regulacyjnej uwzględnia się między innymi zróżnicowanie podatności na erozję występujących w dnie doliny gruntów (Żbikowski i in., 1992). W dolinach rzecznych na Niżu Polskim powszechnie rejestruje się występowanie w podłożu współczesnych aluwii kulminacji zbudowanych z utworów trudno rozmywanych (Falkowski, 1990). Powierzchnia stropowa osadów budujących takie kulminacje bywa odsłaniana w dnie koryta w czasie przepływu wielkich wód. Jej skomplikowana morfologia oddziałuje wtedy na koncentrację wód w korycie. Czynnikiem sprzyjającym odsłanianiu stropu trudno rozmywanego podłoża są ograniczenie szerokości koryta wielkich wód w miejscach zwężenia strefy międzywala, a także odporność na rozmywanie brzegów zbudowanych z serii spoiwych utworów wezbraniowych. Charakterystykę ta-

kich serii podają między innymi Myślińska (1984) oraz Kraużlis i in. (2003). Powiększaniu głębokości przeróbki aluwioów sprzyja ponadto obserwowana obecnie w rzekach polskich tendencja do pogłębiania się różnic pomiędzy przepływami ekstremalnymi (Ozga-Zielińska, 1997).

W ramach prac wstępnych przeprowadzono analizę geomorfologiczną powierzchni tarasu zalewowego. Dokonano też przeglądu materiałów archiwalnych RZGW Warszawa, administratora odcinka Wisły środkowej, pod kątem powtarzalności zatorów lodowych oraz awarii budowli regulacyjnych. Do dalszych badań zostały wytypowane odcinki strefy korytowej posiadające liczne ślady erozji i depozycji wód wezbraniowych.

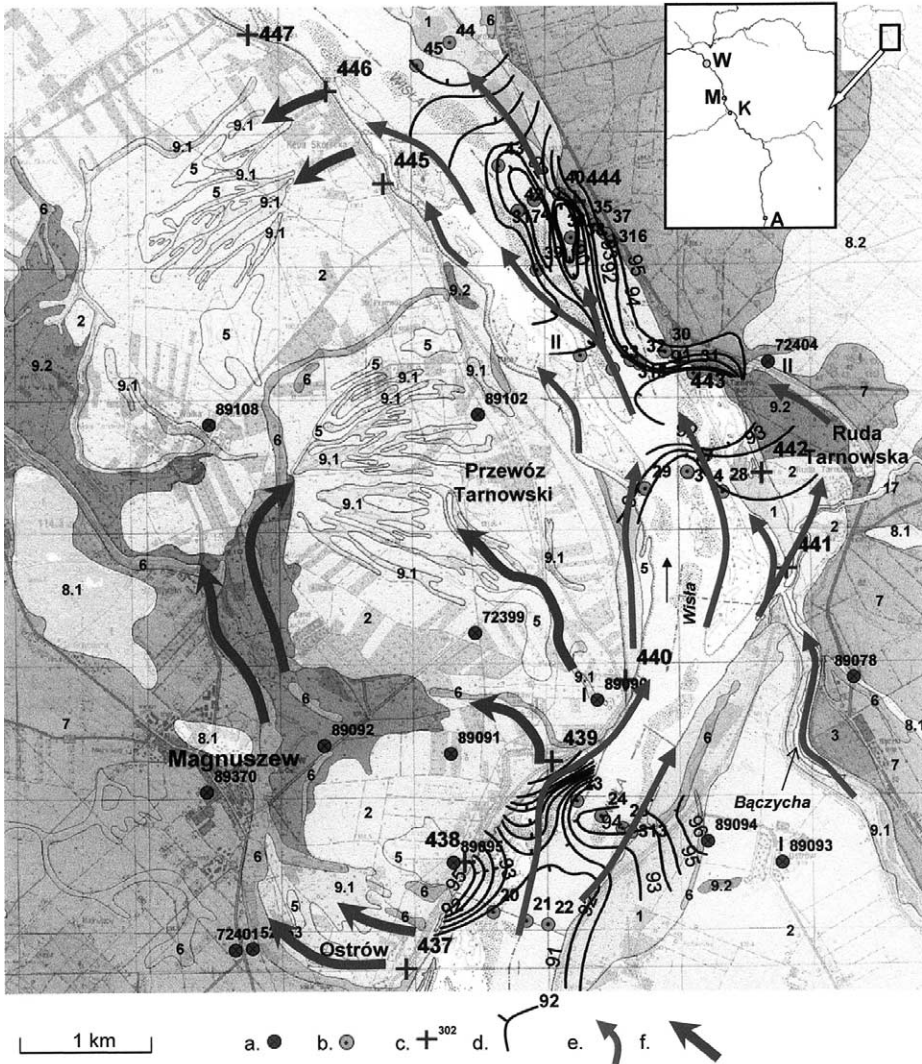
W wytypowanych odcinkach koryta wykonano wiercenia i sondowania, które rozmieszczano w poprzecznych przekrojach oddalonych od siebie o około 1000 m. Odległość pomiędzy wierceniami w korycie wynosiła około 100 m. Ich wyniki pozwoliły na ustalenie litologii utworów budujących kulminacje oraz wykreślenie izohips ich powierzchni stropowej. Przeprowadzono także inwentaryzację i ocenę stanu budowli regulacyjnych w wybranym odcinku koryta. Na wyznaczonych odcinkach wykonano badania echosondażowe. Punkty dokumentacyjne lokalizowane były w terenie za pomocą techniki GPS. Badania te prowadzone były przy użyciu echosondy sprzężonej z odbiornikiem DGPS. Zestaw umożliwiał rejestrację głębokości i współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych z częstotliwością co 3 sekundy. Wyniki prac były rejestrowane w bazie danych GIS.

Wyniki

W wytypowanym na podstawie analizy geomorfologicznej odcinku koryta Wisły od kilometra 428 (rejon ujścia Radomki) do kilometra 447 (rejon Wilgi) stwierdzono występowanie trzech stref kulminacji podłoża aluwioów. Strop powierzchni tych form występuje na głębokości 5–7 m poniżej średniej wody. Poza kulminacjami strop podłoża występuje przeciętnie na głębokości około 15 m (poniżej średniej wody).

W okolicach Magnuszewa kulminacje podłoża holocenijskich aluwioów stwierdzono na N i S od ujścia Bączychy – przepływu wezbraniowego Wisły (ryc. 1). Podłoże holocenijskiej doliny w południowej części omawianej kulminacji budują silnie zagęszczone, gruboziarniste osady rzeczne plejstocenijskie i preglacjalne. Utwory preglacjalne należą do tak zwanej serii Magnuszewa (Sarnacka, Krysowska-Iwaszkiewicz, 1974). W części stropowej tych utworów stwierdzono koncentrację dużych ziaren tworzących warstwę bruku.

Badania echosondażowe przeprowadzone 10.06.2006 r. pozwoliły na zarejestrowanie morfologii dna koryta w warunkach przepływu wielkich wód. Skomplikowany układ rynien, wybojów i wypłyceń wskazuje na istnienie w korycie kilku stref koncentracji strumienia (ryc. 2). Układ nurtu zależny jest od ukształtowania powierzchni podłoża holocenijskich aluwioów, a także od geometrii skrępowanego budowlami koryta wielkich wód. Odtworzone na podstawie obrazu batymetrycznego strefy koncentracji strumienia, w których obrębie głębokość koryta wielkich wód dochodziła do 10 m, korespondują z układem form depozycyjnych i erozyj-



Ryc. 1. Ukształtowanie powierzchni stwierdzonej w rejonie Magnuszewa kulminacji podłoża holocenijskich aluwii na tle litologii utworów powierzchniowych; wydzielenia litologiczne wg Falkowskiego i in. (1978) z uzupełnieniami autora; fragment bazy danych GIS M – Magnuszew, K – rejon EC Kozienice, A – Annapol, W – Warszawa, a – wiercenia archiwalne (PIG), b – wiercenia autora, c – kilometr biegu rzeki (RZGW), d – izohipsy powierzchni podłoża aluwii, e – kierunek głównego nurtu w korycie, f – kierunki przepływu wód wezbraniowych po powierzchni tarasu zalewowego; 1 – mady pylasto-piaszczyste współczesnej rzeki (dzikiej), 2 – mady pylasto-piaszczyste (współczesne) na madach gliniastych rzeki meandrującej (holocen), 3 – mady gliniaste rzeki meandrującej (holocen), 4 – piaski z ziarnami żwiru facji korytovej (współczesne odsypy), 5 – piaski i piaski ze żwirem – współczesne odsypy rzeki roztokowej (dzikiej) na powierzchni tarasu zalewowego Wisły, 6 – piaski z substancją organiczną, pyły piaszczyste, pyły, namuły i torfy starorzeczy, 7 – mady brunatne (pylasto-piaszczyste osady wezbraniowe rzeki roztokowej, plejstocenijskiej), 8.1 – piaski zwydmionych odsypów na powierzchni tarasu plejstocenijskiego, 8.2 – piaski wydym na powierzchni tarasu plejstocenijskiego i powierzchniach starszych, 9.1 – grunty próchnicze, namuły (holocen), 9.2 – torfy (holocen)

nych na powierzchni tarasu zalewowego (ryc. 1). Formy te powstawały zarówno przed wybudowaniem wałów przeciwpowodziowych (wznoszonych przez okres od powodzi w 1813 r. do lat 70. XX w.), a także po przerwaniach wałów.

Wody wezbrań przepływały po powierzchni tarasu zalewowego strefami wydłużonych starorzeczy lub nowo erodowanymi rynnami. U wylotu śladów przepływów wód wezbraniowych znajdują się często rozległe strefy depozycyjne w postaci stożków napływowych powstających głównie w wyniku dekantacji niesionego materiału. Genetycznie są one zbliżone do form depozycji pozakorytowej, opisywanych przez Zielińskiego (2000) w dolinie Nysy Kłodzkiej (SW Polska) oraz przez Gębicę i Sokołowskiego (2001) w dolinie górnej Wisły.

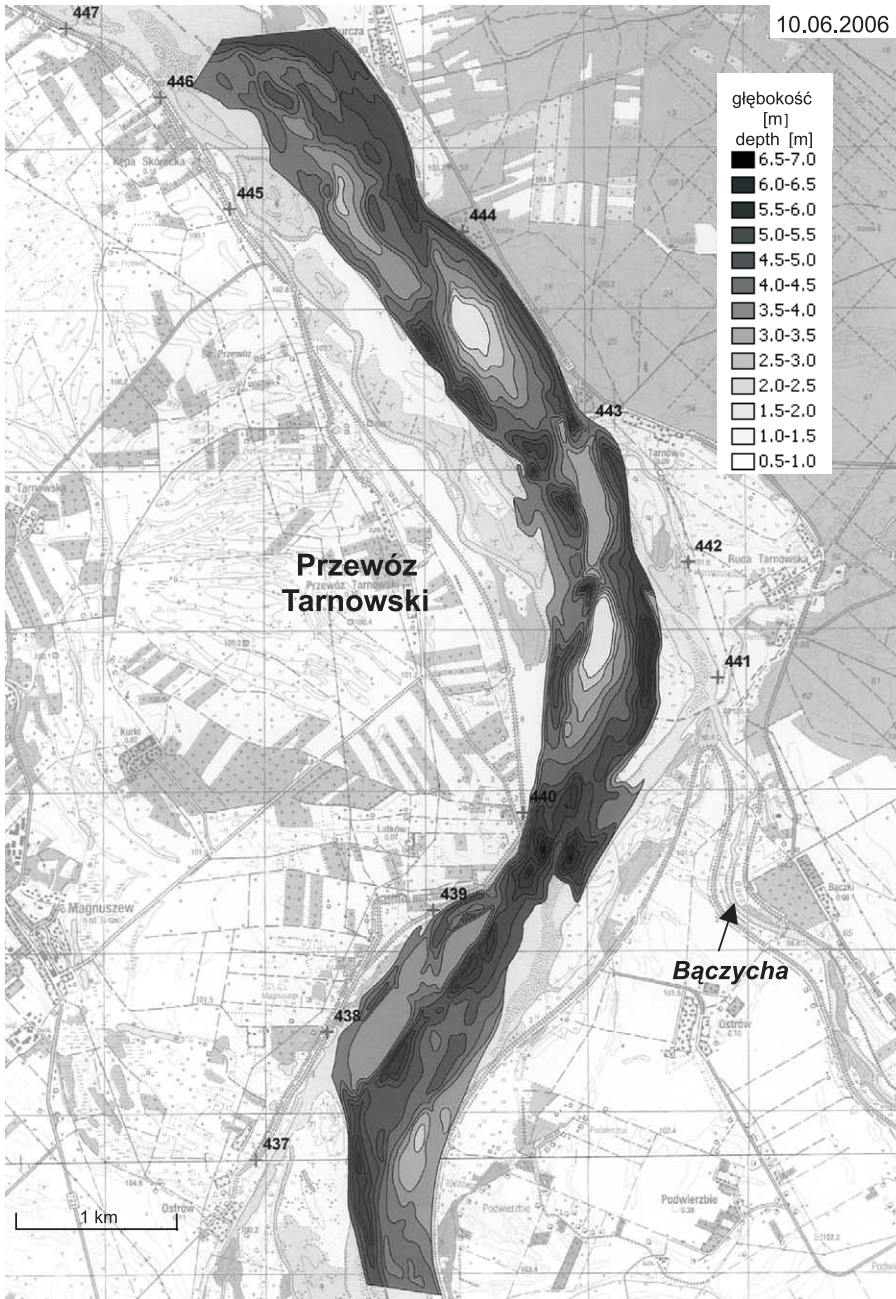
Taka rozległa forma znajduje się w rejonie miejscowości Przewóz Tarnowski (ryc. 1). Ma ona postać schodzących się promieniście piaszczystych i piaszczysto-pylastych wałów, pomiędzy którymi, w obniżeniach, zdeponowane zostały namuły organiczne. W części SE stożek ten nosi ślady przemodelowania przez wody, które przerywały lewobrzeżny wał na odcinku 439–440 kilometra biegu rzeki, zanim został on wzmocniony dodatkową budowlą (ryc. 1).

Drugi stożek napływowy, znajdujący się na omawianym obszarze w rejonie 445–447 kilometra biegu rzeki, charakteryzuje się mniej wyraźną morfologią. Jego powstanie można wiązać z przepływem wód na SW, po przerwaniu wału przeciwpowodziowego w rejonie kilometra 446. Awarie takie były rejestrowane wielokrotnie w historii omawianego odcinka.

Badania wpływu podłoża aluwii na zmiany morfologii koryta w warunkach stanów średnich i niskich przeprowadzono również w rejonie ujścia Radomki do Wisły. Stwierdzono tu występowanie kulminacji podłoża holocenów aluwii w postaci progu zbudowanego z gruboziarnistych, zagęszczonych osadów rzecznych plejstocenu, przykrytych także warstwą rezydualną. Jej powierzchnia osiąga rzędne 94–95 m n.p.m. (ryc. 3).

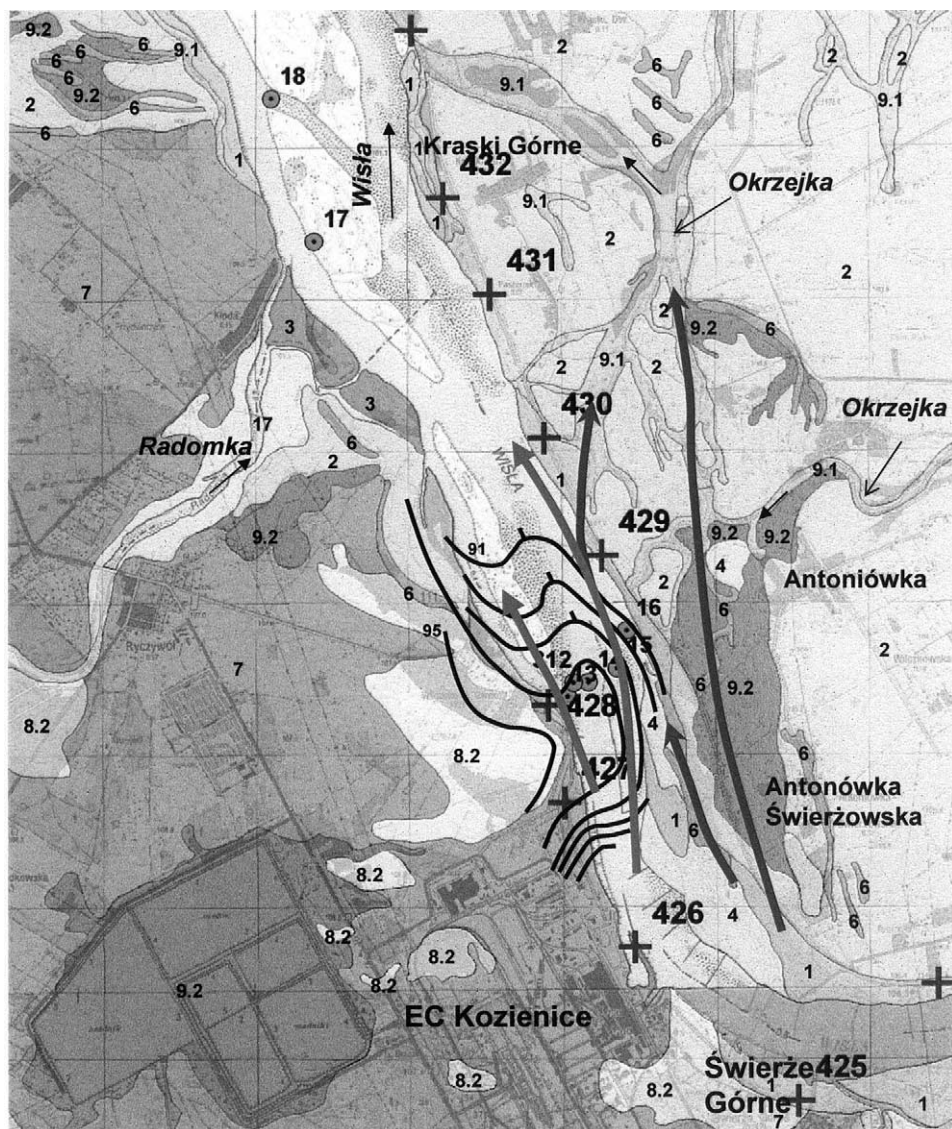
Badania echosondażowe w dniu 23.07.2004 r. prowadzono w warunkach stanów średnich. Poniżej kilometra 426, w centralnej części koryta, stwierdzono wydłużoną rynnę o rzędnej dna około 97,5 m n.p.m. (ryc. 4). Rynna ta nawiązuje przebiegiem do śladu erozji wezbraniowej znajdującego się na tarasie zalewowym

Fig. 1. Morphology of the surface of culminations of the Holocene alluvial basement detected near Magnuszew in relation to the lithology of the surface deposits; geological setting after Falkowski 1978, supplemented by author; fragment of GIS database
M – Magnuszew, K – Koziencice Power Station (EC) area, A – Annopol, W – Warsaw; a – archival boreholes (Geological Institute), b – authors boreholes, c – kilometre of river course, e – isohypse of alluvial basement surface, f – channel main stream direction, g – direction of flood streams flows on the floodplain; 1 – silty-sandy muds of the flood facies of present-day Vistula River (braided river), 2 – silty-sandy muds (contemporary braided river) over clayey muds of the meandering river (Holocene), 3 – clayey mud of the meandering river (Holocene), 4 – sands with grains of gravel of the channel facies – contemporary outwash, 5 – sands with grains of gravel of the channel facies - contemporary outwash on the floodplain surface, 6 – sands with organic matter, sandy silts, silts, loams and peats of ox-bow lakes (contemporary and Holocene), 7 – brown muds (silty-sandy flood deposits of the Pleistocene braided river), 8.1 – sandy bars (outwash) on the surface of the Pleistocene terrace (7), 8.2 – aeolian sands on the surface of Pleistocene terrace (7), 9.1 – humus soils, loams (Holocene), 9.2 – peats (Holocene)



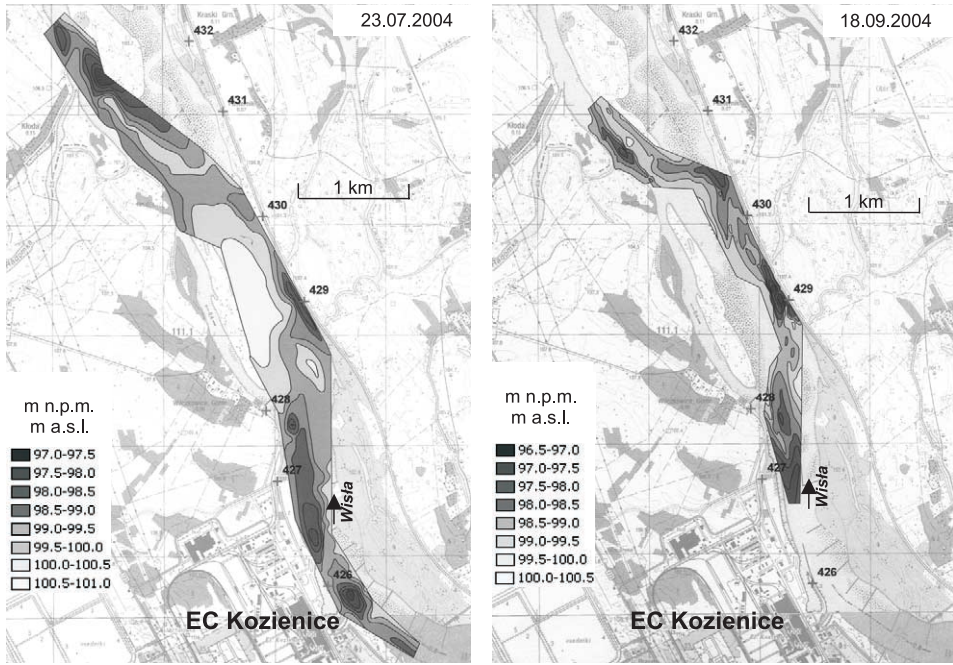
Ryc. 2. Batymetria koryta Wisły w rejonie Magnuszewa w dniu 10.06.2006 r. (w czasie przepływu wielkich wód)

Fig. 2. Bathymetry of the Vistula River channel in the vicinity of Magnuszew on 10.06.2006 (during high-water stage – overbank discharge)



Ryc. 3. Morfologia podłoża aluwium w rejonie EC Kozenice, na tle litologii utworów powierzchniowych; wydzielienia litologiczne wg Falkowskiego i in. (1978) z uzupełnieniami autora; fragment bazy danych GIS (objaśnienia ryc. 1)

Fig. 3. Morphology of the alluvial basement in the vicinity of the Kozenice Power Station (EC) in relation to the lithology of the surface deposits; geological setting after Falkowski 1978, supplemented by author; fragment of GIS database (for location see Fig. 2); explanations Fig. 1



Ryc. 4. Zmiany morfologii koryta Wisły w rejonie EC Kozenice

Fig. 4. Changes in the morphology of the Vistula River channel in the vicinity of the Kozenice Power Station (EC)

poza wałem przeciwpowodziowym (na N od koryta) (ryc. 3). Obniżenie powierzchni dna koryta będzie także pod lewym brzegiem, przy ujściu rzeki Radomki.

Wykonane w warunkach stanów niskich w dniu 18.09.2004 r. pomiary, mające ze względu na małą dostępność koryta mniejszy zasięg (liczne mielizny, głębokości koryta około 0,5 m i niższe), wykazały podobną tendencję do koncentrowania się głównego nurtu jak w czasie pomiaru lipcowego (ryc. 4).

Porównanie wyników obu echosondaży z morfologią kulminacji podłoża aluwiumów i układem form w strefie korytowej dowodzi, że obecność trudno rozmywalnego progu powodowała przed wybudowaniem wałów przeciwpowodziowych spychanie głównego nurtu wielkich wód na wschód, w rejon wsi Antoniówka Świerżowska, Antoniówka i dalej w kierunku miejscowości Kraski Górne (ryc. 3). Rynnę erozyjną tego przepływu wykorzystuje w odcinku ujściowym rzeka Okrzejka. Tendencja do formowania przepływu w tym kierunku jest czytelna współcześnie w morfologii dna koryta. Taki sam kierunek posiadają inne rynny przepływów wezbraniowych na tarasie zalewowym.

Wnioski

1. Wywołana oddziaływaniem podłoża koncentracja strumienia wód wezbraniowych jest przyczyną przestrzennego zróżnicowania intensywności erozji oraz charakteru środowisk sedimentacji wielkich wód (także wezbrań zatorowych). Zjawisko to bywa przyczyną powtarzających się awarii budowli regulacyjnych.
2. Cechy geomorfologiczne powierzchni tarasowej traktować można jako wskaźnikowe przy poszukiwaniu stref kulminacji trudno rozmywalnego podłoża aluwiiów w dolinach rzecznych na obszarach niżowych o rzeźbie poglacialnej. Mogą być one także stosowane w ocenie prawidłowości lokalizacji budowli regulacyjnych i ich bezpieczeństwa jako element prognozy geologiczno-inżynierskiej.
3. Warunkujące zachowanie się rzeki i wpływające na trwałość budowli hydrotechnicznych kulminacje trudno rozmywalnego podłoża współczesnych aluwiiów powinny być włączane w strukturę systemu regulacji rzeki. Postulat ten jest zgodny z praktykowaną obecnie w inżynierii rzecznej zasadą naturalnej regulacji (np. Kern, 1992; Larsen, 1994; Żelazo, Popek, 2002).

Literatura

- Falkowski E., 1971. Historia i prognoza rozwoju układu koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski. *Biuletyn Geologiczny* 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. *Geographia Polonica* 58: 55–67.
- Falkowski T., 2006. Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytowej Wisły środkowej. Wydawnictwa SGGW, Warszawa.
- Gębica P., 2004. Przebieg akumulacji rzecznej w górnym vistulianie w Kotlinie Sandomierskiej. *Prace Geograficzne* 193, PAN, IGiPZ.
- Gębica P., Sokołowski T., 2001. Sedimentological interpretation of crevasse splays formed during the extreme 1997 flood in the upper Vistula River Valley (south Poland). *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 71: 53–62.
- Gradziński R., 1973. Wyróżnianie i klasyfikacja kopalnych osadów rzecznych. *Postępy Nauk Geologicznych, Wydawnictwa Geologiczne* 5: 57–112.
- Kern K., 1992. Restoration of lowland rivers: the German Experiences. W: Carlow P.A., Petts G.E. (red.), *Lowland Floodplain Rivers. Geomorphological perspectives*. J. Wiley, Chichester.
- Krauzlis K., Laskowski K., Wójcik E., 2003. Variability of Engineering geological parameters in flood facies sediments. *Geological Quarterly* 47: 63–68.
- Kozarski S., 1983. River channel adjustment to climatic change in west central Poland. W: Gregory K. (red.), *Background to Paleohydrology*, J. Wiley, Chichester, s. 355–374.
- Mycielska-Dowgiałło E., 1978. Rozwój rzeźby fluwialnej północno-zachodniej części Kotliny Sandomierskiej w świetle badań sedimentologicznych. *Rozprawy Uniwersytetu Warszawskiego*.
- Larsen P., 1994. Restoration of River Corridors: German Experiences. W: Carlow P., Petts G.E. (red.), *The River Handbook*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Myślińska E., 1984. Kryteria oceny inżyniersko-geologicznych właściwości mad. *Kwartalnik Geologiczny* 28: 143–162.

- Ozga-Zielińska M., 1997. O konieczności określania dla rzek polskich maksymalnych wiarygodnych wezbrań wywołanych maksymalnymi wiarygodnymi opadami. Forum naukowo-techniczne – POWÓDŹ 1997. IMGW, Warszawa, 2, s. 1–10.
- Ralska-Jasiewiczowa M., Starkel L., 1988. Record of hydrological changes during the Holocene in the lake, mire and fluvial deposits of Poland. *Folia Quaternaria* 57: 91–127.
- Rotnicka J., Rotnicki K., 1988. The problem of hydrological interpretation of paleochannel patterns. W: Schluchter Ch. (red.), *River, Lake and Mire Environments. Proceedings of the INQA/IGCP 158 Meeting in Bern, Switzerland, June 1985.* Balkema, Rotterdam, s. 205–224.
- Sarnacka Z., Kryszowska-Iwaszkiewicz M., 1974. Osady eoplejstocenijskie okolic Magnuszowa na południowym Mazowszu. Z badań czwartorzędowych w Polsce. T. 14. Biuletyn Instytutu Geologicznego 268.
- Spitz W.J., Schumm S.A., 1997. Tectonic geomorphology of the Mississippi Valley between Osceola, Arkansas and Friars Point, Mississippi. *Engineering Geology* 46: 259–280.
- 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, s. 213–234.
- Szumański A., 1986. Postglacialna ewolucja i mechanizm transformacji dna doliny Dolnego Sanu. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia* 12, 1: 5–92.
- Twindale C.R., 2004. River pattern and their meaning. *Earth-Science Reviews* 67: 159–218.
- Wierzbicki J., 1963. Elementy układu poziomego rzeki w świetle analizy hydrologiczno-morfologicznej doliny i dorzecza dla potrzeb projektowania tras regulacyjnych. Materiały Sympozjum w Kazimierzu Dolnym.
- Zieliński T., 1998. Litofacyjna identyfikacja osadów rzecznych. W: Mycielska-Dowgiałło E. (red.), *Struktury sedymentacyjne i postsedymentacyjne w osadach czwartorzędowych ich wartość interpretacyjna.* Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, s. 193–260.
- Zieliński T., 2000. Sedymentologiczne skutki powodzi 1997 i 1998 roku w dorzeczu Górnej Nysy Kłodzkiej. W: Ostaficzuk S. (red.), *Dynamiczna ocena i prognoza geologicznych zagrożeń wywołanych powodzią, na przykładzie Nysy Kłodzkiej, Górnej Soły i Górnego Sanu-Solinki.* Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, s. 105–136.
- Żbikowski A., Smoluchowska A., Żelazo J., 1992. Naturalna regulacja rzek nizinnych. Materiały pomocnicze do projektowania. IMUZ, Falenty.
- Żelazo J., Popek Z., 2002. *Podstawy renaturyzacji rzek.* Wydawnictwo SGGW, Warszawa.