

Robert KASPEREK, Włodzimierz PARZONKA

Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Institute of Environmental Engineering, Wrocław University of Environmental and Life Sciences

Transport rumowiska i pomiary obrukowania dna koryta górnej Odry w rejonie granicznych meandrów **Sediment transport and measuring river-bed armoring of upper Odra River in the region of border meanders**

Słowa kluczowe: rzeka, opory ruchu, transport rumowiska, obrukowanie dna rzeki

Key words: river, flow resistance, sediment transport, armoring of river bed

Wprowadzenie

W rzekach aluwialnych o dnie wytworzonym z materiału wielofrakcyjnego zachodzą wzmoczone procesy erozyjno-sedymentacyjne. Dlatego też prawidłowa ich ocena powinna opierać się na wnikliwej analizie warunków transportu materiału dennego.

W Górnej Odry na odcinku granicznym Chałupki – ujście Olzy zachodzą intensywne procesy fluwialne. Występują tam unikalne w tej części Europy naturalne meandry. Na skutek powodzi nastąpiło przerwanie meandra nr IV (1966 r.) i nr I (1997 r.) oraz znaczne skrócenie trasy rzeki. Istotny wpływ na zmianę reżimu rzeki oraz na przebieg erozji i sedymentacji rumowiska miały tu również

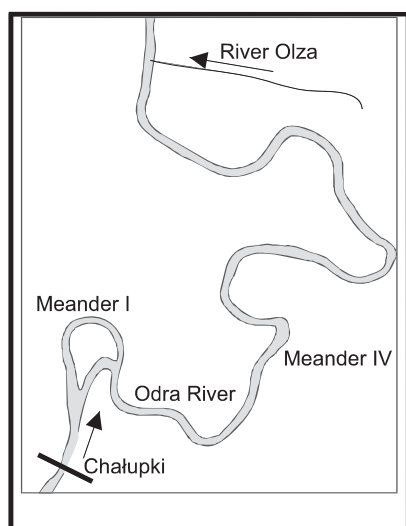
prace dotyczące ubezpieczenia brzegów koryta. Spowodowały one istotny wzrost spadku podłużnego rzeki oraz intensywną erozję materiału z dna i z brzegów. Całkowite wyłączenie z przepływu meandra nr IV oraz częściowe meandra nr I spowodowało korzystne skutki ekologiczne. Zwiększyła się różnorodność biologiczna oraz pojawiły się nowe gatunki fauny i flory. Światowy Fundusz na Rzecz Przyrody (WWF) prowadzi intensywne działania, mające na celu stworzenie takiego układu w obrębie meandrów, w którym zachowana zostanie dynamika procesów korytowych i zapewniony naturalny rozwój ekosystemu. Jednak wskutek zmian, jakie nastąpiły m.in. w obrębie meandra nr I, została naruszona równowaga hydrodynamiczna koryta Odry, która w przyszłości może skutkować następnymi przerwaniem.

W pracy autorzy określili głębokości (h_s) i prędkości średnie (v_{sr}), współczynniki oporu K_s i K_r , oszacowali natężenie transportu rumowiska (G) oraz ocenili

obrukowanie dna Odry w rejonie meandry nr I po powodzi w 1997 roku.

Charakterystyka odcinka Górnej Odry

Badany odcinek Odry rozciąga się wzdłuż granicy polsko-czeskiej od miejscowości Chałupki do ujścia Olzy (km 20 – km 28, rys. 1). Znaczną jego część zajmują unikalne meandry rzeczne (Parzonka 2002).



RYSUNEK 1. Rzeka Odra między Chałupkami a ujściem Olzy
FIGURE 1. Odra River between Chałupki town and Olza mouth

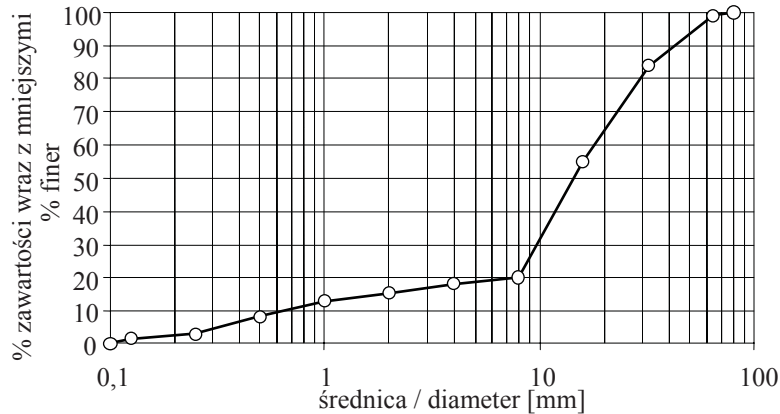
Odra w obrębie granicznych meandrów ma koryto wcięte w osady rozległej terasy (Zieliński 2002), która ma szerokość kilku kilometrów. Jej zachodnia granica przebiega wzdłuż drogi Chałupki – Olza, a wschodnia przechodzi w terasę rzeki Olzy. Pod powierzchnią terasy występuje 2–3-metrowy pokład trudno erodowalnej mady ilastej. Ten ila-

sty utwór powstał w efekcie holocenijskich wylewów wód powodziowych Odry na terasę. W warunkach słabo mobilnych i stojących wód pozakorytowych akumulowane były frakcje drobniejsze od piasku. Przy korycie Odry znajdują się aluwia lub młodsze osady. Takie osady są bardziej gruboziarniste od ilastych mad pozakorytowych. Jest to najczęściej piasek mułowy, rzadziej mada piaszczysta. Grubość tych pokładów zwykle dochodzi do 2 m. Pod madą występuje pokład piasku o zmiennej grubości rzędu 1–2 m. Są to piaski holocenijskie, a ich genezę należy wiązać z facją korytową. Najniższe ogniwo osadów rzecznych stanowią żwiry piaszczyste wieku plejstocenijskiego. Tworzą one grubą 5–10-metrową serię osadową, pod którą występują często ility trzeciorzędowe (Zieliński 2002).

Na badanym odcinku rzeki przed powodzią w 1997 roku w dnie koryta zalegał grunt o następującym składzie ziarnowym: piaski 0,005–2 mm (15%), żwiry 2–15 mm (35%) oraz otoczaki 15–75 mm (50%). Przeciętna średnica ziarna (d_{50}) wynosiła 14 mm, a maksymalna (d_{90}) – 42 mm (rys. 2).

Początek ruchu i unoszenie rumowiska

Przed przerwaniem meandry nr I w 1997 roku spadek zwierciadła wody (I) w strefie stanów średnich wynosił 0,75‰. Po 1997 roku nastąpiło skrócenie trasy rzeki z 7,3 km do 6,8 km oraz wzrost spadku do 0,80‰ (Parzonka 2002). Na podstawie oceny hydraulicznej oraz składu ziarnowego rumowiska dennego wyznaczono graniczne naprężenia ścinające (θ_{cr}) oraz średnie głąbo-



RYSUNEK 2. Typowe uziarnienie materiału dennego, rzeka Odra, przekrój Chałupki (1996 r.)
 FIGURE 2. Typical grain size distribution of bed material, Odra River, Chałupki station (1996)

kości wody (h_s), po których przekroczeniu poszczególne frakcje są wprowadzane w ruch (tab. 1). W tym celu posłużono się następującymi formułami (Kasperek 1999):

- bezwymiarowa średnica ziarna (D_*)

$$D_* = \left[\left(\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \right) g d_i^3 / v^2 \right]^{0,33} \quad (1)$$

- bezwymiarowe naprężenie ścinające (θ_{cr})

$$\begin{aligned} \theta_{cr} &= 0,24 D_*^{-1} & 1 < D_* \leq 4 \\ \theta_{cr} &= 0,14 D_*^{-0,64} & 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr} &= 0,04 D_*^{-0,1} & 10 < D_* \leq 20 \\ \theta_{cr} &= 0,013 D_*^{-0,29} & 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr} &= 0,055 & D_* > 150 \end{aligned} \quad (2)$$

- naprężenie ścinające (τ_{cr})

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} (\rho_r - \rho_w) g d_i \quad (3)$$

- graniczna głębokość wody (h_{cr})

$$h_{cr} = \tau_{cr} / (\rho_w g I) \quad (4)$$

Z obliczeń wynika, że frakcje tworzące dno Odry na meandrującym odcinku są uruchamiane po przekroczeniu następujących średnich głębokości (h_s):

- drobne i grube piaski: 4–11 cm przed przerwaniem meandra i 4–10 cm po przerwaniu,
- drobne i grube żwiry: 0,54–1,4 m przed przerwaniem meandra i 0,51–1,3 m po przerwaniu,
- drobne i grube otoczaki: 2,7–8,2 m przed przerwaniem meandra i 2,5–7,7 m po przerwaniu.

Graniczne głębokości (h_{susp}), przy których ma miejsce początek unoszenia rumowiska, wyznaczono na podstawie kryterium van Rijna (1993). Najdrobniejszy piaszczysty materiał jest unoszony już przy głębokościach od kilku do kilkunastu centymetrów, żwiry w zależności od wielkości ziarna przy $h_{susp} = 1,4$ –7,9 m, a otoczaki dopiero przy h_{susp} większych od 7 m (tab. 1).

Współczynnik oporu K_s i K_r oraz parametr K_s/K_r

Analizę zmienności współczynnika prędkości $K_s = v_{sr} / h_s^{2/3} I^{1/2}$ przeprowadzono w przekroju Chałupki, z podziałem okresu badawczego 1967–1981 na

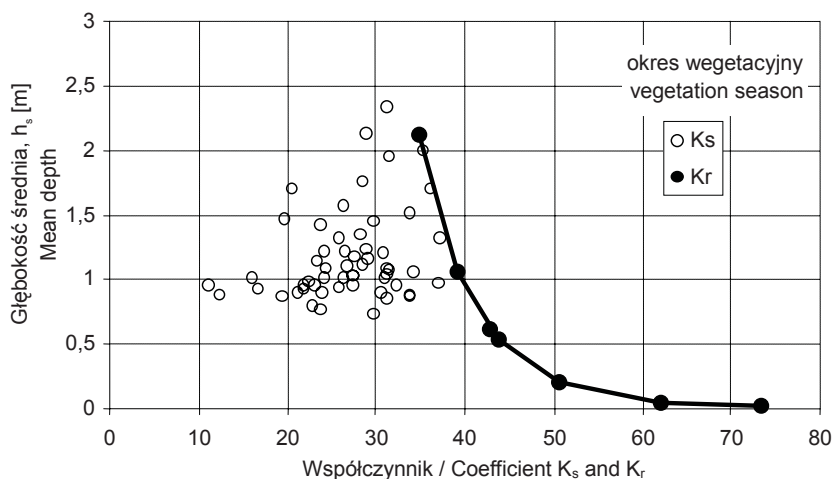
TABELA 1. Początek ruchu i unoszenie materiału dennego w Odrze, przekrój Chałupki
 TABLE 1. Incipient motion and suspension of bed material in Odra River, Chałupki station

Frakcja Fraction [mm]	Zawartość Contents [%]	d_a [mm]	D^* [-]	θ_{cr} [-]	τ_{cr} [Pa]	h_{cr} [m]		h_{susp} [m]
						$I = 0,75\text{‰}$	$I = 0,80\text{‰}$	
0,1–1,0	13	0,55	13	0,031	0,3	0,04	0,04	0,07–0,16
1–2	3	1,5	36	0,037	0,9	0,11	0,10	0,30–0,76
2–8	4	5	120	0,052	4,2	0,54	0,51	1,4–3,3
8–16	35	12	287	0,055	11	1,4	1,3	3,4–7,9
16–32	29	24	571	0,055	21	2,7	2,5	>7
32–64	14	48	1135	0,055	43	5,4	5,1	>13
64–75	2	70	1800	0,055	64	8,2	7,7	>20
d_{50}		14	351	0,055	12	1,6	1,5	>3,5

sezon wegetacyjny (rys. 3) i pozawegetacyjny. Dodatkowo na wykresy te nanie­siono krzywe zmienności współczynnika szorstkości ziarnowej $K_r = 21/d_a^{1/6}$ dla frakcji występujących w składzie ziarnowym. Stwierdzono, że współczynniki K_s w strefie stanów niskich (głębokości h_s rzędu 0,7–1,0 m) zmieniają się w szerokich granicach, od 11 do 37 $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ w okresie wegetacyjnym i od 16 do 39 $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ w okresie pozawegetacyjnym. Współczynnik K_r w tej strefie stanów osiąga wartości rzędu 40–42 $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$.

W strefie stanów średnich i wysokich zakres zmienności współczynnika K_s jest znacznie mniejszy. Przy głębokościach $h_s = 2,0\text{--}2,4$ m współczynniki K_s stabilizują się na poziomie 32 $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ (dla okresu wegetacyjnego) i 27–33 $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ (dla okresu pozawegetacyjnego), natomiast współczynnik K_r jest równy 35 $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wyznaczono również wartości parametru K_s/K_r dla różnych napełnień. Parametr ten występuje we wzorze Meyera-Petera i Müllera (MPM) na transport ru-



RYSUNEK 3. Zmienność współczynnika K_s w okresie wegetacyjnym, rzeka Odra, przekrój Chałupki
 FIGURE 3. Variation of coefficient K_s in vegetation season, Odra River, Chałupki station

mowiska i uwzględnia rzeźbę dna koryta i szorstkość materiału dennego, redukując w ten sposób wartość siły poruszającej (τ_h), która bezpośrednio wpływa na intensywność transportu. Wartości ilorazu K_s/K_r , w zależności od okresu oraz strefy stanów wody w przekroju Chałupki, kształtują się następująco:

- w strefie stanów niskich: w okresie wegetacyjnym od 0,27 do 0,90, a w okresie pozawegetacyjnym od 0,30 do 0,95,
- w strefie stanów średnich: w okresie wegetacyjnym i pozawegetacyjnym od 0,54 do 1,00,
- w strefie stanów wysokich: w okresie wegetacyjnym 0,91, a w okresie pozawegetacyjnym od 0,77 do 0,94.

Obliczenia intensywności transportu rumowiska

Obliczenia intensywności transportu rumowiska unoszonego i wleczonego w Górnej Odrze przeprowadzono dla przekroju Chałupki, w zakresie od przepływów niskich (ok. $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) do powodziowych (rzędu $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Zastosowano formuły: Ackersa-White'a, Einsteina, Engelunda-Hansena, Laursena, MPM, Toffalettiego i Yanga (Yang 1996). Niektóre z tych formuł zostały rozbudowane lub zmodyfikowane przez ich twórców oraz innych badaczy. Modyfikacje te związane są głównie z uziarnieniem występującym we wzorze (charakterystyczna średnica lub rozkład uziarnienia) lub też współczynnikami oporu K_s i K_r (Parzonka i in. 2000; 2002). Dotyczy to m.in. formuły Yanga, który uwzględnił rozkład krzywej uziarnienia (dla piasków, żwirów

oraz mieszanek tych dwóch najczęściej występujących frakcji w korytach rzek aluwialnych), oraz wzoru MPM zmodyfikowanego m.in. przez Bartnika (1992) oraz przez Parzonkę i Kasperka (Parzonka i in. 2002).

Ważnym elementem przy prognozowaniu transportu rumowiska i ocenie procesów erozyjno-sedymentacyjnych w rzece staje się wybór właściwej formuły, umożliwiającej uzyskanie dobrej zgodności obliczeń z pomiarami w terenie. Wybór ten powinien być oparty na dokładnej analizie formuły, a w szczególności – zakresu jej stosowalności. W tabeli 2 autorzy podali wartości parametrów, przy których mogą być stosowane określone formuły.

Formuła Ackersa-White'a służy do obliczania sumarycznego przepływu rumowiska wleczonego i unoszonego, a wzór MPM umożliwia obliczanie natężenia transportu rumowiska wleczonego oraz jego masę w czasie przejścia fali powodziowej. Pozostałe wzory odnoszą się do piasków i drobnych żwirów o maksymalnej średnicy 7 mm. Stwierdzono, że istnieją znaczne różnice w ocenie ilościowej transportu rumowiska (G) w zależności od użytej funkcji. Wartości intensywności transportu rumowiska (G) według Laursena przy niskich przepływach wody $Q = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ były rzędu $0,7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, a według Engelunda-Hansena – $0,06 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Według Yanga dla piasków oraz mieszanki piasków i żwirów intensywność G była równa $0,15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast według pozostałych równań, tj. Ackersa-White'a, Einsteina i Toffalettiego, transport osadów rozpoczyna się przy przepływach Q powyżej $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Podczas przepływów powodziowych różnice w transporcie są znaczne. Przykładowo,

TABELA 2. Wartości parametrów w wybranych formułach na intensywność transportu rumowiska (G)
 TABLE 2. Parameter values in the selected formulas on sediment transport intensity (G)

Funkcja / Function	d [mm]	s [-]	v_{sr} [$m \cdot s^{-1}$]	h_s [m]	I [‰]	B [m]	t [°C]
Ackers-White (LS)	0,04–7,0	1,0–2,7	0,02–2,16	0,003–0,427	0,06–37	0,07–1,22	8–32
Engelund-Hansen (LS)	–	–	0,20–1,93	0,058–0,405	0,055–19	–	7–35
Laursen (FS)	–	–	0,02–2,38	0,204–16,459	0,0021–1,8	19,2–1109	0–35
Laursen (LS)	–	–	0,21–2,87	0,009–1,097	0,25–25	0,08–2,01	8–28
MPM (LS)	0,4–29,0	1,25–4,0	0,64–2,87	0,009–1,189	0,4–20	0,15–2,01	–
Toffaletti (FS)	0,062–4,0	–	0,21–2,38	0,02–17,28 R_h	0,002–1,1	19,2–1109	0–35
Toffaletti (LS)	0,062–4,0	–	0,21–1,92	0,02–0,335 R_h	0,14–19	0,24–2,44	4–35
Yang (piasek/ /sand, FS)	0,15–1,7	–	0,24–1,95	0,01–15,24	0,043–28	0,13–533,4	0–34
Yang (żwir/ /gravel, FS)	2,5–7,0	–	0,43–1,55	0,024–0,22	1,2–29	0,13–533,4	0–34

Oznaczenia / Explanations: d – wielkość ziarna / grain size, s – gęstość względna / relative density, v_{sr} – prędkość średnia / average velocity, h_s – średnia głębokość wody / average water depth, I – spadek zwierciadła wody / slope of the water surface, B – szerokość zwierciadła wody / width of the water surface, t – temperatura wody / water temperature, R_h – promień hydrauliczny / hydraulic radius, LS – pomiar w laboratorium / laboratory study, FS – pomiar w terenie / field study

według funkcji Yanga i Laursena intensywność transportu wynosi 1300–2000 $kg \cdot s^{-1}$, a według funkcji Engelunda-Hansena, Ackersa-White’a, Einsteina i Toffaletiego jest ona znacznie mniejsza, rzędu 50 $kg \cdot s^{-1}$. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeń intensywności transportu (G) w Górnej Odrze za pomocą formuł wybranych w drodze analizy oraz przebieg zmienności (G) w funkcji przepływu wody (Q).

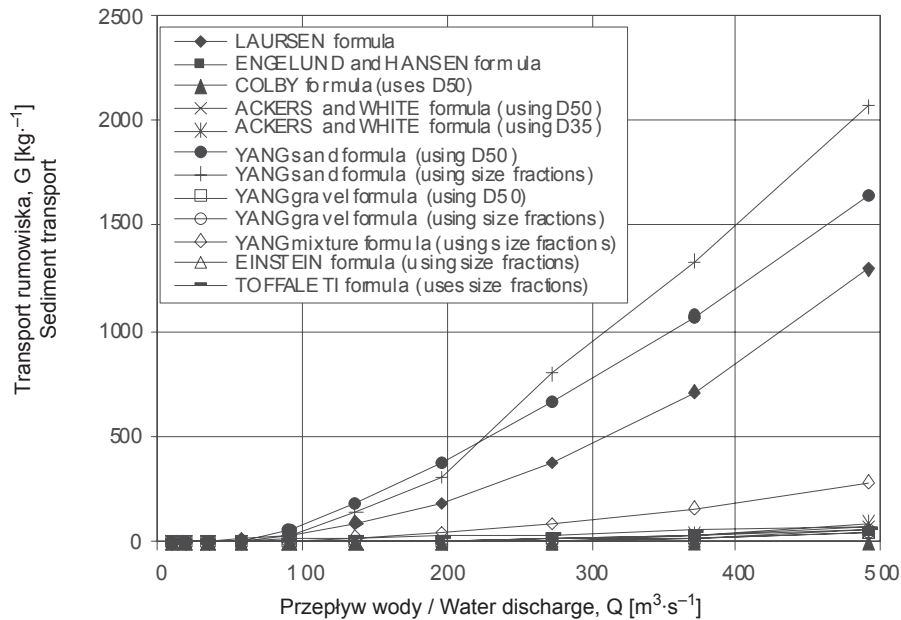
Pomiary obrukowania dna

Podczas przejścia fali wezbraniowej w 1997 roku, która w przekroju Chałupki miała wysokość rzędu 8 m oraz natężenie $Q_{maks} = 2160 m^3 \cdot s^{-1}$, miał miejsce masowy transport rumowiska. Zarówno drobny, jak i gruby materiał został wyerodowany i przetransportowany w dół rzeki. Część tego materiału osadziła się

na wlocie do meandra nr I. Z analizy porównawczej uziarnienia gruntu tworzącego dno rzeki sprzed powodzi 1997 roku i po, wynika, że:

- zawartość piasków zmniejszyła się o 4% (z 16 do 12%),
- zawartość żwirów zmniejszyła się o 21% (z 39 do 18%),
- zawartość otoczków zwiększyła się o 3% (z 45 do 48%),
- zawartość głazów (skał) wynosi 22%.

Wskutek katastrofalnej powodzi w 1997 roku oraz mniejszych w 2001, 2002, 2005, 2006 i 2007 roku nastąpiło zintensyfikowanie procesu obrukowania dna w rejonie meandra nr I. Badania autorów z lat 2005–2007 wskazują na znaczne jego pogrubienie w stosunku do okresu sprzed powodzi 1997 roku oraz wytworzenie pokrywy (rys. 5) o grubości dochodzącej do 10 cm ($d_{50\%} = 4,7$ cm, $d_{95\%} = 9,4$ cm). Rumowisko denne pobierano metodą zamrażania do głębokości 40 cm.



RYSUNEK 4. Zdolność transportowa rumowiska (G) w funkcji przepływu wody (Q), przekrój Chałupki
 FIGURE 4. Sediment transport rate (G) in function of water discharge (Q), Chałupki station

Stwierdzono, że pod pokrywą znajduje się drobniejszy materiał o następującej wielkości ziaren (rys. 5):

- $d_{50\%} = 4,1$ cm i $d_{95\%} = 7,3$ cm w warstwie na głębokości 10–20 cm,
- $d_{50\%} = 2,3$ –2,8 cm i $d_{95\%} = 6,0$ –6,2 cm w warstwie na głębokości 20–40 cm.

Wnioski

Na odcinku granicznej Odry, między Chałupkami a ujściem Olzy, występuje podczas przepływów średnich i wysokich (powodziowych) masowy transport materiału dennego. Intensywność transportu rumowiska (G), obliczona na podstawie wybranych formuł, zmienia się w szerokich granicach. Zdaniem autorów, wyniki najbardziej zbliżone do pomiarów w Odrze daje formuła Yanga (dla mieszanki piasku i żwiru) i wzór MPM.

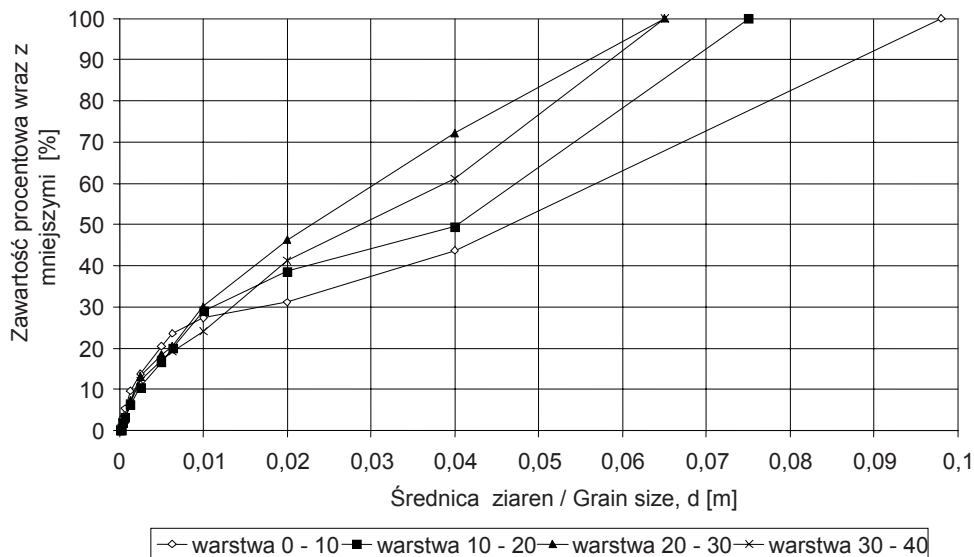
Intensywność G wynosi $0,2$ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ przy przepływach niskich rzędu $Q = 10$ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ oraz odpowiednio 10 i 284 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ przy przepływach średnich i wysokich.

Na wlocie do meandra nr I powstało opancerzenie dna rzeki o wielkości ziaren dochodzących do 10 cm, które chroni koryto przed dalszą degradacją.

Analiza współczynników oporu wykazała, że parametr K_s/K_r zmienia się w zakresie od 0,30 do 0,94, co powoduje redukcję wartości siły poruszającej nawet o 80%.

Literatura

BARTNIK W. 1992: Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego. Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe AR Kraków 171.



RYSUNEK 5. Uziarnienie pokrywy i podłoża w korycie rzeki Odry, przekrój Chałupki
 FIGURE 5. Grain size distribution of cover and of subsoil in Odra River-bed, Chałupki station

KASPEREK R. 1999: Ocena tworzenia się obrukowania dna rzeki na przykładzie środkowej Odry. Rozprawa doktorska. AR Wrocław.

PARZONKA W. 2002: Opinia dotycząca opracowania pt. Studium transportu rumowiska, procesów erozyjnych i sedymentacyjnych w czesko-polskim odcinku Odry (km 3,930–3,978), Brno 2002. Maszynopis. Wrocław.

PARZONKA W., GŁOWSKI R., KASPEREK R., PAQUIER A., RAMEZ P. 2000: Analysis of flow resistance variation in rivers with sediment movement. 10th Inter. Conf. on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Wrocław: 511–521.

PARZONKA W., BARTNIK W., KASPEREK R. 2002: Modelowanie transportu rumowiska wlezonego w korytach rzek z dnem aluwialnym na przykładzie górnej i środkowej Odry. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 2(25): 70–79.

van RIJN L.C. 1993: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam.

YANG C.T. 1996: Sediment transport. Theory and practice. McGraw-Hill.

ZIELIŃSKI T. 2002: Prognoza ewolucji koryta Odry między Bohuminem a ujściem Olzy. Maszynopis, Sosnowiec.

Summary

Sediment transport and measuring river-bed armoring of upper Odra River in the region of border meanders. On the border sector of Odra River between Chałupki town and Olza mouth unique meanders occur, with dynamic river-bed processes. As a result of the 1997-flood, the meander no. I was broken and the river route has been shorted. The authors sampled sediments from Odra river and evaluated incipient motion and suspension. At present, river-bed at entry to meander no I is armored. The resistance coefficients K_s i K_r and the bed load transport rate at Chałupki station have been estimated.

Authors' address:

Robert Kasperek, Włodzimierz Parzonka
 Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
 Instytut Inżynierii Środowiska
 pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
 Poland
 e-mail: kasp@iis.ar.wroc.pl