

# 3

## HYDRAULICZNE UWARUNKOWANIA DEPOZYCJI OSADÓW ZANIECZYSZCZONYCH METALAMI CIĘŻKIMI W OBSZARZE ZALEWOWYM GÓRNEJ WISŁY O RÓŻNEJ SZEROKOŚCI

**Bartłomiej Wyźga, Dariusz Ciszewski**

**Abstrakt:** Dla trzech przekrojów wodowskazowych o różnej szerokości, zlokalizowanych w przedgórskim odcinku Wisły, określono zróżnicowanie osadów pozakorytowych i związanych z nimi metali ciężkich zdeponowanych przez duże wezbranie w lipcu 2001 roku i porównano je z teoretycznie odtworzonym rozkładem średniej prędkości przepływu w strefie korytowej i pozakorytowej w trakcie tego wezbrania. W szerszych przekrojach w Smolicach i Sierosławicach średnia prędkość przepływu w strefie pozakorytowej była mała i kontrastowała z dużą prędkością w strefie korytowej. Szybkiemu zmniejszaniu się miąższości i wielkości ziarna osadów lipcowego wezbrania wraz ze wzrostem odległości od koryta towarzyszył początkowy szybki wzrost koncentracji metali i utrzymywanie się ich wysokich wartości poza strefą wału przykorytowego. W obu przekrojach ładunki metali były natomiast najwyższe w sąsiedztwie brzegu rzeki, malejąc wykładniczo w miarę wzrostu odległości od koryta wraz ze zmniejszaniem się miąższości osadów. W wąskim przekroju w Bielanych średnia prędkość przepływu ponad równią zalewową była duża, zarówno w wartościach bezwzględnych, jak i w odniesieniu do średniej prędkości w strefie korytowej. Zostały tu głównie zdeponowane piaski, których miąższość wolno malała w kierunku dystalnym. Podczas gdy koncentracje metali stopniowo wzrastały wraz z rosnącą odległością od koryta, ładunki zdeponowanych metali podlegały nieregularnym wahaniom w obrębie równi zalewowej. Badania pokazały, że w odcinkach doliny z szeroką równią zalewową największe ilości metali ciężkich są akumulowane przy brzegach rzeki i mogą łatwo zostać uruchomione w wyniku erozji brzegów.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie osadów, metale ciężkie, osady pozakorytowe, równia zalewowa, hydraulika przepływu wezbraniowego

## 1. Wprowadzenie

W kilku ostatnich dziesięcioleciach metale ciężkie rozpoznano jako główne zanieczyszczenia wielu systemów rzecznych. Liczne badania wskazały, że nawet 90% ładunku tych pierwiastków transportowanych przez rzeki może być związane z osadami drobnoziarnistymi, głównie frakcji 0,2-20  $\mu\text{m}$  [Förstner, Wittman, 1984]. Z tego powodu drogi i sposoby transportu metali ciężkich są zbieżne z tymi, którymi transportowane jest rumowisko unoszone. Oprócz koncentracji zanieczyszczeń i wielkości ziarn przenoszonych w zawieszynie, za istotne czynniki kontrolujące depozycję metali ciężkich w czasie wezbrań uważa się hydraulikę przepływów wezbraniowych oraz topografię obszaru zalewowego [Lewin, Macklin, 1987; Walling i in., 2003]. Efektem rozpoznania roli rumowiska unoszonego w przenoszeniu zanieczyszczeń i znaczenia obszarów zalewowych jako miejsc akumulacji osadów jest widoczne w ostatnich latach zainteresowanie przestrzennym zróżnicowaniem występowania zanieczyszczeń w dnach dolin rzecznych [Steward i in., 1998; Walling i in., 2003; Lecce, Pavlovsky, 2001] i zwrócenie uwagi na wcześniejsze prace dotyczące mechanizmu depozycji osadów pozakorytowych [James, 1985; Pizzuto, 1987; Magilligan, 1992a; Marriott, 1992].

Przy przepływach ponadpełnokorytowych przenoszenie rumowiska unoszonego z koryta do obszaru zalewowego zachodzi głównie przez dyfuzję [Pizzuto, 1987]. W strefie kontaktu koryta z równią zalewową rozwijają się wiry turbulencyjne [Knight, Shiono, 1996] odpowiedzialne za przenoszenie zarówno cząstek rumowiska, jak i pędu ze strumienia wód korytowych, o większej głębokości i prędkości, do strumienia wód pozakorytowych cechującego się mniejszą głębokością i prędkością. Wraz ze zmniejszaniem się intensywności turbulencyjnego mieszania się i spadkiem prędkości wody w miarę wzrostu odległości od koryta, zarówno miąższość deponowanych osadów, jak i ich średnica maleje wykładniczo [James, 1985; Pizzuto, 1987], co stwierdzono w wielu badaniach terenowych [Marriott, 1992, 1996; Guccione, 1993; Middelkoop, Asselman, 1998]. W miejscach, gdzie kierunek przebiegu koryta różni się od kierunku przepływu wód pozakorytowych, może także zachodzić konwekcyjny transfer rumowiska [James 1985]. W takiej sytuacji grubsze ziarna, najszybciej ulegające dekantacji, mogą być transportowane trakcyjnie w poprzek równi zalewowej, co zaburza wykładnicze zmniejszanie się miąższości i wielkości ziarna zdeponowanych osadów w kierunku dystalnym [Marriott, 1996].

W szeregu badań stwierdzono, że koncentracje metali są najwyższe przy brzegach koryta i zmniejszają się wraz ze wzrostem odległości od niego [Macklin, 1996; Ciszewski, 2003]. Szczególnie duże różnice koncentracji metali między strefą przykorytową i dystalnymi częściami równi zalewowej, wynoszące nawet 2-3 rzędy wielkości, cechują rzeki odwadniające dawne kopalnie rud i są związane z szybką depozycją cząstek rud metali o dużej masie [Marron, 1989, 1992]. Natomiast w osadach pozakorytowych rzeki Derwent spadkowy trend koncentracji metali był niewidoczny wskutek mało zróżnicowanej akumulacji osadów pylasto-ilastych na równi

zalewowej [Bradley, Cox, 1990]. Wyższe koncentracje metali są charakterystyczne dla bezodpływowych zagłębień na równi zalewowej, w których akumulują się osady o znacznym udziale frakcji pylastej i ilastej. Jest to związane z depozycją wszystkich cząstek rumowiska z wód wezbraniowych stagnujących w tych zagłębieniach [Asselman, Middelkoop, 1995].

Ładunek metali ciężkich akumulowanych na równi zalewowej jest związany z miąższością zdeponowanych osadów i jest zazwyczaj najwyższy wzdłuż brzegów koryta [Middelkoop, 2000]. Również zagłębienia w obrębie obszaru zalewowego cechują się podwyższonym tempem przyrostu osadów [Asselman, Middelkoop, 1995; Walling i in., 1996] i ich rola w zatrzymywaniu zanieczyszczeń jest uwzględniana w modelach numerycznych depozycji osadów pozakorytowych [Steward i in., 1998].

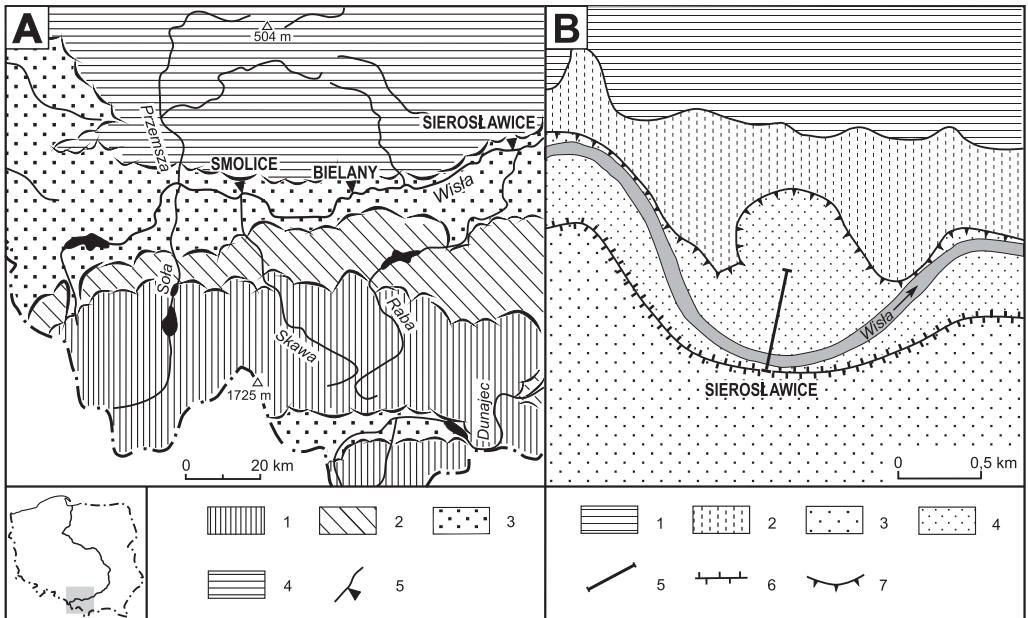
Natomiast wpływ szerokości równi zalewowej na rozprzestrzenienie metali ciężkich w aluwiach nie budził do tej pory większego zainteresowania. Nieliczne badania wykazały wpływ obwałowań oraz naturalnych zwężeń doliny na ograniczenie zasięgu depozycji osadów pozakorytowych [Łajczak, 1995] i zmniejszenie objętości zanieczyszczonych osadów [Miller i in., 1999; Walling i in., 2003].

Celem prezentowanych badań jest przedstawienie zróżnicowania prędkości wód wezbraniowych w przekrojach poprzecznych o różnej szerokości obszaru zalewowego i jego powiązanie z obserwowanym zróżnicowaniem depozycji osadów pozakorytowych i metali ciężkich. Badania przeprowadzono w trzech przekrojach zlokalizowanych w przedgórskim odcinku Wisły.

## **2. Obszar badań i wezbranie z lipca 2001 roku**

Badania przeprowadzono w przekrojach wodowskazowych Smolice, Bielany i Sierosławice na górnej Wiśle (ryc. 3.1A). Wisła w górnym biegu należy do najbardziej zanieczyszczonych metalami ciężkimi rzek w Polsce. Wysokiej zawartości cynku w wodach rzecznych [Buszewski i in., 2005] towarzyszą tu podwyższone koncentracje cynku, kadmu i ołowiu w osadach dennych [Helios-Rybicka, 1986]. Zawartość kadmu w osadach pozakorytowych należy do najwyższych wśród rzek europejskich, natomiast koncentracje ołowiu i cynku są umiarkowane [Macklin, Klimek, 1992]. Znaczne zanieczyszczenie XX-wiecznych osadów korytowych i pozakorytowych było związane z zaistniałym w tym czasie wielokrotnym wzrostem produkcji ołowiu i cynku w zlewni górnej Wisły i zrzutami wód dołowych z kopalń rud tych metali do lewobrzeżnych dopływów rzeki [Macklin, Klimek, 2002; Ciszewski, 1997, 1998]. Zanieczyszczenie rzeki wzrosło znacząco podczas i po drugiej wojnie światowej wraz ze wzrostem uprzemysłowienia i urbanizacji w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym oraz aglomeracji krakowskiej [Helios-Rybicka, 1996].

Trzy badane przekroje wodowskazowe są zlokalizowane w stosunkowo długim, ale hydrologicznie jednorodnym odcinku górnej Wisły pomiędzy jej dwoma karpacikami dopływami Skawą i Rabą (ryc. 3.1A). W tym odcinku Wisła płynie w podłużnym



Ryc. 3.1. (A) Lokalizacja badanych posterunków wodowskazowych na tle jednostek fizycznogeograficznych dorzecza górnej Wisły. 1 – góry średnie i niskie; 2 – pogórza; 3 – kotliny przedgórskie i śródgórskie; 4 – wyżyny; 5 – badane posterunki wodowskazowe. (B) Szczegółowa lokalizacja posterunku Sierosławice. 1 – wyżyna; 2 – terasa plejstocenska; 3 – dno doliny Wisły poza obwałowaniem; 4 – współczesna równia zalewowa; 5 – czynna szerokość przekroju wodowskazowego; 6 – wał przeciwpowodziowy; 7 – skarpa terasy.

Fig. 3.1. (A) Location of the Smolice, Bielany and Sierosławice water-gauge stations in relation to physiogeographic regions of the upper Vistula River drainage basin. 1 – mountains of intermediate and low height; 2 – foothills; 3 – submontane and intramontane depressions; 4 – uplands; 5 – water-gauge stations. (B) Details of the location of the Sierosławice gauging section. 1 – upland; 2 – Pleistocene terrace; 3 – the Vistula valley floor outside the flood embankment; 4 – contemporary floodplain; 5 – active gauge cross-section; 6 – flood embankment; 7 – terrace escarpment.

obniżeniu Kotlin Oświęcimskiej i Sandomierskiej, równoległe do północnej krawędzi Karpat. Dostawa rumowiska unoszonego ma tu miejsce głównie z karpaccich dopływów i znaczna jego część jest w tym odcinku akumulowana [Łajczak, 2003]. Pomimo przyrostu powierzchni zlewni pomiędzy Smolicami i Bielanami o 12%, przepływ średniego rocznego wezbrania w obu posterunkach jest taki sam. pomiędzy Bielanami i Sierosławicami powierzchnia zlewni wzrasta o 18%, a przepływ średniego rocznego wezbrania zwiększa się o 9% (tab. 3.1).

Przy podobnej wielkości przepływów charakterystycznych Wisły, badane przekroje wodowskazowe różnią się znacząco morfologią dna doliny. Wały przeciwpowodziowe zbudowane w początku XX wieku w tym odcinku spowodowały znaczące zwężenie obszaru zalewowego [Łajczak, 1995]. W Smolicach szerokość międzywała była 4,5 razy większa od pełnokorytowej szerokości rzeki. Powtórna regulacja przeprowadzona tam w latach 80. XX wieku spowodowała uformowanie koryta o stosunkowo dużej przepustowości (tab. 3.1) oraz równi zalewowej nachylonej w kierunku koryta i pozbawionej naturalnych wałów przykorytowych (ryc. 3.2A). W sąsiedztwie Smolic Wisła

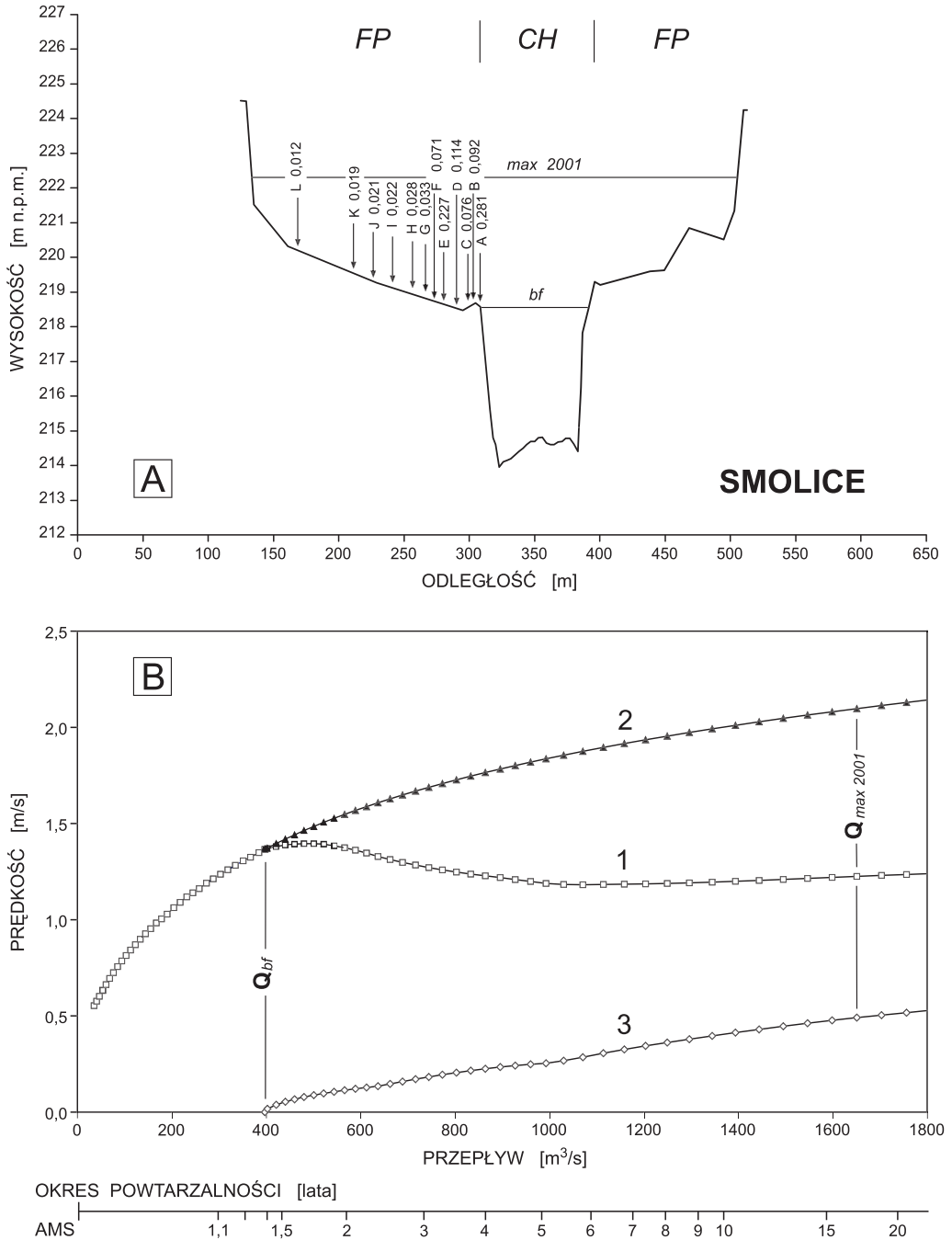
Tabela 3.1. Hydrologiczna i morfologiczna charakterystyka Wisły w przekrojach wodowskazowych Smolice, Bielany i Sierosławice oraz odległość pomiędzy tymi przekrojami

Przekrój wodowskazowy	Smolice	Bielany	Sierosławice
Odległość pomiędzy przekrojami (km)	45,6		61,3
Powierzchnia zlewni (km <sup>2</sup> )	6796	7634	8999
Średni roczny przepływ (1951-2001) (m <sup>3</sup> /s)	80,9	87,5	99,2
Średnie roczne wezbranie (1951-2001) (m <sup>3</sup> /s)	620	620	675
Spadek koryta	0,00016	0,00013	0,00025
Spadek dna doliny	0,00018	0,000135	0,00030
Szerokość pełnokorytowa (m)	82,8	64,2	64,8
Przepływ pełnokorytowy (m <sup>3</sup> /s <sup>1</sup> )	397	196	242

płyńie łagodnymi zakolami (krętość 1,10), których amplituda wynosi 2/3 szerokości strefy międzywala, tworząc tu typowe quasi-naturalne koryto dwudzielne [por. Sellin, Willetts, 1996].

W Bielanych szerokość międzywala jest podobna, jak w Smolicach. Posterunek ten znajduje się tuż powyżej Krakowa, a prace regulacyjne prowadzone w obrębie miasta spowodowały wcięcie się rzeki o około 2,5 m od początku XX wieku [Łajczak, 1995]. W rezultacie, równia zalewowa z okresu przed wcięciem się rzeki jest obecnie zalewana jedynie sporadycznie, natomiast na części obszaru zajmowanego przez dawne koryto uformowała się nowa równia zalewowa. Jej szerokość jest tylko 2,6 razy większa od pełnokorytowej szerokości rzeki (ryc. 3.3A). W pobliżu Bielany Wisła płynie niemal prostym korytem (krętość 1,03), a wały przeciwpowodziowe biegną równoległe do rzeki. W rezultacie, woda na równi zalewowej płynie równoległe do koryta, w sposób typowy dla quasi-prostego koryta dwudzielnego [por. Sellin, Willetts, 1996].

W Sierosławicach równia zalewowa jest ograniczona przez stok terasy plejstoceńskiej po swej lewej stronie i przez wał przeciwpowodziowy po prawej stronie (ryc. 3.1B). Wisła, płynąc w umiarkowanie krętym korycie (krętość 1,19) w poprzek niemal całej sztucznie zawężonej równi zalewowej, tworzy tu typowe quasi-naturalne koryto dwudzielne [por. Sellin, Willetts, 1996]. W sąsiedztwie przekroju wodowskazowego znajduje się „zatoka” dna doliny wycięta w terasie plejstoceńskiej (ryc. 3.1B), w której podczas wezbrań formuje się wielki wir o kierunku ruchu wody przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Ta część obszaru zalewowego stanowi tzw. martwą strefę przepływu, natomiast szerokość aktywnej równi zalewowej jest tu 9 razy większa od pełnokorytowej szerokości rzeki (ryc. 3.4A). Powierzchnia równi zalewowej jest nieregularna, z najniższym poziomem występującym w sąsiedztwie koryta rzeki w miejscu wypełnionego dawnego basenu międzyostrogowego utworzonego w trakcie regulacji koryta w pierwszej połowie XX wieku [Łajczak, 1995].



Ryc. 3.2. (A) Przekrój poprzeczny Wisły w posterunku wodowskazowym Smolice przed wezbraniem z lipca 2001 roku. Strzałki wskazują miejsca poboru próbek osadu. Liczby po symbolach próbek odnoszą się do średniej średnicy ziarna osadów w milimetrach. Morfologiczne strefy przekrojów pokazanych na ryc. 3.2A-3.4A: CH – koryto; FP – równia zalewowa; TR – terasa nadzalewowa. (B) Zależność pomiędzy średnią prędkością w całym przekroju (1) oraz w strefie korytowej (2) i pozakorytowej (3) a natężeniem przepływu w trakcie wezbrania z lipca 2001 roku w posterunku

Wezbrania na górnej Wiśle przeważnie występują w okresie letnim. Pierwsze dwie dekady lipca 2001 roku w południowej Polsce były umiarkowanie deszczowe, co spowodowało wysycenie zdolności retencyjnej gleb. W takiej sytuacji intensywne opady, które miały miejsce w trzeciej dekadzie miesiąca, spowodowały powódź w całej zlewni górnej Wisły. Charakterystyczną cechą tego wezbrania był wysoki odpływ zarówno z prawobrzeżnej, karpackiej części dorzecza, jak i z jego lewobrzeżnej, wyżynnej części, odzwierciedlający podobną wielkość miesięcznych sum opadu (200-300 mm) w obu tych obszarach [Sasim, Mierkiewicz, 2002].

Okres powtarzalności kulminacyjnych przepływów wezbrania z lipca 2001 roku w badanych posterunkach ustalono na podstawie danych z okresu obserwacji 1951-2001. W Smolicach było to wezbranie o 17-letnim okresie powtarzalności i maksymalnym przepływie wynoszącym  $1650 \text{ m}^3/\text{s}$ , a równia zalewowa była zatopiona przez 6,5 doby. W Bielanych zanotowano kulminacyjny przepływ  $1740 \text{ m}^3/\text{s}$  o powtarzalności 15,5 roku, a stan pełnokorytowy był przekroczony przez 14 dni. W Sierosławicach wezbranie osiągnęło kulminację  $1840 \text{ m}^3/\text{s}$  o 18-letnim okresie powtarzalności, a równia zalewowa była zatopiona przez 15,5 doby.

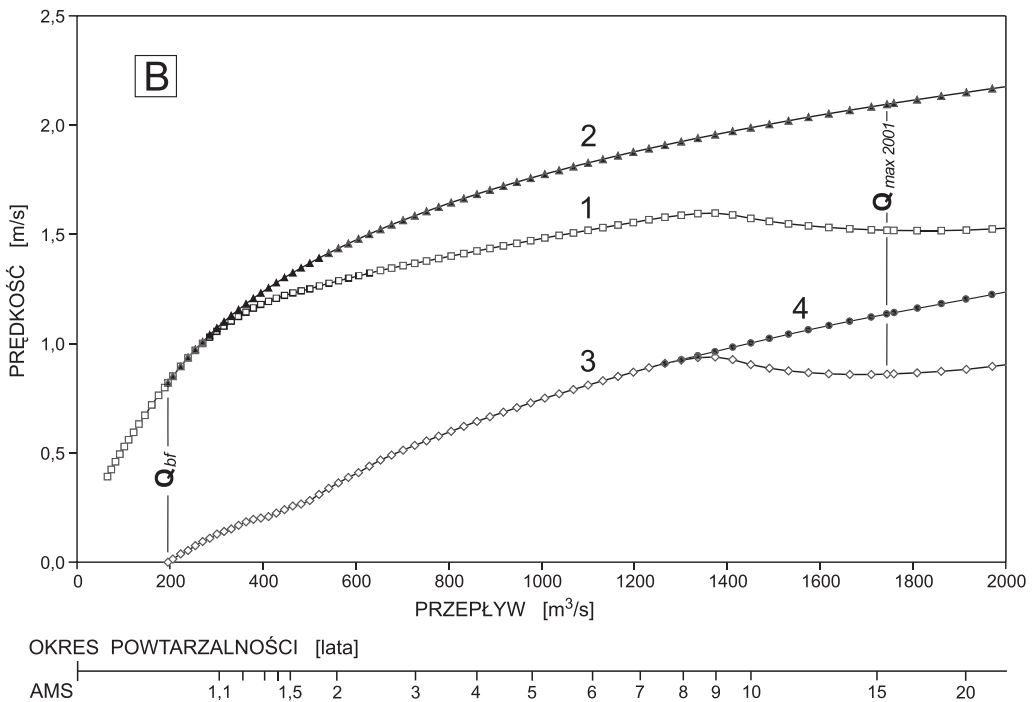
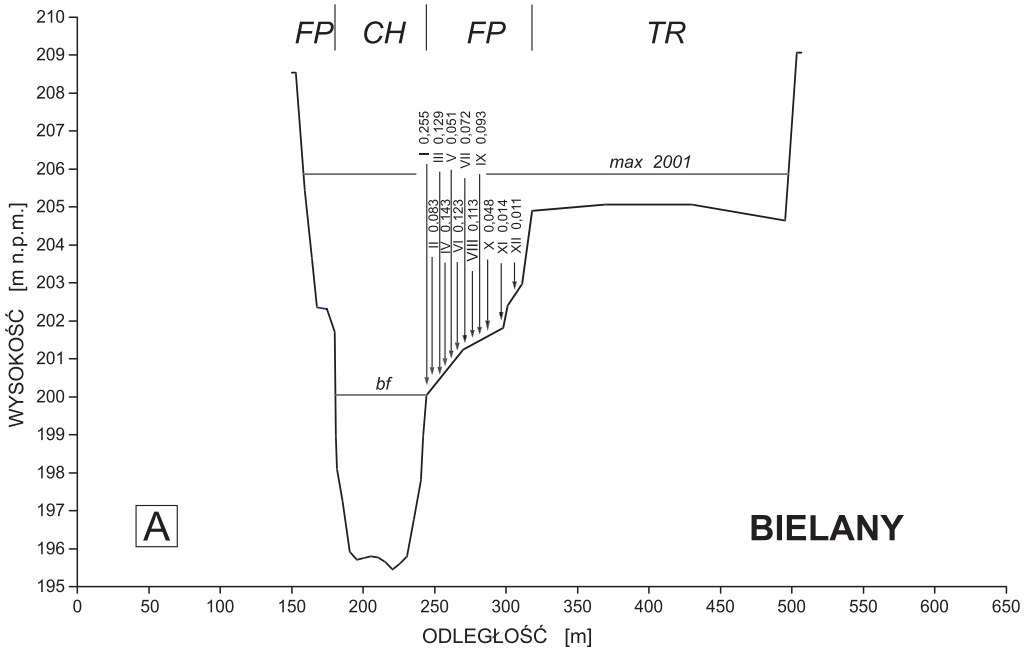
### 3. Metody badań

W przeciwieństwie do pomiarów parametrów hydraulicznych w warunkach laboratoryjnych, określenie hydrauliki przepływów wezbraniowych na rzece i powiązanie jej z sedymentacją osadów pozakorytowych jest bardzo trudne. Pomiarzy prędkości w warunkach przepływów ponadpełnokorytowych są rzadkie i ograniczone głównie do pojedynczych przekrojów mostowych, o geometrii zazwyczaj odbiegającej od geometrii naturalnych przekrojów rzecznych. W ostatnich latach przedstawiono modele numeryczne umożliwiające określanie przestrzennego zróżnicowania przepływów [Bates i in., 1992] oraz depozycji osadów w obszarze pozakorytowym [Nicholas, Walling, 1995]. Wymagają one jednak dokładnej znajomości morfologii powierzchni terenu przed wezbraniem, ich użyteczność jest więc ograniczona do dokładnie opisanych, niewielkich równi

---

wodowskazowym Smolice na Wiśle.  $Q_{bf}$  oznacza przepływ pełnokorytowy. Na ryc. 3.2A-3.4A punktami przedstawiono warunki przy stanach wody zmieniających się co 10 cm. Wartościom przepływu przyporządkowano ich okres powtarzalności, określony metodą ciągu maksymalnych rocznych przepływów (AMS) z lat 1951-2001. Interpretację krzywej konsumpcyjnej kontynuowano poza zasięg kulminacji wezbrania, tak by ukazać rozkład prędkości dla przepływów o co najmniej 20-letniej powtarzalności.

*Fig. 3.2. (A) Pre-flood morphology of the Vistula River cross-section at the Smolice gauging station. Arrows indicate location of sediment samples, and numbers following sample symbols refer to mean grain size of the sediments in millimetres. Morphological zones of the cross-sections shown in Figs. 3.2A, 3.3A and 3.4A: CH – channel; FP – floodplain; TR – terrace. (B) Relationship between the mean flow velocity in total cross-section (1), in channel zone (2) and in floodplain zone (3) of the cross-section, and discharge for the Smolice gauging station during the flood of July 2001.  $Q_{bf}$  denotes bankfull discharge. Points in Figs. 3.2B, 3.3B and 3.4B represent conditions for stage changing at 10 cm intervals, and discharges are referred to their recurrence interval determined by the annual maximum series method from the years 1951-2001. An interpretation of the rating curve was continued beyond the flood peak to recognise the pattern of flow velocities for the flows of at least 20-year recurrence.*



Ryc. 3.3. (A) Przekrój poprzeczny Wisły w posterunku wodowskazowym Bielany przed wezbraniem z lipca 2001 roku. (B) Zależność pomiędzy średnią prędkością w całym przekroju (1) oraz w strefie korytowej (2) i pozakorytowej (3) a natężeniem przepływu w trakcie wezbrania z lipca 2001 roku w posterunku wodowskazowym Bielany na Wiśle. Sygnatura (4)



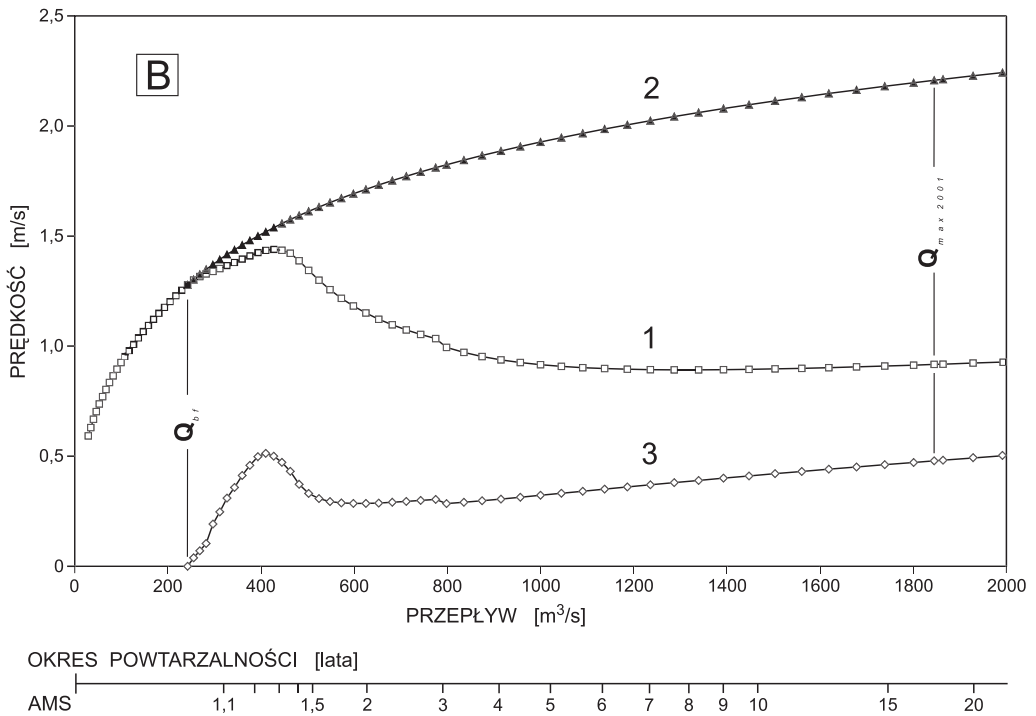
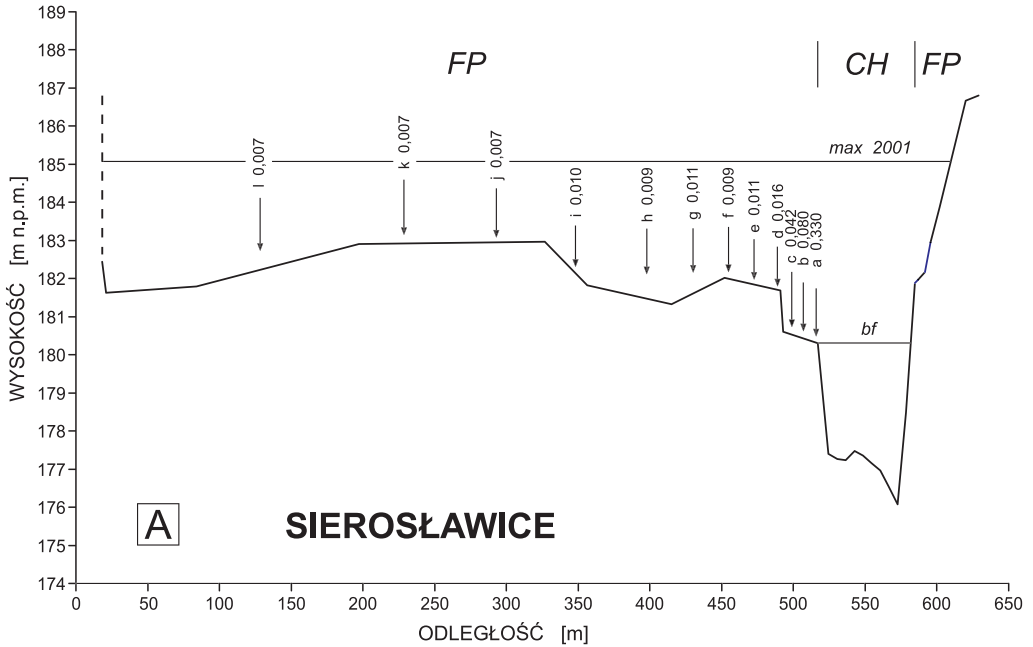
zalewowych. W niniejszych badaniach zastosowano metodę umożliwiającą oszacowanie średniej prędkości przepływu w strefie korytowej i pozakorytowej rzeki przy danym przepływie całkowitym odczytanym z krzywej konsumpcyjnej [Wyźga, 1999]. Metoda ta wykorzystuje informacje o wielkości przepływów przenoszonych w całym przekroju rzeczonym, zapisane w tej krzywej. Uwzględnia ona również oddziaływanie bocznego transferu pędu pomiędzy strumieniem wód korytowych i pozakorytowych, w wyniku którego następuje przyspieszanie przepływu w obszarze pozakorytowym i spowalnianie w strefie korytowej [por. Knight, Shiono, 1996]. Oszacowania wielkości przepływu ponadpełnokorytowego przenoszonego w strefie korytowej dokonuje się przy założeniu, że powierzchnie rozgraniczające strefę korytową od pozakorytowej stanowią część obwodu zwilżonego dla tej części przepływu. Umożliwia to ekstrapolowanie charakterystycznej dla najwyższych przepływów korytowych zależności pomiędzy wielkością przepływu a średnią prędkością na przenoszona w strefie korytowej część przepływów ponadpełnokorytowych. Wielkość przepływu przenoszonego w strefie pozakorytowej oblicza się następnie jako różnicę pomiędzy wielkością całkowitego przepływu i przepływu w strefie korytowej [Wyźga, 1999]. Metoda ta została wcześniej zastosowana do interpretacji przestrzennego [Wyźga, 1999] i czasowego zróżnicowania [Wyźga, 2001, 2008; Lach, Wyźga, 2002] warunków depozycji w dolinach rzek południowej Polski.

Badania terenowe w trzech przekrojach przeprowadzono wkrótce po przejściu fali wezbraniowej. Zazwyczaj do poboru próbek osadów deponowanych w czasie wezbrań używa się zakładane wcześniej maty naśladowujące powierzchnię trawiastą [np. Asselman, Middelkoop, 1995; Walling i in., 2003; Baborowski i in., 2007]. W obecnych badaniach osady pobierano z naturalnej powierzchni trawiastej. Osady zdeponowane przez wezbranie z lipca 2001 r. mogły być łatwo odróżnione od podścielających osadów pozakorytowych dzięki rozdzielającej je powłoce wyłożonych przez wodę traw i roślin zielnych. Umożliwiło to dobór punktów poboru prób uwzględniający obserwowane różnice miąższości i wielkości ziarna osadów zdeponowanych w badanych przekrojach przez lipcowe wezbranie. Ponadto, zastosowana metoda pozwoliła uniknąć zniszczenia mat przez ludzi lub zwierzęta, możliwego w wypadku wcześniejszego ich zamontowania. Wylimitowała także konieczność obserwowania stanu wody i pogody w celu zainstalowania mat tuż przed wezbraniem. W każdym z badanych przekrojów w 12 stanowiskach na równi zalewowej po jednej stronie rzeki pobrano próbki osadów tego wezbrania oraz określono ich miąższość. Pobrane próbki reprezentowały całą miąższość osadu zdeponowanego przez lipcowe wezbranie. Część każdej próbki użyto do określenia składu granulometrycznego osadu, inną część natomiast do oznaczenia za-

---

przedstawiono średnią prędkość przepływu w obszarze samej równi zalewowej od momentu rozpoczęcia zatapiania terasy nadzalewowej.

*Fig. 3.3. (A) Pre-flood morphology of the Vistula River cross-section at the Bielany gauging station. (B) Relationship between the mean flow velocity in total cross-section (1), in channel zone (2) and in extra-channel zone (3) of the cross-section, and discharge for the Bielany gauging station during the flood of July 2001. Signature (4) depicts velocities over the floodplain itself after the start of inundation of the terrace.*



Ryc. 3.4. (A) Przekrój poprzeczny Wisły w posterunku wodowskazowym Sierosławice przed wezbraniem z lipca 2001 roku. (B) Zależność pomiędzy średnią prędkością w całym przekroju (1) oraz w strefie korytovej (2) i pozakorytovej (3) a natężeniem przepływu w trakcie wezbrania z lipca 2001 roku w posterunku wodowskazowym Sierosławice na Wiśle.

wartości metali ciężkich. Rozkład uziarnienia osadów oznaczano metodą sitową lub areometryczną.

Część próbki po wysuszeniu była przesiewana przez sito 1 mm i 0,5 g przesianego materiału było ekstrahowane w stężonym kwasie azotowym w bombach teflonowych. Koncentracje kadmu, miedzi, ołowiu, manganu i cynku oznaczano przy użyciu absorpcyjnej spektrometrii atomowej. Gęstość objętościową analizowanych osadów określono poprzez ściśnięcie każdej próbki do stałej objętości w polipropylenowych cylindrach. Gęstość ta wahała się od 1,2 g/cm<sup>3</sup> dla osadów pylasto-ilastych do 1,6 g/cm<sup>3</sup> dla piasków i była podobna do wartości uzyskanych w podobnych badaniach przeprowadzonych w dolinie dolnego Renu [por. Middelkoop, 2000]. Ładunki metali, czyli wielkość depozycji poszczególnych pierwiastków na jednostkowej powierzchni równi zalewowej, obliczano na podstawie oznaczonych koncentracji pierwiastków oraz gęstości i miąższości osadu zdeponowanego podczas wezbrania z 2001 roku w poszczególnych stanowiskach.

#### 4. Prędkość przepływu w badanych przekrojach

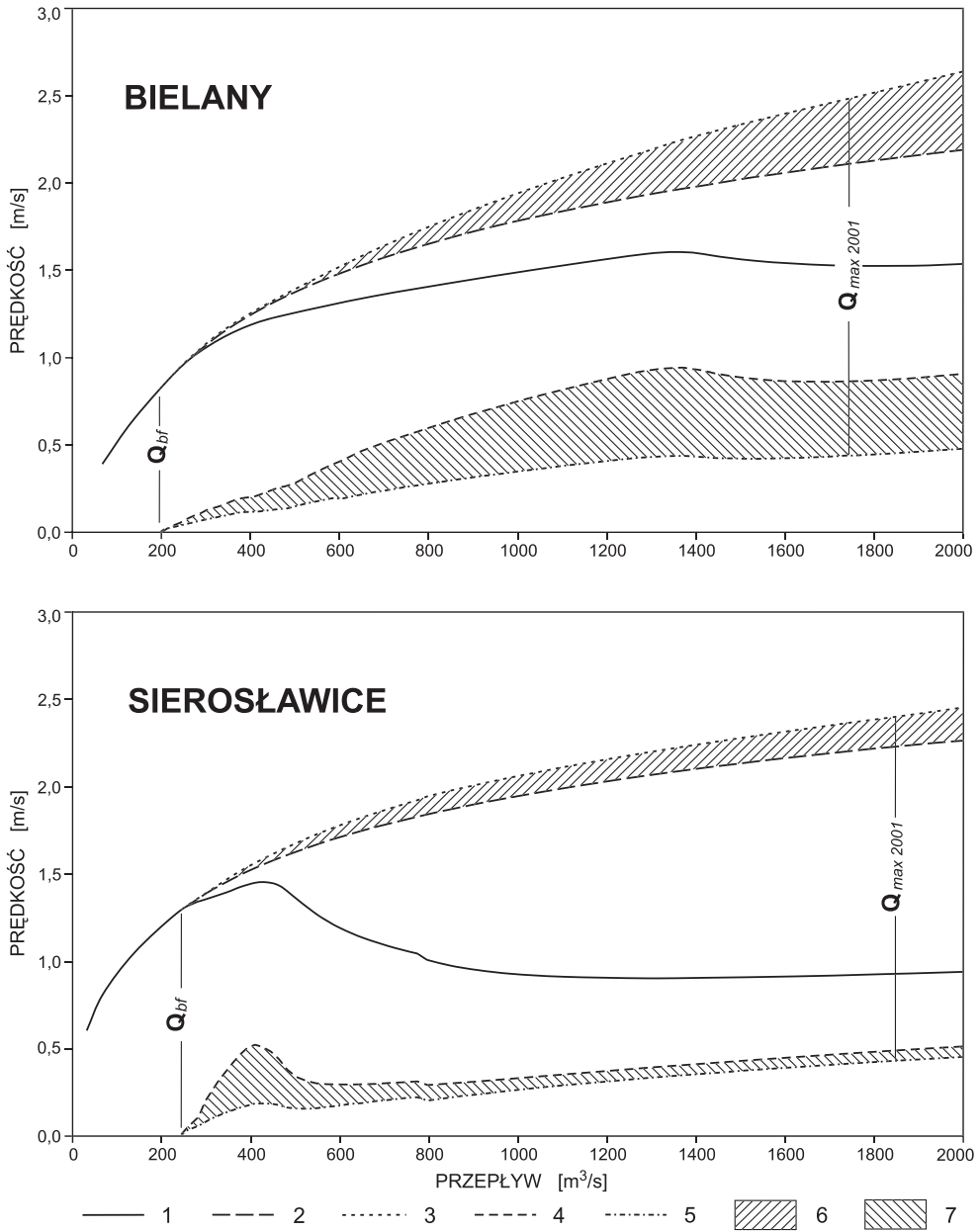
Przedstawione poniżej prędkości przepływu zrekonstruowano w toku analizy krzywych natężenia przepływu obowiązujących w trakcie wznoszącej fazy wezbrania z lipca 2001 roku. W Smolicach prawy brzeg znajduje się około 0,7 m wyżej niż lewy (ryc. 3.2A). Średnia prędkość przepływu w przekroju (ryc. 3.2B) wzrastała od około 0,55 m/s przy niskich przepływach przed wezbraniem do 1,37 m/s przy stanie pełnokorytowym i do 1,40 m/s przy przepływie 480 m<sup>3</sup>/s, gdy rozpoczęło się zatapianie prawobrzeżnej równi zalewowej. Następnie średnia prędkość zmniejszała się stopniowo do wartości 1,18 m/s, osiągniętej przy przepływie 1070 m<sup>3</sup>/s, gdy woda sięgnęła podnóża wałów przeciwpowodziowych, później zaś wolno wzrastała do 1,23 m/s przy kulminacyjnym przepływie lipcowego wezbrania.

Średnia prędkość w strefie korytovej (ryc. 3.2B) wynosiła 1,46 m/s, gdy woda osiągnęła poziom prawego brzegu, 1,88 m/s przy przepływie zatapiającym całe międzywałe i 2,10 m/s w czasie kulminacji wezbrania. Z kolei, średnia prędkość w strefie pozakorytovej (ryc. 3.2B) wolno wzrastała w miarę zwiększania się przepływu, osiągając 0,49 m/s w momencie kulminacji wezbrania. Interwały przyrostu przepływu, w których wzrost prędkości strumienia pozakorytovej był wolniejszy, odpowiadały wkręcaniu wody na oba poziomy w prawobrzeżnej części międzywała, natomiast względne przyspieszenie wzrostu prędkości następowało w okresach zwiększania się głębokości wody w międzywału przy ograniczeniu szerokości zatopionego obszaru.

W Bielanych strefa pozakorytovej składa się z wąskiej równi zalewowej i szerokiej terasy nadzalewowej (ryc. 3.3A). Średnia prędkość przepływu w tym przekroju

---

*Fig. 3.4. (A) Pre-flood morphology of the Vistula River cross-section at the Sierosławice gauging station. (B) Relationship between the mean flow velocity in total cross-section (1), in channel zone (2) and in floodplain zone (3) of the cross-section, and discharge for the Sierosławice gauging station during the flood of July 2001.*



Ryc. 3.5. Oszacowane zmiany prędkości strumienia korytowego i pozakorytowego spowodowane bocznym transferem pędu w czasie wezbrania z lipca 2001 roku w przekrojach wodowskazowych Bielany i Sierosławice. 1 – średnia prędkość w całym przekroju; 2 – średnia prędkość w strefie korytowej obliczona z równania Chezy'ego-Manninga; 3 – średnia prędkość w strefie korytowej oszacowana z uwzględnieniem bocznego transferu pędu; 4 – średnia prędkość w strefie pozakorytowej obliczona z równania Chezy'ego-Manninga; 5 – średnia prędkość w strefie pozakorytowej oszacowana z uwzględnieniem bocznego transferu pędu; 6 – zmniejszenie prędkości strumienia korytowego spowodowane interakcją ze strumieniem pozakorytowym; 7 – zwiększenie prędkości strumienia pozakorytowego spowodowane interakcją ze strumieniem korytowym.  $Q_{bf}$  oznacza przepływ pełnokorytowy.

(ryc. 3.3B) wzrastała od około 0,4 m/s przy najniższych przepływach przed wezbraniem do 0,82 m/s przy przepływie pełnokorytowym. Następnie średnia prędkość wzrastała dalej do 1,24 m/s przy przepływie 482 m<sup>3</sup>/s, gdy woda sięgnęła podnóża terasy, i do maksymalnej wartości 1,60 m/s osiągniętej wkrótce po rozpoczęciu zatapiania powierzchni terasy. Wraz z postępującym zatapianiem terasy średnia prędkość przepływu wolno malała do wartości 1,52 m/s przy kulminacyjnym przepływie wezbrania.

Średnia prędkość w strefie korytowej (ryc. 3.3B) osiągnęła tu 1,35 m<sup>3</sup>/s, gdy woda sięgnęła podnóża terasy, 1,89 m/s przy rozpoczęciu zatapiania terasy i 2,10 m/s w czasie kulminacji wezbrania. Natomiast średnia prędkość przepływu ponad równią zalewową (ryc. 3.3B) szybko wzrastała, osiągając 0,89 m/s przy rozpoczęciu zatapiania terasy i 1,14 m/s w czasie kulminacji wezbrania. Najszybszy wzrost prędkości miał tu miejsce po zatopieniu całej równi zalewowej. Średnia prędkość w całej strefie pozakorytowej osiągnęła maksymalną wartość 0,94 m/s wkrótce po rozpoczęciu zatapiania terasy, a następnie, wraz ze zwiększaniem się ilości wody płynącej po powierzchni terasy, wolno zmalała do 0,86 m/s przy kulminacyjnym przepływie lipcowego wezbrania.

W Sierosławicach średnia prędkość przepływu (ryc. 3.4B) szybko wzrastała od 0,6 m/s przy najniższych przepływach przed wezbraniem do 1,28 m/s przy przepływie pełnokorytowym, następnie zaś znacznie wolniej, osiągając maksymalną wartość 1,44 m/s wkrótce po tym, jak rozpoczęło się zatapianie wyższego poziomu równi zalewowej. Następnie zmniejszyła się do wartości 0,89 m/s osiągniętej przy przepływie 1340 m<sup>3</sup>/s, gdy najwyższy poziom równi zalewowej był pokryty warstwą wody o głębokości 1,2 m, by później jeszcze nieco wzrosnąć do 0,92 m/s w czasie kulminacji wezbrania.

Średnia prędkość w strefie korytowej (ryc. 3.4B) osiągnęła 1,82 m/s przy przepływie 798 m<sup>3</sup>/s, zatapiającym całą równię zalewową, i 2,21 m/s przy kulminacyjnym przepływie. Początkowo, gdy zatopiony był jedynie najniższy poziom równi zalewowej, średnia prędkość w strefie pozakorytowej (ryc. 3.4B) szybko wzrastała, osiągając maksymalną wartość 0,51 m/s wraz z rozpoczęciem zatapiania wyższego poziomu zalewowego. Wraz z postępującym zatapianiem obszaru zalewowego średnia prędkość strumienia pozakorytowego zmniejszyła się do 0,29 m/s i następnie pozostała na zbliżonym poziomie aż do zatopienia najwyższego poziomu równi zalewowej. Odtąd, wraz z dalszym zwiększaniem się przepływu, wzrastała ona do 0,48 m/s przy kulminacyjnym przepływie wezbrania.

---

*Fig. 3.5.* Estimated changes in flow velocity of the channel and extra-channel flows during the flood of July 2001 in the Bielany and Sierosławice cross-sections resulting from lateral transfer of momentum. 1 – mean flow velocity in total cross-section; 2 – mean flow velocity in channel zone calculated from the Chezy–Manning equation; 3 – mean flow velocity in channel zone estimated with allowance for the lateral transfer of momentum; 4 – mean flow velocity in extra-channel zone calculated from the Chezy–Manning equation; 5 - mean flow velocity in extra-channel zone estimated with allowance for the lateral transfer of momentum; 6 – slowing-down of channel flow resulting from the interaction with extra-channel flow; 7 – acceleration of extra-channel flow resulting from the interaction with channel flow.  $Q_{bf}$  denotes bankfull discharge.

Powyższa analiza wskazuje, że różnice morfologii badanych przekrojów znalazły odzwierciedlenie w odmiennych rozkładach prędkości wód wezbraniowych. W szerszych przekrojach w Smolicach i Sierosławicach (ryc. 3.2A, 3.4A), średnia prędkość strumienia pozakorytowego była stosunkowo mała, zarówno w wartościach bezwzględnych (ryc. 3.2B, 3.4B), jak i w porównaniu z prędkością strumienia korytowego (tab. 3.2). Natomiast w Bielanych, gdzie szerokość równi zalewowej jest niewielka (ryc. 3.3A), średnia prędkość przepływu ponad równią zalewową była stosunkowo duża, zarówno w wartościach bezwzględnych (ryc. 3.3B), jak i w porównaniu do prędkości strumienia korytowego (tab. 3.2).

Przedstawione rozkłady prędkości wód wezbraniowych określono w oparciu o metodę uwzględniającą transfer pędu od szybszego strumienia wód korytowych do wolniejszego strumienia pozakorytowego [Wyźga, 1999]. Za pomocą równań hydraulicznych, takich jak równanie Chezy'ego-Manninga, przepływy (oraz ich prędkości) w strefie korytowej i pozakorytowej można również obliczyć, zakładając brak takiej interakcji. Porównanie wyników uzyskanych obiema metodami ukazuje stopień modyfikacji rozkładu prędkości w strefie korytowej i pozakorytowej, spowodowanej transferem pędu pomiędzy obu strumieniami wód. Takie porównanie przedstawiono dla najwęższego badanego przekroju w Bielanych i najszerszego w Sierosławicach (ryc. 3.5). W przekroju w Bielanych widoczne jest znaczne zmniejszenie prędkości strumienia korytowego i zwiększenie prędkości strumienia pozakorytowego. Najwyraźniej, efektem zwężenia przekroju był znaczny transfer pędu pomiędzy tymi strumieniami wód wezbraniowych. W Sierosławicach, gdzie znaczna część strumienia pozakorytowego była przenoszona z dala od koryta, wpływ bocznego transferu pędu na średnie prędkości przepływu w obu strefach przekroju był wyraźnie mniejszy. Tutaj jedynie część strumienia pozakorytowego przenoszona ponad najniższym poziomem zalewowym była znacznie przyspieszana wskutek bocznego transferu pędu od przyległego strumienia korytowego.

## **5. Zróżnicowanie depozycji osadów pozakorytowych w czasie wezbrania z lipca 2001 roku**

Pomiędzy badanymi przekrojami zaznaczają się znaczące różnice prędkości przepływu w obszarze zalewowym (ryc. 3.2B, 3.3B i 3.4B) oraz wzajemnej relacji prędkości przepływu w strefie korytowej i pozakorytowej (tab. 3.2). W celu odpowiedzi na pytanie, czy różnice te są również odzwierciedlone w odmiennym zróżnicowaniu osadów pozakorytowych zdeponowanych w czasie wezbrania z lipca 2001 roku, kilka dni po przejściu fali wezbrania w badanych przekrojach przeprowadzono obserwacje terenowe.

Dla ułatwienia porównań pomiędzy przekrojami, zróżnicowanie rozkładu uziarnienia oraz miąższości osadów przedstawiono na wykresach, na których szerokość każdej opróbowanej równi zalewowej odpowiada całej szerokości wykresu (ryc. 3.6). W Smolicach wielkość ziarna oraz miąższość osadów lipcowego wezbrania była bar-

Tabela 3.2. Średnia prędkość przepływu na równi zalewowej w przekrojach wodowskazowych Smolice, Bielany i Sierosławice wyrażona w procentach średniej prędkości w strefie korytowej

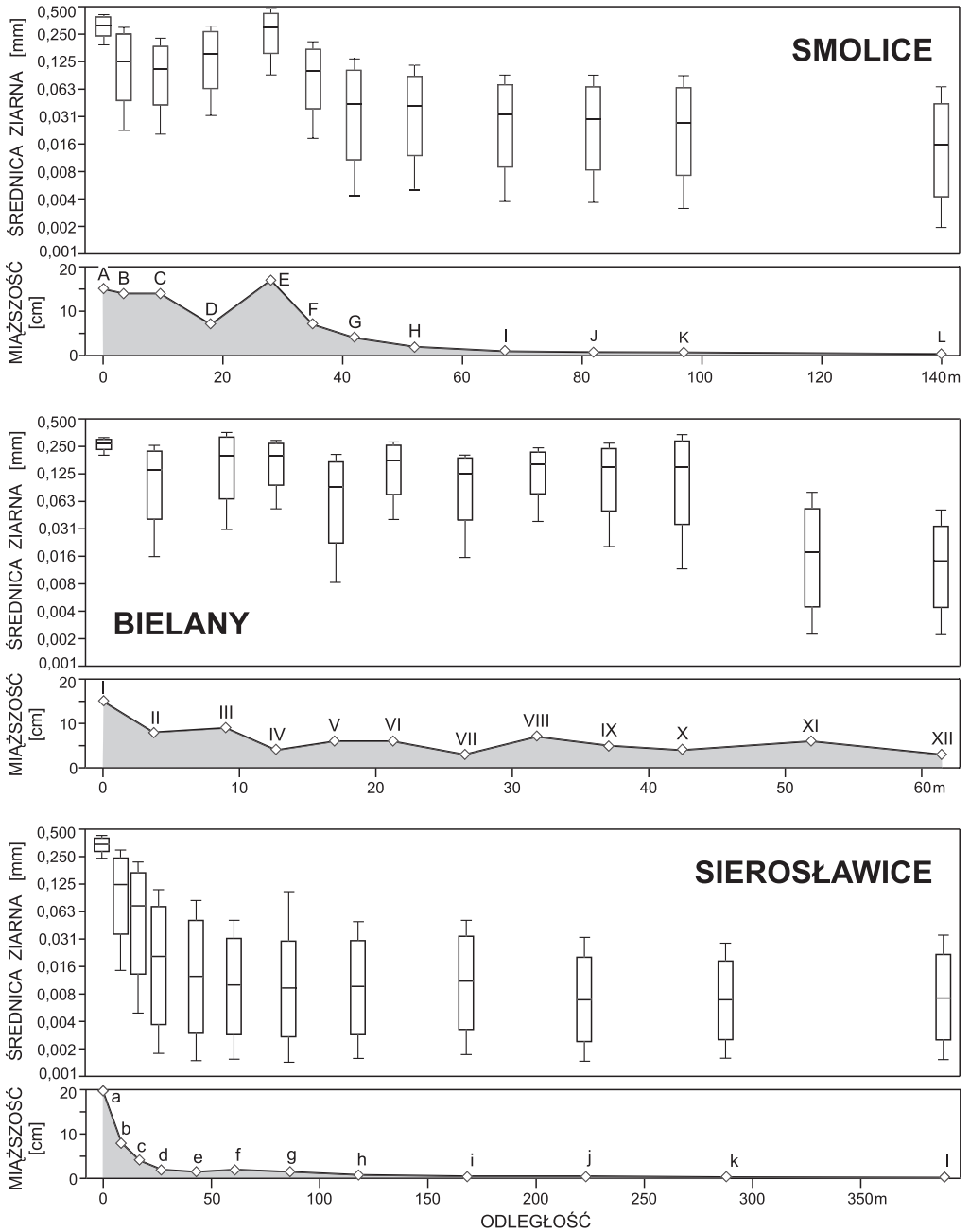
	Smolice	Bielany	Sierosławice
Q <sub>5</sub>	13,8	41,5	16,8
Q <sub>10</sub>	20,1	45,5	19,6
Q <sub>15</sub>	22,7	41,2	21,1
Q <sub>20</sub>	24,1	41,0	22,0

Q<sub>x</sub> oznacza przepływ o danym okresie powtarzalności

dzo zróżnicowana (ryc. 3.2A, 3.6). W pobliżu brzegu koryta widoczna jest tu strefa depozycji osadów naturalnego wału przykorytowego, o szerokości około 35 m. Osady te (stanowiska A-F) miały miąższość 7-17 cm i składały się głównie z piasków drobno- i bardzo drobnoziarnistych. Piaski średnioziarniste występowały jedynie przy samym brzegu koryta. Osady wału przykorytowego wykazują laminację wskazującą na trakcyjny transport ziarn przed ich depozycją. Od strony dystalnej osady wału były ograniczone niskim stokiem osypiskowym. Poza wałem przykorytowym miąższość osadów malała od około 4 cm w miejscu poboru próbki G do mniej niż 0,5 cm w sąsiedztwie stanowiska L. W środkowej części równi występowały muły (stanowiska G-K), a w odległości około 140 m od koryta muły ilaste (stanowisko L).

W Bielanych zarówno miąższość osadów lipcowego wezbrania, jak i ich uziarnienie były znacznie mniej zróżnicowane (ryc. 3.3A, 3.6). Zasadniczo, miąższość osadów wolno malała od 15 cm przy brzegu koryta do 3 cm w pozycji dystalnej, chociaż widoczne były także drobne wahania miąższości wśród kolejnych stanowisk. Na znacznej części szerokości równi zalewowej zostały zdeponowane piaski, średnioziarniste przy brzegu rzeki (stanowisko I), a drobno- i bardzo drobnoziarniste dalej od koryta (stanowiska II-IV oraz VI-IX). W odległości 17 oraz 42 m od koryta występowały muły (stanowiska V i X), natomiast w pobliżu skłonu terasy muły ilaste (stanowiska XI-XII). Na powierzchni terasy zatopionej tylko w czasie przejścia grzbietu fali wezbraniowej (ryc. 3.3A) można było obserwować jedynie cienką powłokę osadu na źdźbłach traw.

W Sierosławicach wraz ze wzrostem odległości od koryta bardzo wyraźnie zaznaczał się wykładniczy spadek miąższości i wielkości ziarna osadów lipcowego wezbrania (ryc. 3.4A, 3.6). Początkowo miąższość osadów zmniejszała się szybko od 20 cm w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu koryta (stanowisko a) do 4 cm w stanowisku c, następnie zaś wolniej do zaledwie 2 mm w miejscu poboru próbki l. W pobliżu koryta frakcja osadów szybko malała od piasków drobnoziarnistych w sąsiedztwie brzegu do pyłów w dystalnej części najniższego poziomu zalewowego (stanowisko c). Dalej od koryta stwierdzono muły i muły ilaste (stanowiska d-i) przechodzące w ropy pylaste zdeponowane na dystalnej połowie szerokości równi zalewowej (stanowiska j-l).



Ryc. 3.6. Rozkład uziarnienia i miąższość osadów pozakorytowych zdeponowanych w czasie wezbrania z lipca 2001 roku na jednostronnej równi zalewowej w przekrojach Smolice, Bielany i Sierosławice. Wykresy pudełkowe pokazują medianę (pozioma środkowa linia), kwartyle (końce pudełek) oraz 16 i 84百分yl rozkładu uziarnienia poszczególnych próbek osadu.

Fig. 3.6. Grain-size distribution and thickness of overbank sediments deposited by the July 2001 flood on one-side floodplain of the Smolice, Bielany and Sierosławice cross-sections. Box and whisker plots show median (internal horizontal line), quartiles (ends of box) and 16th and 84th percentiles (whiskers) of the grain-size distribution of each sample.

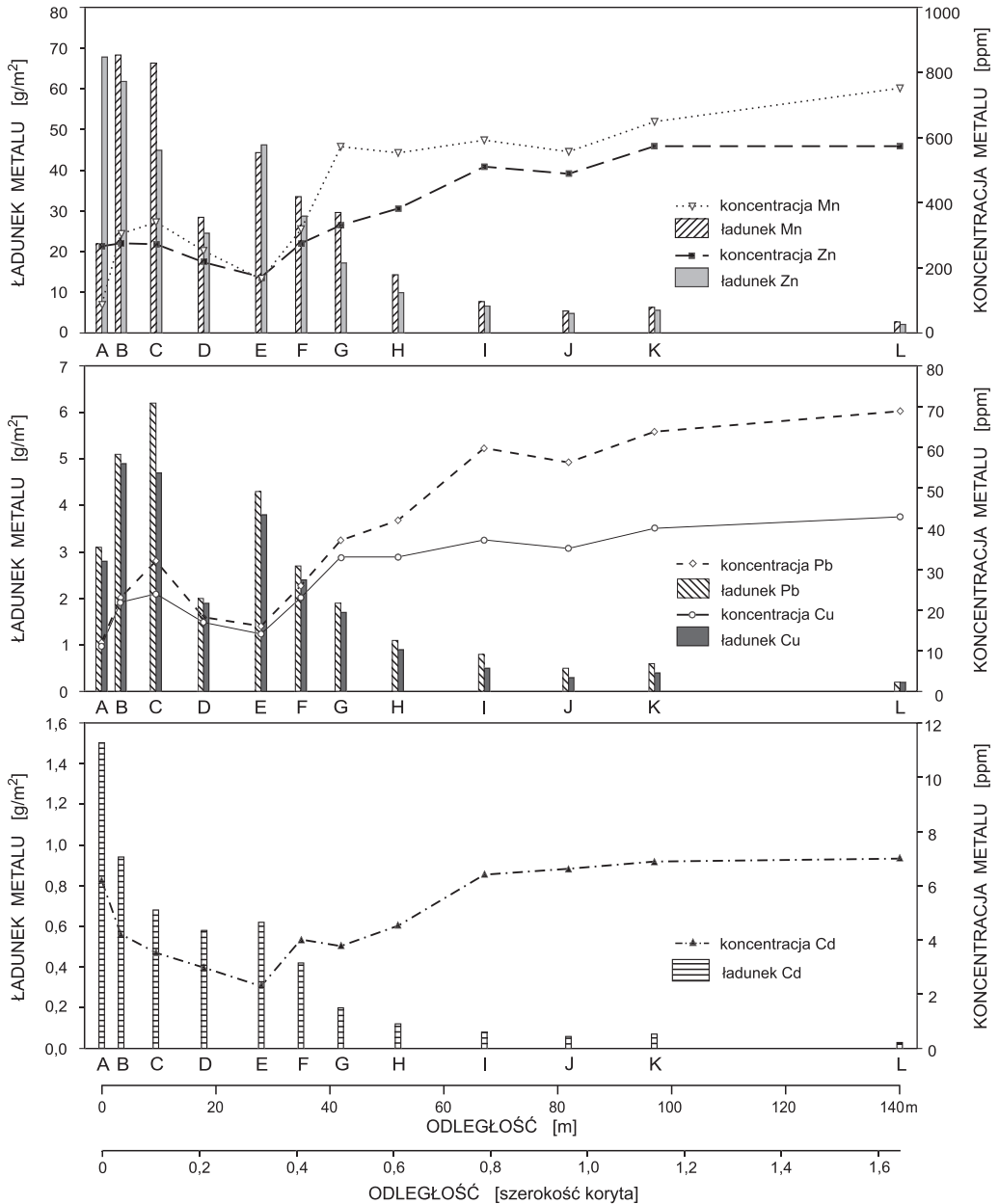


Obserwowane zróżnicowanie osadów pozakorytowych w badanych przekrojach wodowskazowych jest zgodne z teoretycznie odtworzonymi rozkładami prędkości wód wezbraniowych. W szerszych przekrojach w Smolicach i Sierosławicach znaczna różnica prędkości strumienia korytowego i pozakorytowego musiała warunkować występowanie dużego gradientu prędkości w poprzek równi zalewowej. Efektem tego była gwałtowna depozycja przy brzegu większości materiału klastycznego przenieszonego w zawieszynie do obszaru zalewowego, a także znaczne różnice miąższości i wielkości ziarna pomiędzy proksymalnymi i dystalnymi osadami pozakorytowymi. Natomiast w Bielanach różnica prędkości przepływu w korycie i w obszarze zalewowym była mniejsza, co nie sprzyjało gwałtownej depozycji przy brzegu rzeki ziarn transportowanych w suspensji i wyraźnemu formowaniu wału przykorytowego. Wskutek mniejszego gradientu prędkości w poprzek obszaru zalewowego, warunki depozycji w obrębie równi były bardziej równomierne, co prowadziło do mniejszych różnic miąższości i wielkości ziarna pomiędzy proksymalnymi i dystalnymi osadami pozakorytowymi.

## **6. Akumulacja metali ciężkich w obszarze zalewowym Wisły podczas wezbrania w lipcu 2001 roku**

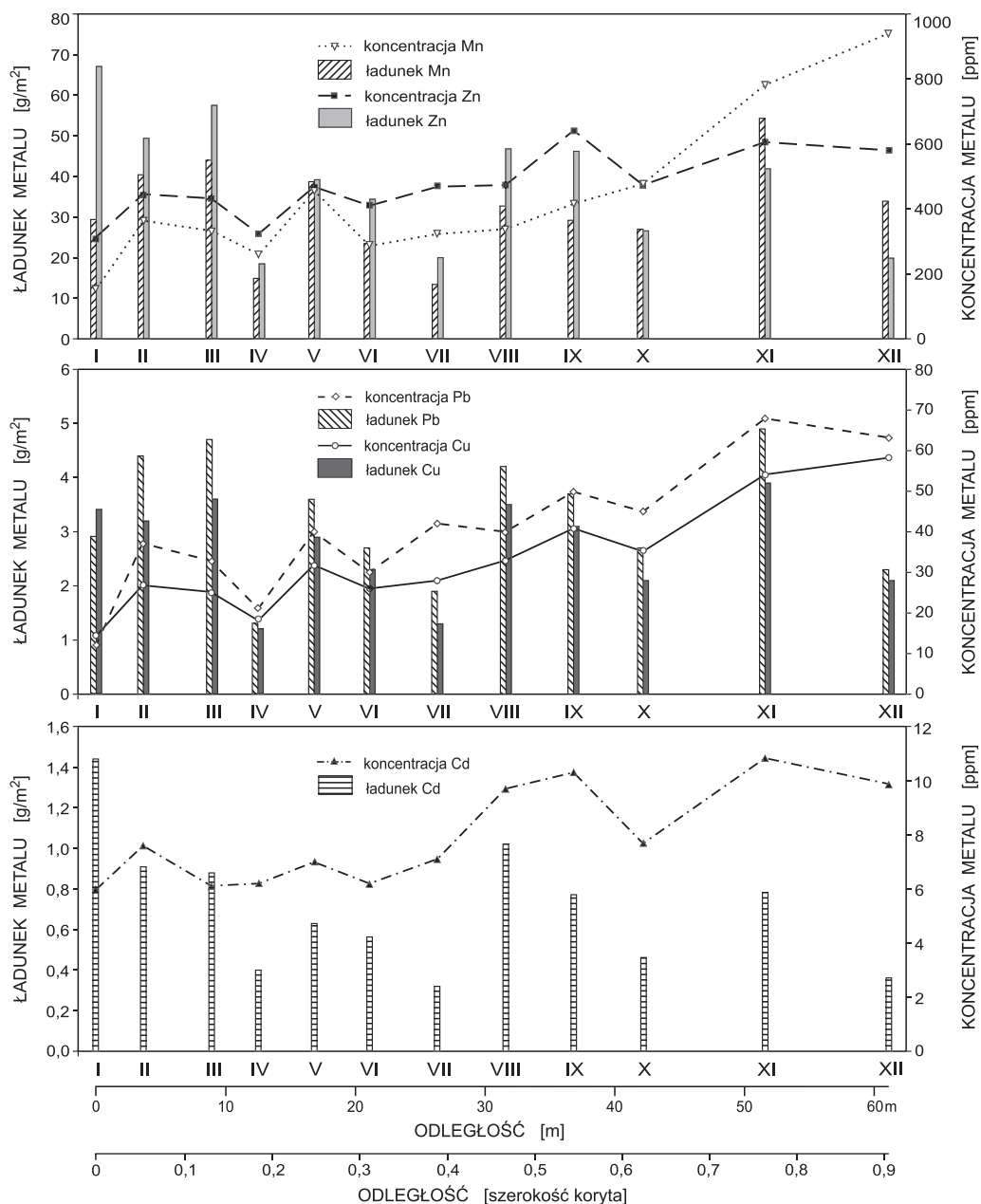
Badane przekroje wodowskazowe znacząco różniły się rozkładem koncentracji i ładunków metali ciężkich w osadach lipcowego wezbrania (ryc. 3.7-3.9). W przekroju Smolice o pośredniej szerokości koncentracje metali w osadach wału przykorytowego, w odległości do 30 m od koryta, były stosunkowo niskie. Bezpośrednio za wałem przykorytowym zaznaczał się szybki wzrost koncentracji metali w miarę oddalania się od koryta, natomiast w odległości od brzegu większej niż 50-60 m koncentracje utrzymywały się już na stałym, stosunkowo wysokim poziomie (ryc. 3.7). Poszczególne pierwiastki cechowało jednak nieco odmienne zróżnicowanie ich koncentracji w obrębie badanego przekroju. Skrajne koncentracje manganu różniły się 9-krotnie, ołowiu 6-krotnie, miedzi 4-krotnie, podczas gdy cynku i kadmu tylko 3-krotnie. Najniższe koncentracje Mn, Pb i Cu stwierdzono w najbardziej gruboziarnistych osadach zdeponowanych w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu rzeki, z drugorzędym minimum w stanowisku E, gdzie osady lipcowego wezbrania miały największą miąższość i również były stosunkowo gruboziarniste. Koncentracje kadmu były najniższe w stanowisku E i rosły znacząco w obydwu kierunkach (ryc. 3.7).

Ładunki metali ciężkich zdeponowanych wraz z osadami lipcowego wezbrania w Smolicach zmieniały się podobnie do zmian miąższości osadów, dlatego też malały znacząco w miarę wzrostu odległości od koryta (ryc. 3.7). Największe ładunki wszystkich badanych pierwiastków stwierdzono w osadach wału przykorytowego albo w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu, albo w niewielkiej odległości od niego. Dużą zależność ładunku metali od miąższości osadów podkreśla niska depozycja zanieczyszczeń w stanowisku D, gdzie osady wału przykorytowego były najcieńsze. Skrajne ładunki Mn, Zn, Cu i Pb różniły się w obrębie badanego przekroju 24-32 razy. Zróżnicowanie ładun-



Ryc. 3.7. Ładunki i koncentracje metali ciężkich w osadach pozakorytowych Wisły zdeponowanych w czasie wezbrania z lipca 2001 roku na jednostronnej równi zalewowej w przekroju Smolice. Odległość od koryta Wisły pokazano w wartościach bezwzględnych i względnych (skalowanych szerokością koryta).

Fig. 3.7. Load and concentration of Cd, Cu, Pb, Zn and Mn in the overbank sediments deposited by the July 2001 flood on one-side floodplain of the Smolice cross-section. Distance from the Vistula channel is shown both in absolute and relative (scaled by channel width) values.



Ryc. 3.8. Ładunki i koncentracje metali ciężkich w osadach pozakorytowych Wisły zdeponowanych w czasie wezbrania z lipca 2001 roku na jednostronnej równi zalewowej w przekroju Bielany. Odległość od koryta Wisły pokazano w wartościach bezwzględnych i względnych (skalowanych szerokością koryta).

Fig. 3.8. Load and concentration of Cd, Cu, Pb, Zn and Mn in the overbank sediments deposited by the July 2001 flood on one-side floodplain of the Bielany cross-section. Distance from the Vistula channel is shown both in absolute and relative (scaled by channel width) values.

ków kadmu było nawet większe, wykazując 50-krotny spadek pomiędzy brzegiem rzeki i dystalnym stanowiskiem L (ryc. 3.7).

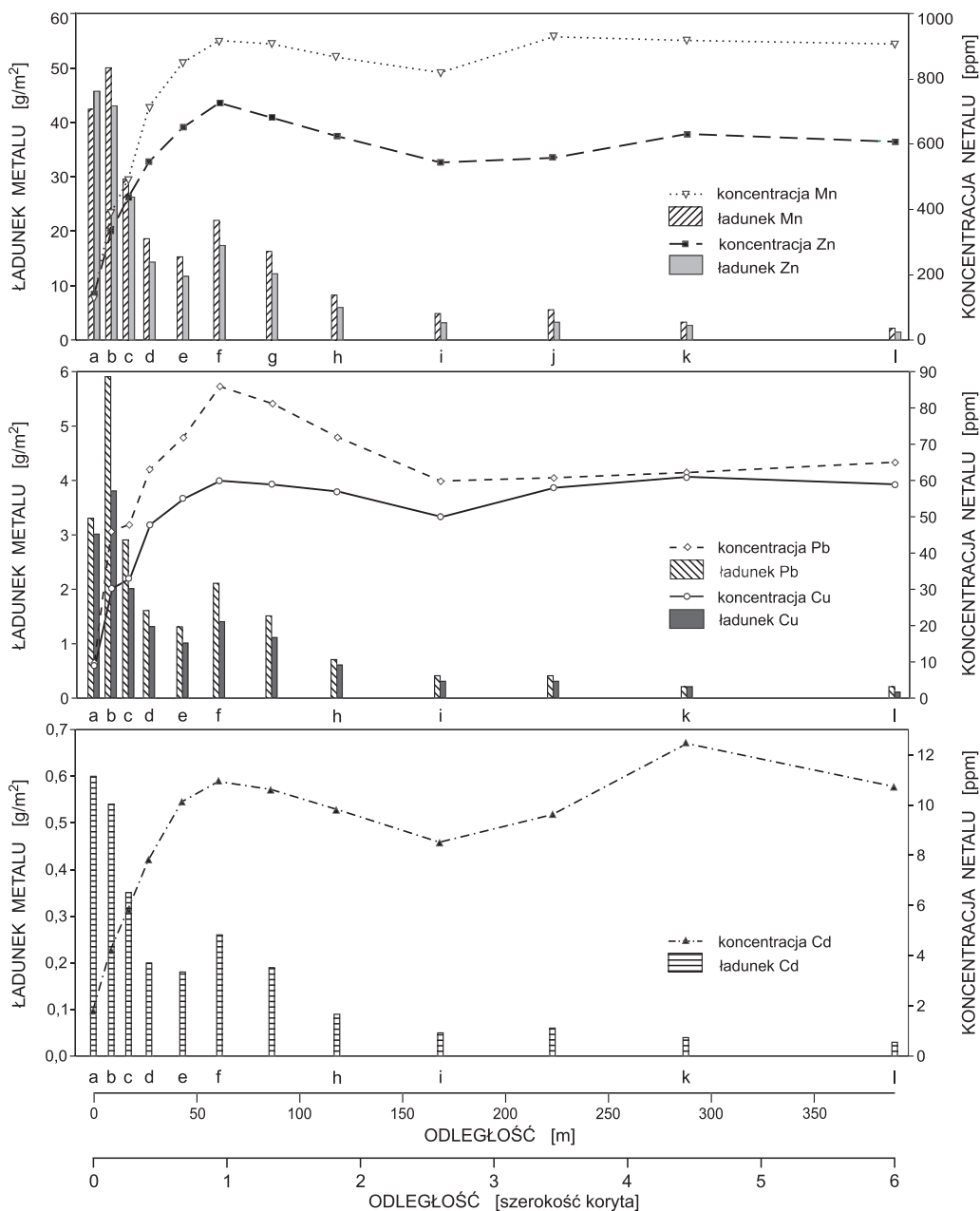
Na znacznie węższej równi zalewowej w Bielanych koncentracje metali w osadach lipcowego wezbrania wolno wzrastały wraz ze wzrostem odległości od koryta i na tle tego generalnego trendu zaznaczały się znaczne wahania koncentracji pomiędzy sąsiednimi stanowiskami. W dystalnej części równi zalewowej widoczne było pewne przyspieszenie rosnącego trendu koncentracji Mn, Pb i Cu w miarę oddalania się od koryta (ryc. 3.8). Zróżnicowanie koncentracji metali w obrębie równi zalewowej było podobne, jak w Smolicach, ze skrajnymi koncentracjami manganu różniącymi się 8-krotnie, ołowiu 6-krotnie, miedzi 4-krotnie, a cynku i kadmu tylko 2-krotnie. Jednak inaczej niż w Smolicach, w Bielanych kierunek zmian koncentracji wszystkich analizowanych pierwiastków w obrębie równi zalewowej był taki sam (ryc. 3.8).

W przekroju w Bielanych ładunki metali ciężkich w osadach lipcowego wezbrania zmieniały się bez wyraźnej prawidłowości (ryc. 3.8). Największe ładunki cynku i kadmu występowały przy brzegu koryta, a pozostałych trzech pierwiastków w dystalnej części równi. Najmniejsze ładunki metali stwierdzono w stanowisku IV (Zn i Pb) lub VII (Mn, Cu i Cd), w których miąższość zdeponowanych osadów była stosunkowo mała. Zróżnicowanie ładunków metali w obrębie równi zalewowej było tu znacząco mniejsze niż w Smolicach, ze skrajnymi wartościami różniącymi się 3-krotnie w przypadku ołowiu i 4,5 razy w przypadku kadmu (ryc. 3.8).

W Sierosławicach, w najszerszym spośród badanych przekrojów, koncentracje metali ciężkich w osadach lipcowego wezbrania początkowo szybko wzrastały w miarę wzrostu odległości od koryta, a dalej pozostawały na podobnym, dość wysokim poziomie (ryc. 3.9). Szybki wzrost koncentracji metali miał miejsce na przestrzeni 60 m od brzegu koryta, gdzie zaznaczał się szybki spadek wielkości ziarna osadów pozakorytowych. W Sierosławicach koncentracje metali zmieniały się w większym zakresie niż w pozostałych przekrojach, ze skrajnymi koncentracjami ołowiu różniącymi się 9-krotnie, manganu, miedzi i kadmu 7-krotnie, a cynku 5-krotnie (ryc. 3.9).

Ładunki metali były najwyższe w pobliżu brzegu rzeki i zmniejszały się wykładniczo ze wzrostem odległości od koryta wraz ze spadkiem miąższości osadów lipcowego wezbrania (ryc. 3.9). Podobnie jak w Smolicach, przekrój w Sierosławicach cechowało duże zróżnicowanie ładunku metali. Skrajne wartości ładunku poszczególnych pierwiastków różniły się od 20 do 38 razy, najmniej w przypadku kadmu i najbardziej w przypadku miedzi (ryc. 3.9).

Przedstawione wyniki wskazują, że koncentracje metali w badanych przekrojach były odwrotnie proporcjonalne do wielkości ziarna osadów, z niższymi koncentracjami cechującymi bardziej gruboziarniste osady zdeponowane w sąsiedztwie brzegu rzeki i wyższymi stwierdzonymi w drobnoziarnistych osadach zdeponowanych w większej odległości od koryta. Ten związek jest najwyraźniej widoczny w przekroju w Sierosławicach, w którym zróżnicowanie średniej średnicy ziarna osadów lipcowego wezbrania było dwa razy większe niż w pozostałych przekrojach (ryc. 3.2A-3.4A). Odmienne



Ryc. 3.9. Ładunki i koncentracje metali ciężkich w osadach pozakorytowych Wisły zdeponowanych w czasie wezbrania z lipca 2001 roku na jednostronnej równi zalewowej w przekroju Sierosławice. Odległość od koryta Wisły pokazano w wartościach bezwzględnych i względnych (skalowanych szerokością koryta).

Fig. 3.9. Load and concentration of Cd, Cu, Pb, Zn and Mn in the overbank sediments deposited by the July 2001 flood on one-side floodplain of the Sierosławice cross-section. Distance from the Vistula channel is shown both in absolute and relative (scaled by channel width) values.

zróznicowanie wielkości ziarna osadów pozakorytowych w poszczególnych przekrojach znajduje odzwierciedlenie w zaznaczających się pomiędzy tymi przekrojami różnicach zmian koncentracji metali wraz z rosnącą odległością od koryta.

Przy stosunkowo niewielkich różnicach gęstości osadów ( $1,2-1,6 \text{ g/cm}^3$ ), zróznicowanie ładunku metali przede wszystkim odzwierciedlało różnice koncentracji pierwiastków oraz miąższości osadu pomiędzy poszczególnymi stanowiskami. W stosunkowo szerokich przekrojach w Smolicach i Sierosławicach, wraz z rosnącą odległością od koryta koncentracje metali wzrastały kilkakrotnie, natomiast miąższość osadów lipcowego wezbrania malała kilkudziesięciokrotnie w Smolicach i stukrotnie w Sierosławicach. W rezultacie, zmiany miąższości osadów w obrębie obszaru zalewowego wywarły tu decydujący wpływ na zróznicowanie depozycji metali ciężkich i ładunki metali były najwyższe w sąsiedztwie brzegu rzeki, malejąc wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od koryta. Natomiast na wąskiej równi zalewowej w Bielanych wzrost koncentracji metali w miarę wzrostu odległości od koryta był równoważony przez zmniejszanie się miąższości osadów, co znalazło odzwierciedlenie w braku regularnych zmian ładunku metali w tym przekroju.

## 7. Dyskusja

Z dotychczasowych badań wiadomo, że szerokość dna doliny (obszaru zalewowego) wywiera wpływ na hydraulikę przepływów wezbraniowych tak, że zwężone odcinki dolin cechują się szybszym przyrostem stanów wody wraz ze wzrostem przepływu, większymi głębokościami zatopienia obszaru zalewowego oraz wyższymi wartościami naprężeń ścinających i jednostkowej mocy strumienia niż odcinki szersze [np. Magilligan, 1992b]. Niniejsze studium pokazało, że odcinki dolin o różnej szerokości cechują się także odmiennym rozkładem prędkości strumienia korytowego i pozakorytowego. Odtworzone rozkłady prędkości wskazują, że wąski przekrój w Bielanych cechowały znacząco wyższe średnie prędkości przepływu w obszarze zalewowym oraz mniejsza różnica prędkości strumienia korytowego i pozakorytowego niż szersze przekroje w Smolicach i Sierosławicach (ryc. 3.2B-3.4B, tab. 3.2). Jest istotne, że wyższe prędkości przepływu ponad równią zalewową w Bielanych nie były wynikiem większego spadku dna doliny (który był tu najmniejszy spośród trzech badanych posterunków wodowskazowych – tab. 3.1), lecz większego transferu pędu od strumienia korytowego do strumienia pozakorytowego (ryc. 3.5) niż w szerszych przekrojach.

Odmienne rozkłady prędkości przepływu w poszczególnych przekrojach znalazły odzwierciedlenie w odmiennym zróznicowaniu formowanych w nich osadów pozakorytowych, przy czym różnice te są szczególnie wyraźne pomiędzy oboma szerszymi przekrojami oraz wąskim przekrojem w Bielanych (ryc. 3.6). W szerszych przekrojach duża różnica prędkości strumienia korytowego i pozakorytowego musiała prowadzić do szybkiego zmniejszania się kompetencji przepływu w miarę wzrostu odległości od koryta. Powodowało to szybką depozycję grubszych ziarn rumowiska

unoszonego w pobliżu brzegu rzeki, czego skutkiem był wyraźny spadek wielkości ziarna i miąższości zdeponowanych osadów w kierunku dystalnym [por. Marriott, 1996; Wyżga, 1999]. W Smolicach musiała także występować prostopadła składowa przepływu, powodując trakcyjny transport ziarn piasku wypadających z suspensji i zwiększenie zasięgu depozycji osadów wału przykorytowego w porównaniu do sytuacji w Sierosławicach (ryc. 3.6). W wąskim przekroju w Bielanych mniejsza różnica prędkości przepływu w korycie i ponad równią zalewową znalazła odzwierciedlenie w bardziej równomiernym rozkładzie miąższości zdeponowanych osadów pozakorytowych, a wyższe prędkości przepływu umożliwiły depozycję piasku na przeważającej szerokości równi zalewowej. Należy jednak podkreślić, że obserwowany w Bielanych charakter depozycji pozakorytowej nie odzwierciedla transferu rumowiska do obszaru zalewowego przez konwekcję, (której działanie byłoby trudne w występującym tu niemal prostym korycie dwudzielnym), lecz raczej mały gradient prędkości w poprzek równi zalewowej. Skutkiem tego kompetencja przepływu ponad równią zalewową, a także koncentracja i wielkość ziarn rumowiska unoszonego wolno malały wraz ze wzrostem odległości od koryta.

Zróznicowanie koncentracji metali ciężkich w osadach lipcowego wezbrania odzwierciedla stwierdzone w poszczególnych przekrojach zróznicowanie uziarnienia osadów. Zasadniczo, w piaszczystych osadach deponowanych w pobliżu koryta koncentracje metali były stosunkowo niskie, wyższe koncentracje cechowały natomiast pylasto-ilaste osady deponowane w większej odległości od brzegu rzeki. W Sierosławicach szybki wzrost koncentracji metali miał miejsce w przylegającej do koryta strefie o szerokości 60 m (ryc. 3.9), w której dobrze wysortowane, średnioziarniste piaski przechodziły bocznie w muły o niewielkim udziale ziarn frakcji piaszczystej (ryc. 3.6). W Smolicach koncentracje metali były stosunkowo niskie w piaszczystych osadach wału przykorytowego, a ich szybki wzrost miał miejsce tuż poza jego krawędzią (ryc. 3.7) wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziarna osadów (ryc. 3.6). W przekroju Bielany na większej części szerokości obszaru zalewowego stopniowej zmianie wielkości ziarna osadów od piasków średnioziarnistych do mułów towarzyszył wolny wzrost koncentracji metali, a szybsze zmniejszanie się frakcji osadów w dystalnej części równi znalazło odzwierciedlenie w szybszym wzroście koncentracji manganu, ołowiu i cynku (ryc. 3.6, 3.8). Powyższe obserwacje wskazują, że metale ciężkie w osadach lipcowego wezbrania były związane z ziarnami frakcji pylastej i ilastej, a duży udział ziarn piasku powodował rozproszenie zanieczyszczonych drobnych frakcji w osadzie [por. Zhao i in., 1999]. Wzrost koncentracji metali w miarę wzrostu odległości od koryta Wisły, towarzyszący zmniejszaniu się średniej średnicy ziarna osadów, jest zgodny ze wzrostem koncentracji metali obserwowanym w piaszczysto-ilastych osadach pozakorytowych niektórych dużych i małych rzek [por. Middelkoop, 2000; Zhao i in., 1999], lecz odwrotny w stosunku do różnic koncentracji stwierdzonych w sąsiedztwie rzek transportujących metale związane głównie z grubymi ziarnami [por. Macklin, Dowsett, 1989; Marron, 1992].

Różnice rozkładu koncentracji metali w obrębie obszaru zalewowego, obserwowane pomiędzy badanymi przekrojami Wisły, odzwierciedlają różnice szerokości tych przekrojów, które warunkowały odmienne rozkłady prędkości przepływu i depozycji osadów pozakorytowych w poszczególnych posterunkach wodowskazowych. Rozpoznanie zależności pomiędzy szerokością równi zalewowej i zróżnicowaniem koncentracji metali było możliwe dzięki porównaniu obserwacji z przekrojów o różnej szerokości, podczas gdy wcześniejsze studia nie wykryły takiej zależności [Martin, 2004].

Podczas gdy koncentracje czterech z badanych pierwiastków na równi zalewowej Wisły są podobne do obserwowanych w dolinach innych dużych rzek europejskich [por. Middelkoop, 2000; Grosbois i in., 2006; Baborowski i in., 2007], zawartość kadmu jest wyższa z powodu bliskości kopalń rud cynku i ołowiu. Zasadniczo, w analizowanych przekrojach zróżnicowanie koncentracji wszystkich badanych metali jest dość podobne wskutek związania tych pierwiastków z drobnymi ziarnami mineralnymi i takich samych sposobów transportu i depozycji. Wyjątkiem jest występowanie wysokich koncentracji kadmu w pobliżu brzegu koryta w Smolicach, które może wskazywać na słabsze powiązanie występowania kadmu z osadami drobnoziarnistymi. Takie zachowanie kadmu może być związane z większą mobilnością tego pierwiastka w warunkach utleniających oraz jego adsorpcją na ziarnach piasku. Jest to możliwe właśnie w Smolicach, usytuowanych kilka kilometrów od ujścia rzeki Chechło transportującej ścieki z kopalni cynku i ołowiu w Trzebini z dużą zawartością kadmu [Ciszewski, 1997]. Odmienne zróżnicowanie koncentracji kadmu niż innych pierwiastków obserwowano także w dolinie rzeki Severn, odbierającej ścieki pochodzące z wydobycia rud metali [Zhao i in., 1999].

Odmienne rozkłady miąższości i wielkości ziarna osadów pozakorytowych zdeponowanych w przekrojach o różnej szerokości (ryc. 3.6) były także odzwierciedlone w odmiennym zróżnicowaniu ładunków metali w poszczególnych przekrojach (ryc. 3.7-3.9). W szerszych przekrojach w Smolicach i Sierosławicach względne zmniejszanie się miąższości osadów lipcowego wezbrania wraz ze wzrostem odległości od koryta było znacznie większe niż wzrost koncentracji metali. W rezultacie, ładunki metali ciężkich były największe w sąsiedztwie brzegu rzeki i zmniejszały się wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od koryta. Na wąskiej równi zalewowej w Bielanach tempo zmniejszania się miąższości osadów wraz z rosnącą odległością od koryta było na tyle małe, że mogło być kompensowane przez przeciwny trend zmian koncentracji metali. Ładunki metali zmieniały się tu pomiędzy kolejnymi stanowiskami w nieregularny sposób, bez wyraźnego związku z odległością od koryta. Największe ilości metali ciężkich zdeponowanych w trzech badanych przekrojach przewyższają od kilku do 10 razy wielkości zaobserwowane w obszarach zalewowych dolnego Renu i Mozy podczas wezbrania o 40-letniej powtarzalności [por. Middelkoop, 2000]. Ta różnica odzwierciedla znacząco wyższe tempo przyrostu proksymalnych osadów pozakorytowych w dolinie górnej Wisły (pomimo mniejszej wielkości wezbrania z lipca 2001), przy podobnych koncentracjach metali w osadach pozakorytowych tych trzech rzek.



## 8. Podsumowanie i wnioski

W artykule wykazano wpływ szerokości obszaru zalewowego na zróżnicowanie depozycji metali ciężkich w jego obrębie. Dla trzech przekrojów wodowskazowych o różnej szerokości określono rozkłady prędkości przepływu w czasie wezbrania w lipcu 2001 roku i porównano je z obserwowanym zróżnicowaniem miąższości i wielkości ziarna osadów pozakorytowych oraz depozycji metali ciężkich.

W przekrojach Smolice i Sierosławice, o szerokości 4,5 oraz 9 razy większej od pełnokorytowej szerokości rzeki, średnia prędkość przepływu w strefie pozakorytowej była mała i znacząco odbiegała od średniej prędkości strumienia korytowego. W przekroju Bielany, o szerokości zaledwie 2,6 razy większej od szerokości koryta, średnia prędkość przepływu ponad równią zalewową była duża, zarówno w wartościach bezwzględnych, jak i w porównaniu do prędkości w strefie korytowej. Te odmienne prędkości przepływu w strefie pozakorytowej odzwierciedlają różną intensywność interakcji pomiędzy strumieniem korytowym i pozakorytowym w szerokich i wąskich przekrojach.

W Smolicach i Sierosławicach stwierdzono szybkie zmniejszanie się miąższości i wielkości ziarna osadów lipcowego wezbrania wraz z rosnącą odległością od koryta. Zmiany te były najszybsze w sąsiedztwie brzegu w Sierosławicach, natomiast wolniejsze w Smolicach, gdzie uformowała się szeroka strefa piaszczystych osadów wału przykorytowego. W przeciwieństwie do tych przekrojów, w Bielanach miąższość i wielkość ziarna osadów pozakorytowych była stosunkowo mało zróżnicowana.

W Sierosławicach koncentracje metali ciężkich w osadach lipcowego wezbrania najpierw szybko wzrastały wraz z rosnącą odległością od koryta, a następnie pozostawały na wysokim poziomie na przeważającej części równi zalewowej. Natomiast w Smolicach były one stosunkowo niskie w osadach wału przykorytowego i wysokie na pozostałej części równi zalewowej. Jednak wskutek szybkiego zmniejszania się miąższości osadów lipcowego wezbrania w kierunku dystalnym, w obu przekrojach ładunki metali ciężkich były najwyższe w sąsiedztwie brzegu i zmniejszały się wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od koryta. W Bielanach koncentracje metali ciężkich wolno wzrastały w miarę wzrostu odległości od koryta, natomiast ładunki metali podlegały nieregularnym wahaniom w obrębie równi zalewowej, z najwyższymi ładunkami jednych pierwiastków występującymi w sąsiedztwie koryta, innych zaś z dala od niego.

Przedstawione badania pokazały, że szerokość obszaru zalewowego i determinowana przez nią hydraulika przepływów wezbraniowych wywiera znaczący wpływ na zróżnicowanie depozycji osadów pozakorytowych i metali ciężkich. W szerszych przekrojach największe ilości metali ciężkich są akumulowane w pobliżu brzegów rzeki. Ma to istotne implikacje dla gospodarki wodnej prowadzonej na rzekach zanieczyszczonych oraz monitoringu stanu ich środowiska. Znany jest fakt, że w dolinach, w których boczna migracja koryta i przerabianie aluwii przez rzekę zostały ograniczone w wyniku regulacji koryta, osady pozakorytowe stają się głównym składnikiem budującym rów-

ninę aluwialną [Walling i in., 1996]. Ponieważ wiele rzek uregulowanych podlegało zanieczyszczeniu w długim okresie, słusznym wydaje się założenie, że znacząca część metali ciężkich jest zgromadzona w pobliżu ich brzegów. Na przykład, w badanym odcinku Wisły osady pozakorytowe, w których koncentracje metali ciężkich wielokrotnie przewyższają wartości tła geochemicznego, mają miąższość większą niż 2 m [Macklin, Klimek, 1992]. To wskazuje, że ich erozja może spowodować znaczne zagrożenie dla jakości wody. Z tego powodu umocnienia brzegów powinny na takich rzekach być utrzymywane w dobrym stanie w celu zapobieżenia remobilizacji metali ciężkich zgromadzonych w osadach pozakorytowych.

Ponadto badania depozycji metali ciężkich w obszarze zalewowym Wisły pokazują, że analiza jedynie koncentracji zanieczyszczeń w osadach pozakorytowych może być niewystarczająca do właściwej oceny zagrożenia dla środowiska wodnego. Zagrożenie to będzie między innymi zależeć od ładunku zgromadzonych zanieczyszczeń, a same wielkości koncentracji mogą być niewystarczające do oceny takiego zagrożenia, szczególnie w dolinach, w których ma miejsce szybka depozycja osadów pozakorytowych i objętość zanieczyszczonych osadów jest duża.

### Piśmiennictwo

- Asselman N. E. M., Middelkoop H., 1995: Floodplain sedimentation: quantities, patterns and processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, **20**, 481-499.
- Bates P. D., Anderson M. G., Baird L., Walling D. E., Simm D., 1992: Modelling floodplain flows using a two-dimensional finite element model. *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 575-588.
- Baborowski M., Büttner O., Morgenstern P., Krüger F., Lobe I., Rupp H., von Tümpling W., 2007: Spatial and temporal variability of sediment deposition on artificial-lawn traps in a floodplain of the River Elbe. *Environmental Pollution*, **148**, 770-778.
- Buszewski B., Buszewska T., Chmarzyński A., Kowalkowski T., Kowalska J., Kosobucki P., Zbytniewski R., Namieśnik J., Kot-Wasik A., Pacyna J., Panasiuk D., 2005: The present condition of the Vistula river catchment area and its impact on the Baltic Sea coastal zone. *Regional Environmental Change*, **5**, 97-110.
- Bradley S. B., Cox J. J., 1990: The significance of the floodplain to the cycling of metals in the River Derwent catchment, UK. *The Science of the Total Environment*, **97/98**, 441-454.
- Ciszewski D., 1997: Source of pollution as a factor controlling distribution of heavy metals in bottom sediments of Chechło River (south Poland). *Environmental Geology*, **29**, 50-57.
- Ciszewski D., 1998: Channel processes as a factor controlling accumulation of heavy metals in river bottom sediments: consequences for pollution monitoring (Upper Silesia, Poland). *Environmental Geology*, **36**, 45-54.
- Ciszewski D., 2003: Heavy metals in vertical profiles of the middle Odra River overbank sediments: evidence for pollution changes. *Water, Air and Soil Pollution*, **143**, 81-98.
- Förstner U., Wittman G. T. W., 1983: *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer, Berlin.

- Grosbois C., Meybeck M., Horowitz A., Ficht A., 2006: The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits (1994-2000). *The Science of the Total Environment*, **356**, 22-37.
- Guccione M. J., 1993: Grain-size distribution of overbank sediment and its use to locate channel position. [w:] M. Marzo, C. Puigdefábregas (red.), *Alluvial Sedimentation*. International Association of Sedimentologists Special Publication, **17**, 185-194.
- Helios-Rybicka E., 1986: Rola minerałów ilastych w wiązaniu metali ciężkich przez osady rzeczne górnej Wisły. *Geologia*, **32**, 1-123.
- Helios-Rybicka E., 1996: Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland. *Applied Geochemistry*, **11**, 3-9.
- James C. S., 1985: Sediment transfer to overbank sections. *Journal of Hydraulic Research*, **23**, 435-452.
- Knight D. W., Shiono K., 1996: River channel and floodplain hydraulics. [w:] M. G. Anderson, D. E. Walling, P. D. Bates (red.), *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 139-181.
- Lach J., Wyżga B., 2002: Channel incision and flow increase of the upper Wisłoka River, southern Poland, subsequent to the reafforestation of its catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 445-462.
- Lecce S. A., Pavlovsky R. T., 2001: Use of mining-contaminated sediment tracers to investigate the timing and rates of historical flood plain sedimentation. *Geomorphology*, **38**, 85-108.
- Lewin J., Macklin M. G., 1987: Metal mining and floodplain sedimentation in Britain. [w:] V. Gardiner (red.), *International Geomorphology 1986, Part I*. Wiley, Chichester, 1009-1027.
- Łajczak A., 1995: The impact of river regulation, 1850-1990, on the channel and floodplain of the Upper Vistula River, southern Poland. [w:] E. J. Hickin (red.), *River Geomorphology*, Wiley, Chichester, 209-233.
- Łajczak A., 2003: Contemporary transport of suspended material and its deposition in the Vistula River, Poland. *Hydrobiologia*, **494**, 43-49.
- Macklin M. G., 1996: Fluxes and storage of sediment-associated heavy metals in floodplain systems: assessment and river basin management issues at a time of rapid environmental change. [w:] M. G. Anderson, D. E. Walling, P. D. Bates (red.), *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 441-460.
- Macklin M. G., Dowsett R., 1989: The chemical and physical speciation of trace metals in fine-grained over bank flood sediments in the Tyne Basin, North-East England. *Catena*, **16**, 135-151.
- Macklin M. G., Klimek K., 1992: Dispersal, storage and transformation of metal-contaminated alluvium in the upper Vistula basin, southwest Poland. *Applied Geography*, **12**, 7-30.
- Magilligan F. J., 1992a: Sedimentology of a fine-grained aggrading floodplain. *Geomorphology*, **4**, 393-408.
- Magilligan F. J., 1992b: Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology*, **5**, 373-390.
- Marriott S. B., 1992: Textural analysis and modelling of a flood deposits: River Severn, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 687-697.
- Marriott S. B., 1996: Analysis and modelling of overbank deposits. [w:] M. G. Anderson, D. E. Walling, P. D. Bates (red.), *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 63-93.

- Marron D. C., 1989: Physical and chemical characteristics of a metal-contaminated overbank deposit, west-central South Dakota, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 419-432.
- Marron D. C., 1992: Floodplain storage of mine tailings in the Belle Fourche river system: a sediment budget approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 675-685.
- Martin C. W., 2004: Heavy metal storage in near channel sediments of the Lahn River, Germany. *Geomorphology*, **61**, 275-285.
- Middelkoop H., 2000: Heavy-metal pollution of the River Rhine and Meuse floodplains in the Netherlands. *Netherland Journal of Geosciences*, **79**, 411-428.
- Middelkoop H., Asselman N. E. M., 1998: Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 561-573.
- Miller J., Barr R., Grow D., Lechler P., Richardson D., Waltman K., Warwick J., 1999: Effects of the 1997 flood on the transport and storage of sediment and mercury within the Carson River Valley, west-central Nevada. *Journal of Geology*, **107**, 313-327.
- Nicholas A. P., Walling D. E., 1995: Modelling contemporary overbank sedimentation on floodplains: some preliminary results. [w:] E. J. Hickin (red.), *River Geomorphology*, Wiley, Chichester, 131-153.
- Pizzuto J. E., 1987: Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology*, **34**, 301-317.
- Sasim M., Mierkiewicz M., 2002: Powódź w dorzeczu środkowej i dolnej Wisły w lipcu 2001. *Gospodarka Wodna*, **1**, 10-16.
- Sellin R. H. J., Willetts B. B., 1996: Three-dimensional structures, memory and energy dissipation in meandering compound channel flow. [w:] M. G. Anderson, D. E. Walling, P. D. Bates (red.), *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 255-297.
- Stewart M. D., Bates P. D., Price D. A., Burt T. P., 1998: Modelling the spatial variability in floodplain soil contamination during flood events to improve chemical mass balance estimates. *Hydrological Processes*, **12**, 1233-1255.
- Walling D. E., He Q., Nicholas A. P., 1996: Floodplains as suspended sediment sinks. [w:] M. G. Anderson, D. E. Walling, P.D. Bates (red.), *Floodplain Processes*, Wiley, Chichester, 399-437.
- Walling D. E., Owens P. N., Carter J., Leeks G. J. L., Lewis S., Meharg A. A., Wright J., 2003: Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel floodplain systems. *Applied Geochemistry*, **18**, 195-220.
- Wyźga B., 1999: Estimating mean flow velocity in channel and floodplain areas and its use for explaining the pattern of overbank deposition and floodplain retention. *Geomorphology*, **28**, 281-297.
- Wyźga B., 2001: Impact of the channelization-induced incision of the Skawa and Wisłoka Rivers, southern Poland, on the conditions of overbank deposition. *Regulated Rivers: Research and Management*, **17**, 85-100.
- Wyźga B., 2008: A review on channel incision in the Polish Carpathian rivers during the 20th century. [w:] H. Habersack, H. Piégay, M. Rinaldi (red.), *Gravel-Bed Rivers VI – From Process Understanding to River Restoration*, Elsevier, Amsterdam, 525-556.
- Zhao Y., Marriott S., Rogers J., Iwugo K., 1999: A preliminary study of heavy metal distribution on the floodplain of the River Severn, UK by a single flood event. *The Science of the Total Environment*, **243/244**, 219-231.

## **Hydraulic controls of the entrapment of heavy-metal polluted sediments on a floodplain of variable width, the upper Vistula River, southern Poland**

### **Summary**

Distribution of heavy metal-polluted overbank sediments deposited by a major flood of July 2001 in three gauging sections of different width on the Vistula River, southern Poland, was investigated and related to reconstructed pattern of flow velocity during the event. In the Smolice and the Sierosławice cross-sections, 4.5 and 9 times wider than the respective channel widths, mean velocity of the floodplain flow was low and showed a marked contrast with mean velocity in the channel zone. High rates of lateral thinning and fining of overbank deposits were observed here. At Sierosławice the heavy metal concentrations were rapidly increasing with increased distance from the channel at first and then remained high over most of the floodplain width, whereas at Smolice they were relatively low within the levee deposits and high over the rest of the floodplain. However, in both cross-sections the loads of heavy metals were the highest close to the channel margin and due to the rapid lateral thinning of the flood deposits, they decreased exponentially with increasing distance from the channel. The Bielany cross-section, only 2.6 times wider than the channel width, was typified by high mean velocity of the floodplain flow. The sediments deposited on the narrow floodplain were mostly sands, thinning slowly in the distal direction. While the concentrations of heavy metals increased gradually with increasing distance from the channel, their loads fluctuated across the floodplain, with the highest load of some metals occurring near the channel margin and that of others recorded far from the channel. This study indicates that floodplain width and the resultant flow hydraulics exert a significant influence on the lateral distribution of floodplain sediments and the entrapped heavy metals. In wider floodplain sections, the largest amounts of heavy metals accumulate near the channel margin and might be readily remobilized in the future due to bank erosion.

Bartłomiej Wyźga – Instytut Ochrony Przyrody PAN, al. Mickiewicza 33,  
31-120 Kraków, wyźga@iop.krakow.pl  
Dariusz Ciszewski – Instytut Ochrony Przyrody PAN, al. Mickiewicza 33,  
31-120 Kraków, ciszewski@iop.krakow.pl