

Michał WIERZBICKI, Mateusz HÄMMERLING,

Bogusław PRZEDWOJSKI

Katedra Budownictwa Wodnego, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Department of Hydraulic Engineering, University of Life Sciences in Poznań

Przebieg procesu erozji poniżej zbiornika Jeziorsko na rzece Warcie

The erosion process downstream the Jeziorsko reservoir on the Warta River

Słowa kluczowe: erozja rzeczna, zbiornik, przepływ wody, rumowisko rzeczne

Key words: river erosion, water reservoir, water flow, river bed material

Wprowadzenie

Przegrodzenie rzeki budowlą piętrzącą ma ogromny wpływ na kształtowanie się koryta zarówno powyżej, jak i poniżej tej budowli. Ważnym zjawiskiem jest proces erozji występujący poniżej budowli piętrzącej. Ma on charakter trwały i w miarę upływu czasu obejmuje swym zasięgiem coraz dłuższy odcinek rzeki. Proces erozji powoduje powstanie wyboju miejscowego bezpośrednio poniżej wypadu z urządzeń upustowych, a także systematyczne obniżanie się poziomu dna na coraz dłuższym odcinku rzeki (Babiński 1997, Głowski i Parzonka 2007). Zmiany te uwidaczniają się w przeobrażeniach układu dna koryta zarówno w profilu podłużnym,

jak i w przekrojach poprzecznych. Obniżanie się dna w profilu podłużnym skutkuje obniżeniem poziomu zwierciadła wody w rzece i wody gruntowej w dolinie. Proces erozji prowadzi również do wzrostu średnic materiału dennego, tworząc obrukowanie dna.

Hydrologia rzeki Warty oraz gospodarka wodna na zbiorniku Jeziorsko

Zbiornik Jeziorsko zlokalizowany jest na rzece Warcie od km 484+090 (zapora czołowa) do km 503+655 (most drogowy w miejscowości Warta). Pierwsze roboty przy budowie zbiornika wykonano w 1975 roku. Rzekę przegrodzono w 1983 roku. Zbiornik został wstępnie napełniony i oddany do eksploatacji w 1986 roku, natomiast pełny zakres piętrzenia i gospodarki wodnej podjęto w 1992 roku. Całkowite zakończenie

inwestycji nastąpiło w 1995 roku po wybudowaniu elektrowni wodnej. Powierzchnia zlewni rzeki Warty w przekroju zapory zbiornika wynosi 9021,8 km². W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę hydrologiczną zlewni rzeki Warty w przekroju wodowskazowym Sieradz (km 521).

Zbiornik Jeziorsko pracuje według rocznego planu gospodarowania wodą. Normalny poziom wody w zbiorniku wynosi 120,5 m n.p.m., maksymalny 122,00 m n.p.m., a minimalny 116 m n.p.m. W tabeli 2 przedstawiono plan gospodarki wodnej na zbiorniku.

Proces erozji poniżej zbiornika Jeziorsko

Metodyka pomiarów

W celu oceny procesu erozji na odcinku rzeki Warty poniżej zbiornika Jeziorsko wykonano pomiary układu zwierciadła wody, pomiary przekrojów poprzecznych oraz rumowiska dennego. Danymi z pomiarów przed wystąpieniem procesu erozji, wywołanym przegrodzeniem koryta Warty, są dane z 1975 roku. Natomiast po przegrodzeniu koryta Warty w 1983 roku pomiary terenowe roz-

TABELA 1. Przepływy charakterystyczne w przekroju wodowskazowym Sieradz

TABLE 1. Characteristic water discharge in gaging station Sieradz

Przepływ charakterystyczny Characteristic water discharge	Oznaczenie Signification	Nateżenie przepływu wody Water discharge [m ³ ·s ⁻¹]
Przepływ najwyższy z maksymalnych rocznych Maximum annual discharge	WWQ	397,5
Przepływ średni z maksymalnych rocznych Average of maximal annual discharge	SWQ	174,5
Przepływ średni ze średnich rocznych Average discharge	SSQ	48,9
Przepływ średni z minimalnych rocznych Average of minimal annual discharge	SNQ	19,7
Przepływ najniższy z minimalnych rocznych Minimum annual discharge	NNQ	10,5

TABELA 2. Gospodarka wodna na zbiorniku Jeziorsko

TABLE 2. Water management in Jeziorsko reservoir

Okres Period	Rzędna [m n.p.m.] Water level	Powierzchnia zwierciadła wody zbiornika [km ²] Water surface of reservoir	Objętość zbiornika [mln m ³] Capacity of reservoir
16 kwietnia – 30 czerwca	120,5	39,00	162,50
1 lipca – 30 listopada	120,5–116,0	39,00–17,60	162,50–30,20
1 grudnia – 31 stycznia	116,0	17,60	30,20
1 lutego – 15 kwietnia	116,0–120,5	17,60–39,00	30,20–162,50

poczęto w 1987 roku. Kontynuowano je w latach 1989, 1992, 1997, 2001, 2004, 2006, 2007 (Przedwojski i in. 1989, 2004, 2007). W latach 2006, 2007 pomiary uzupełniono o przekroje na odcinku wybudowanych w 2005 roku progów stabilizujących: próg nr 3 (km 480+870) i próg nr 4 (km 479+200).

Zmiany poziomu dna (1975–2007)

Z pomiarów terenowych przeprowadzonych w latach 1989–2007 wynika, że spadki podłużne zwierciadła wody są zmienne na długości. W tabeli 3 zestawiono spadki podłużne zwierciadła wody przy ustalonym przepływie na odcinku od zapory zbiornika do Uniejowa.

Zanotowany podczas pomiarów w 1975 roku podłużny spadek zwierciadła wody na odcinku od zapory zbiornika Jeziorsko (km 484+000) do wodowskazu Uniejów wynosił $I = 0,416\%$. Z danych tych wynika, że na odcinku około 10 km poniżej zbiornika wodnego nastąpiło prawie dwukrotne zmniejszenie spadku podłużnego zwierciadła wody przy prze-

pływie $Q = 33,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, spowodowane procesem erozji podłużnej w okresie 24 lat (od 1983 do 2007 roku).

W tabeli 4 zestawiono pomierzone w latach 1975–2007 uśrednione w przekrojach poprzecznych rzędne dna. Na rysunku 1 przedstawiono układ dna oraz zwierciadła wody w profilu podłużnym, zanotowany podczas pomiarów w latach 1975–2007. Układ dna wykreślono na podstawie uśrednionych rzędnych dna w kolejnych przekrojach poprzecznych. Rzędne zwierciadła wody zostały pomierzone przy ustalonym przepływie.

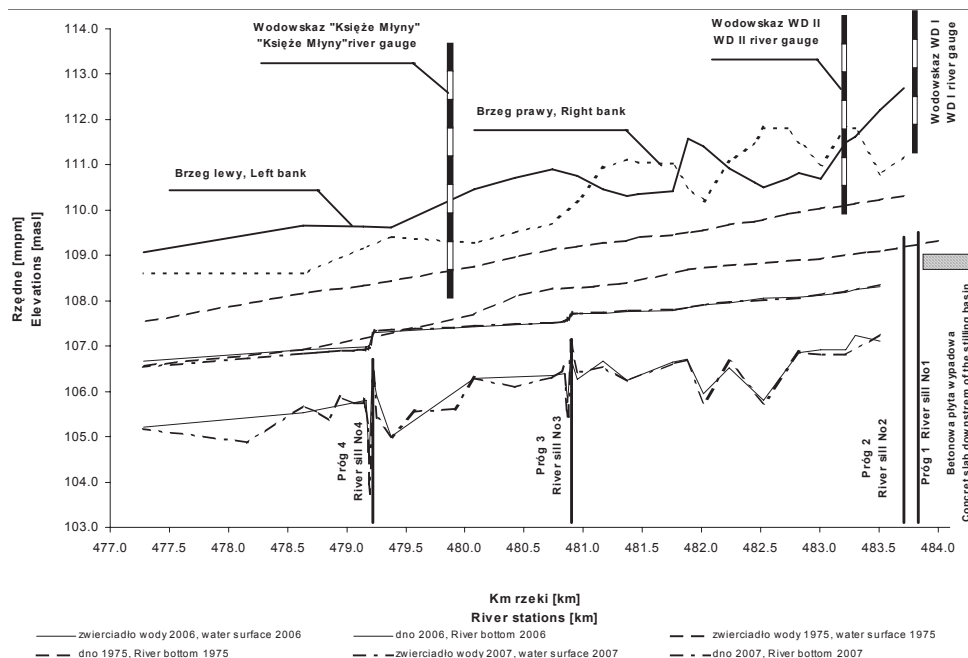
Z analizy danych pomiarowych umieszczonych w tabeli 4 i na rysunku 1 wynika, że w okresie 18 lat, od 1989 do 2007 roku, nastąpiła silna erozja wgłębna. Na odcinku od stanowiska dolnego progę nr II, czyli od km 483+608, do km 480+080 uśredniony w przekroju poprzecznym poziom dna obniżył się od 2,57 m w przekroju P7/3 (km 482+525) do 1,22 m w przekroju P5 (km 483+514). Obniżanie się poziomu dna koryta rzeki Warty spowodowało obniżenie poziomu

TABELA 3. Spadki podłużne zwierciadła wody rzeki Warty przy ustalonym przepływie
TABLE 3. Water surface slopes in Warta River for stable discharge

Odcinek River section	Spadek podłużny zwierciadła wody [%] Water surface slope					
	17.07.1975 r. $Q = 33$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	27.06.1989 r. $Q = 33$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12.09.1997 r. $Q = 31,5$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12.07.2004 r. $Q = 32,5$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12.06.2006 r. $Q = 33$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	18.06.2007 r. $Q = 33$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
483+514	0,428	0,256	0,300	0,304	0,238	0,242
480+912				0,248		
480+842				0,149		
479+235	0,363	0,335	0,196	0,143	0,239	0,227
479+172				0,260		
474+530	–	–	–	0,260	0,371	0,360
474+530				0,364		
465+850				0,371		

TABELA 4. Rzędne dna w przekrojach poprzecznych rzeki Warty
 TABLE 4. River bottom levels in Warta River sections

Numer przekroju No cross section	km	Rzędne dna w przekrojach poprzecznych [m n.p.m.] River bottom levels in cross sections							
		27.06.1989 r. $\bar{Q} = 33,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3.06.1995 r. $\bar{Q} = 31,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12.09.1997 r. $\bar{Q} = 31,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12.07.2004 r. $\bar{Q} = 32,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12.06.2006 r. $\bar{Q} = 33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	18.06.2007 r. $\bar{Q} = 33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
P3	483,830	108,04	-	-	-	-	-	-	-
P3/1	483,740	-	-	107,08	-	-	-	-	-
P4/	483,657	-	106,81	107,49	106,37	-	-	-	-
P5	483,514	108,47	108,01	107,53	106,92	107,11	107,25	107,25	107,25
P5/1	483,220	108,33	-	108,40	106,52	106,91	106,81	106,81	106,81
P6	483,012	108,10	107,64	107,47	107,11	106,93	106,82	106,82	106,82
P7	482,821	108,24	107,88	107,77	107,02	106,85	106,85	106,85	106,85
P7/1	482,723	108,40	107,74	107,71	107,00	-	-	-	-
P7/2	482,606	108,98	107,30	107,42	106,65	-	-	-	-
P7/3	482,525	108,31	106,89	107,51	106,44	105,80	105,74	105,74	105,74
P7/4	482,450	108,28	107,79	107,33	106,83	-	-	-	-
P8	482,136	108,09	107,69	107,48	106,65	-	-	-	-
P8/4	481,369	-	107,32	106,95	-	-	-	-	-
P9	481,314	107,90	-	106,95	-	-	-	-	-
P10	480,740	107,86	-	107,37	106,49	106,35	106,31	106,31	106,31
P11	480,080	107,71	-	107,05	106,35	106,28	106,28	106,28	106,28
P12	479,400	107,30	-	105,55	-	-	-	-	-
P12/3	479,092	-	-	106,13	-	-	-	-	-
P13	478,630	-	-	-	105,96	105,53	105,67	105,67	105,67
P17	470,140	-	-	-	103,14	103,12	103,08	103,08	103,08
P19	467,170	-	-	-	102,37	102,37	102,23	102,23	102,23
Uniejów	465,850	-	-	-	101,52	101,51	101,59	101,59	101,59



RYSUNEK 1. Zmiany poziomów dna i zwierciadła wody koryta rzeki Warty poniżej zbiornika Jeziorsko

FIGURE 1. Changes of bottom levels and water surface levels in Warta River downstream of the Jeziorsko reservoir

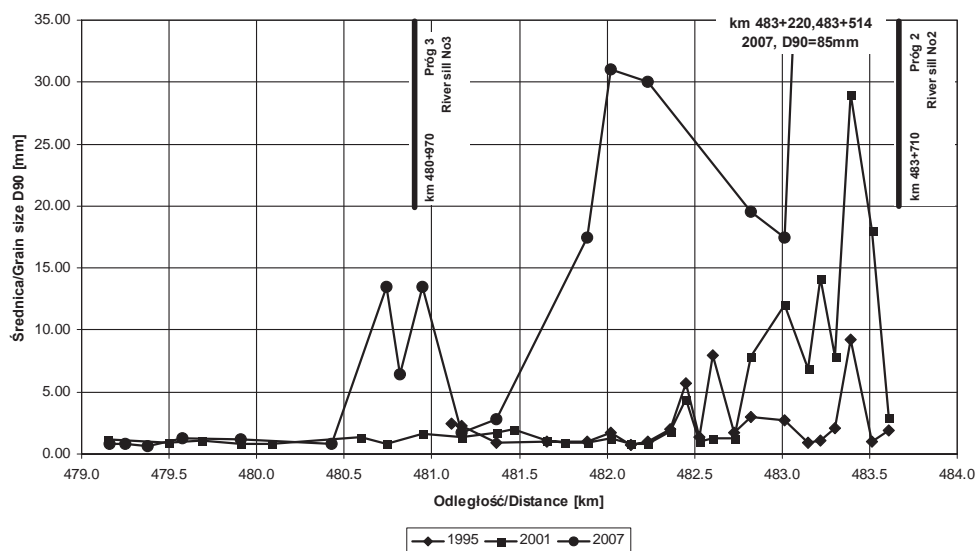
zwierciadła wody poniżej zbiornika Jeziorsko. Porównując układ zwierciadła wody przed wybudowaniem i po wybudowaniu zbiornika retencyjnego, czyli w latach 1975–2007, najbardziej obniżyło się ono w przekroju P5 (km 483+514) – o 1,90 m, a najmniej w przekroju P11 (km 480+080) – o 1,32 m (Przedwojski i in. 2006, 2007).

Zmiany uziarnienia materiału dennego

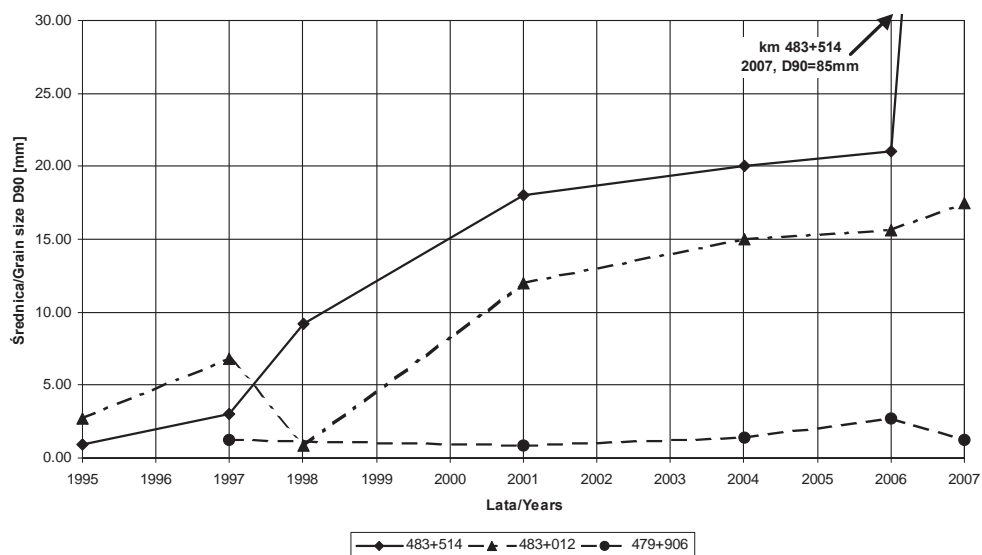
Na podstawie pomiarów terenowych wykonanych w latach 1995–2007 określono skład granulometryczny rumowiska w poszczególnych przekrojach. Zmiany w latach 1995–2007 w przekrojach poprzecznych w km 483+514 (576 m po-

niżej zapory, 196 m poniżej progu II, w km 483+012, w km 479+906) wielkości średnicy charakterystycznej D90 przedstawiono na rysunku 2, średnicy charakterystycznej D50 – na rysunku 3, natomiast zmiany wielkości średnicy charakterystycznej D90 na odcinku od km 483+514 do km 479+148 – na rysunku 4.

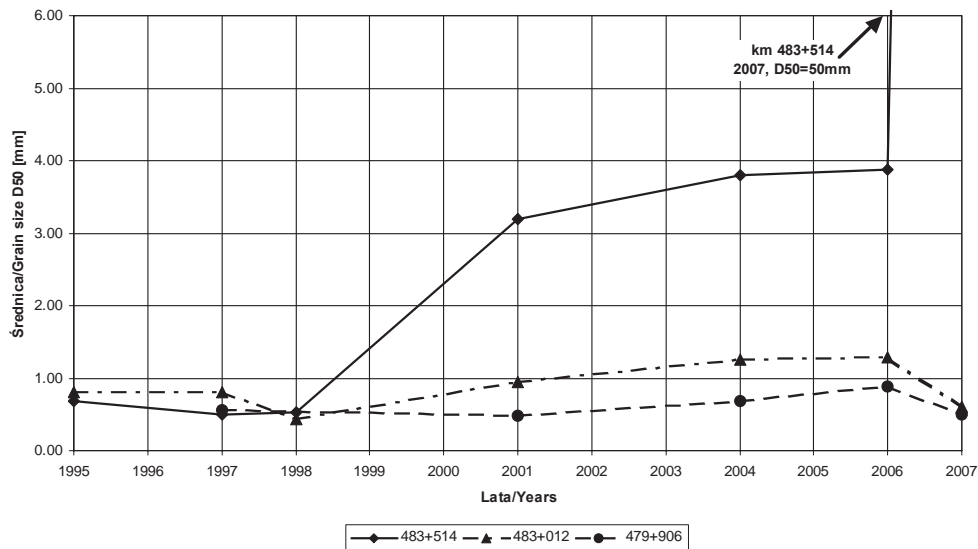
Analiza przedstawionych wyników wskazuje, że na badanym odcinku rzeki Warty – poniżej zbiornika Jeziorsko występuje zmienny, lecz systematyczny wzrost średnic rumowiska dennego, wynikający z postępującego procesu erozji. To właśnie ten proces jest decydującym czynnikiem wpływającym na zmianę uziarnienia rumowiska dennego w korycie. Wody wypływające ze zbiornika



RYSUNEK 2. Zmiany wielkości średnicy ziarna D90 na odcinku od km 438+514 do km 479+148 w latach 1995–2007
 FIGURE 2. Changes of grain size D90 in river section from 483+514 km to 479+148 km in years 1995–2007



RYSUNEK 3. Zmiany wielkości średnicy ziarna D90 w wybranych przekrojach w latach 1995–2007
 FIGURE 3. Changes of grain size D90 in chosen cross sections in years 1995–2007



RYSUNEK 4. Zmiany wielkości średnicy ziarna D50 w wybranych przekrojach w latach 1995–2007
 FIGURE 4. Changes of grain size D50 in chosen cross sections in years 1995–2007

usuwają drobniejszy materiał, powodując wzrost średnic charakterystycznych w przekrojach (rys. 3 i 4). Wielkość oraz zmienność średnicy rumowiska dennego jest większa na odcinku bezpośrednio poniżej zapory (odcinek około 3 km do lokalizacji progu nr 3 w km 480+970). Na dalszym odcinku rzeki różnice średnic rumowiska dennego są mniejsze w odniesieniu do poszczególnych przekrojów oraz lat i charakteryzują się mniejszą zmiennością. Wyjątek stanowi zmniejszenie średnic rumowiska dennego w 1998 roku. Jest ono najprawdopodobniej wynikiem zerwania obrukowania dna, spowodowanego wezbraniem podczas powodzi w lipcu 1997 roku. W późniejszych latach proces erozji dennej pociągnął za sobą usunięcie materiału drobniejszego i ponowny wzrost średnic rumowiska dennego charakterystyczny dla obrukowania dna obserwowanego również na innych rzekach nizinnych, na przykład na Odrze (Bartnik i in. 2006).

Zmiany wielkości średnicy rumowiska dennego w korycie rzeki Warty poniżej zbiornika Jeziorsko świadczą o postępującym procesie erozji w czasie (kolejne lata, rys. 2) i w przestrzeni (kolejne przekroje, rys. 3 i 4).

Progi stabilizujące (2006/2007)

W celu zmniejszenia erozji podłużnej poniżej zbiornika Jeziorsko w 2005 roku wybudowano dwa progi stabilizujące, które zostały zlokalizowane w następujących przekrojach: oś progu nr 3 zaprojektowano w km 480+870 (rys. 1), oś progu nr 4 w km 479+200 (rys. 1). Długość progów w osi koryta rzeki wynosi 35 m. Progi zostały wykonane z materacy faszynowo-kamiennych o grubości 0,60 i 0,30 m, które zostały ułożone na geosiatce i włókninie filtracyjnej.

Analiza wyników pomiarów terenowych wykonanych w czerwcu 2006

roku i czerwcu 2007 roku wykazała, że wybudowanie w 2005 roku progów stabilizujących spowodowało ograniczenie procesu erozji koryta rzeki Warty od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do miejscowości Księża Młyny. Uśredniony poziom dna rzeki od progów nr 2 (km 483+710) do nr 4 (km 479+200) w okresie pomiędzy czerwcem 2006 roku a czerwcem 2007 roku nie uległ zmianie (tab. 4, rys. 1). Pomierzony w dniach 18–22.06.2007 roku i odniesiony do przepływu $Q = 33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ poziom zwierciadła wody powyżej progów stabilizujących nr 3 i 4 układał się od kilku do kilkunastu centymetrów powyżej rzędnych zwierciadła wody zanotowanych w 2004 roku. Wykonanie progów nr 3 i 4 ustabilizowało poziom zwierciadła wody w strefie stanów średnich i niskich na odcinku od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do miejscowości Księża Młyny.

Pomiary terenowe wskazały jednak, że poniżej progów nr 4, na odcinku długości około 7,0 km, tj. od przekroju P-12/3 w km 479+092 do przekroju P-16 w km 472+190, występuje erozja wgłębna, która w okresie 1 roku (od czerwca 2006 r. do czerwca 2007 r.) wynosiła od 0,05 do 0,11 m. Spowodowała ona obniżenie poziomu zwierciadła wody od 0,04 do 0,11 m (rys. 1). Po dwuletnim okresie eksploatacji poniżej progów stabilizujących powstały wyboje lokalne (rys. 1) charakterystyczne dla stanowiska dolnego budowli piętrzących (Parzonka 1991). Maksymalna głębokość wybojów, pomierzona przy przepływie $Q = 33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, wynosi od 4,85 do 5,05 m. W drugim roku eksploatacji maksymalna głębokość wybojów zwiększyła się o 0,75–0,55 m, jednakże wymiary wybojów w układzie poziomym nie uległy

istotnej zmianie. Porównanie spadków podłużnych zwierciadła wody przy przepływie $Q = 33,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ z wynikami pomiarów z czerwca 2006 roku ($Q = 33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) wykazuje, że pomierzone wartości spadków zwierciadła wody nie uległy zmianie (tab. 3). Świadczy to o tym, iż wybudowanie progów nr 3 i 4 spowodowało ustabilizowanie układu zwierciadła wody.

Wnioski

Przeprowadzone badania procesu erozji odcinka rzeki Warty poniżej zbiornika wodnego Jeziorsko pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przegrodzenie koryta rzeki Warty zaporą czołową zbiornika Jeziorsko spowodowało wystąpienie intensywnego procesu erozji w korycie rzeki.
2. Z danych pomiarowych wynika, że na odcinku około 10 km poniżej zbiornika wodnego nastąpiło prawie dwukrotne zmniejszenie spadku podłużnego zwierciadła wody przy przepływie $Q = 33,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, spowodowane procesem erozji podłużnej w okresie 24 lat (od 1983 do 2007 roku).
3. Z analizy danych pomiarowych wynika, że w okresie 18 lat (1989–2007) nastąpiła silna erozja wgłębna. Na odcinku od km 483+608 do km 480+080 uśredniony w przekroju poprzecznym poziom dna obniżył się od 2,57 do 1,22 m.
4. Proces obniżania poziomu dna ciąga za sobą obniżanie poziomu zwierciadła wody. W latach 1975–2007 najbardziej obniżyło się ono

- w km 483+514 o 1,90 m. Obecnie na odcinku bezpośrednio poniżej zapory poziom zwierciadła wody przy przepływie średnim $33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ znajduje się niżej niż poziom dna w 1975 roku.
5. Na badanym odcinku rzeki Warty poniżej zbiornika Jeziorsko występuje zmienny, lecz systematyczny wzrost średnic rumowiska dennego, wynikający z postępującego procesu erozji. Wielkość oraz zmienność średnicy rumowiska dennego jest większa na odcinku bezpośrednio poniżej zapory.
 6. Wybudowanie w 2005 roku progów stabilizujących spowodowało ograniczenie procesu erozji koryta rzeki Warty na odcinku 4,7 km od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do km 479+376. Wykonanie progów nr 3 i 4 ustabilizowało poziom zwierciadła wody w strefie stanów średnich i niskich, spowodowało jednakże powstanie lokalnych wybojów bezpośrednio poniżej tych budowli.

Literatura

- BABIŃSKI Z. 1997: Procesy erozyjno-akumulacyjne poniżej stopnia wodnego Włocławek, ich konsekwencje i wpływ na morfodynamikę planowanego zbiornika Nieszawa. IGiPZ PAN, Toruń.
- BARTNIK W., GŁOWSKIR., KASPEREK R., JAGOSZ R., PARZONKA W., STRÓŻYŃSKI A. 2006: Procesy erozyjne w korycie Odry na granicznym polsko-czeskim odcinku rzeki. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Inżynieria Środowiska XV*, 534.
- GŁOWSKI R., PARZONKA W. 2007: Eksploatacja i oddziaływanie zbiornika Brzeg Dolny na rzece Odrze. *Nauka, Przyroda, Technologia 1, 2, Melioracje i Inżynieria Środowiska*: 219–227.
- PARZONKA W. 1991: Erozja, transport i sedymentacja rumowiska w rzekach. Materiały XI Szkoły Hydrauliki „Współczesne problemy hydrauliki wód śródlądowych”. IBW PAN, Gdańsk.
- PRZEDWOJSKI B., WIERZBICKI M. 2006: Skutki działania progów stabilizujących w korycie rzeki Warty poniżej zbiornika Jeziorsko. *Nauka, Przyroda, Technologia 1, 2, Melioracje i Inżynieria Środowiska*: 219–227.
- PRZEDWOJSKI B., NOWAK J., WOJCIECHOWSKA A., MARCINIAK B. 1989: Badania zmian w dolinie i korycie rz. Warty poniżej zbiornika Jeziorsko. Zadanie nr 1. Prognoza obniżania się dna koryta rz. Warty poniżej zbiornika Jeziorsko. Cz. 2. Skutki erozji w korycie. Krzywa natężenia przepływu dolnego stanowiska. Maszynopis. Poznań.
- PRZEDWOJSKI B., WICHER-DYSARZ J., WIERZBICKI M. 2004: Badania erozji koryta rzeki Warty w aspekcie zabezpieczenia minimalnych poziomów wody na stanowisku dolnym elektrowni wodnych Jeziorsko. Cz. 1. Ocena skutków procesu erozji koryta. Maszynopis. Poznań.
- PRZEDWOJSKI B., WICHER-DYSARZ J., WIERZBICKI M., DYSARZ T. 2006: The analysis of factors inducing and inhibiting morphological changes of the Warta River reach downstream of the Jeziorsko reservoir. *Proceeding Third International Conference on Scour and Erosion*. Amsterdam: 539–546.
- PRZEDWOJSKI B., WIERZBICKI M., HÄMMERLING M. 2007: Ocena stanu technicznego oraz skutków działania progów stabilizujących w korycie rzeki Warty poniżej E.W. Jeziorsko, po dwuletnim okresie eksploatacji, próg nr 3 w km 80+870, próg nr 4 w km 479+200. Maszynopis. Poznań.

Summary

The erosion process downstream the Jeziorsko reservoir on the Warta River. This paper is devoted to the erosion process downstream the Jeziorsko reservoir on Warta river. It presents a short characteristic of Jeziorsko reservoir and water management

and also hydrologic characteristic of Warta River. Results of measurements in situ in the period 1975–2007 are presented. River bottom levels and water levels in cross sections were measured. The characteristic of river bottom material is presented. Results of measurements before the construction of the reservoir are compared with of investigations results during reservoir operating time. The erosion process downstream the Jeziorsko reservoir causes the decrease of bottom and water levels in Warta River. The grain size of the river bed material increase because of the

erosion process. To counteract the erosion process two sills were designed and realized. The impact of sills on of erosion process conditions in Warta River bed is presented in this article.

Authors' address:

Michał Wierzbicki, Mateusz Hämmerling, Bogusław Przedwojski
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Katedra Budownictwa Wodnego
ul. Piątkowska 94A, 60-649 Poznań