

ZYGMUNT BABIŃSKI

Instytut Geografii
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

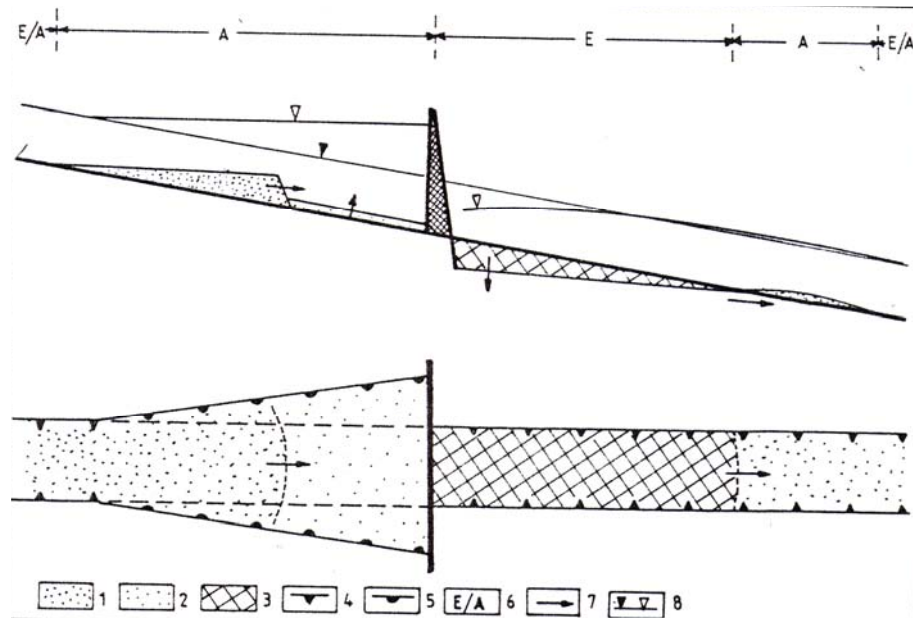
EROZJA WGLĘBNA PONIŻEJ ZBIORNIKÓW WODNYCH NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH ZAPÓR ŚWIATA

Streszczenie. Na podstawie literatury scharakteryzowano jedno z najniebezpieczniejszych zjawisk, często zagrażających istnieniu zapór, zachodzących poniżej zbiorników zaporowych – proces erozji wgłębnej. Określono przyczyny erozji wgłębnej oraz jej rozwój w czasie i przestrzeni, charakteryzowany wielkością obniżania się dna koryta i tempem przemieszczania się czoła strefy erozyjnej. Na tym tle umieszczono wyniki badań procesów erozyjnych poniżej zapory na Wiśle we Włocławku, która podlega podmyciu, grożąc przerwaniem.

Słowa kluczowe: zapory, zbiorniki wodne, erozja wgłębna, tempo przemieszczania strefy erozyjnej, procesy korytowe

Wprowadzenie

Od prawie 5000 lat można mówić o wpływie człowieka na przekształcenia den dolin rzecznych w wyniku budowy zbiorników retencyjnych. Szczególnego tempa proces ten nabrał w latach siedemdziesiątych XX wieku. Szacuje się, że obecnie na całym świecie funkcjonuje ponad 60 tys. zbiorników. Ponadto uważa się, że prawie 77% całkowitego przepływu 139 największych rzek Ameryki Północnej, Europy i Rosji (w dawnych granicach ZSRR) jest pod wpływem pojedynczych zbiorników bądź kaskad. Świadczy to o skali zmian procesów rzecznych, w tym głównie przejścia procesów korytowych w jeziorne wraz z konsekwencjami przemian środowiska przyrodniczego i gospodarczego. Szczególnego znaczenia nabierają tu procesy: sedymentacyjny w zbiornikach i erozyjny (erozyjno-akumulacyjny) poniżej zapór (rys. 1). Charakterystykę procesu erozji wgłębnej poniżej zapór – na przykładzie ponad 150 odcinków rzek na świecie, z uwzględnieniem tamy na Wiśle we Włocławku – przedstawiono na podstawie literatury w rozprawie BABIŃSKIEGO (2002), której wybrane i uzupełnione fragmenty składają się na treść niniejszego artykułu.



Rys. 1. Wpływ stopnia wodnego na procesy korytowe rzeki aluwialnej: 1 – strefa akumulacji rumowiska wlezonego, 2 – strefa akumulacji rumowiska unoszonego, 3 – strefa erozyjna, 4 – erozja boczna, 5 – abrazja, 6 – odcinki o różnym stopniu rozwoju procesu korytowego (E/A – erozyjno-akumulacyjny (transport), A – akumulacyjny, E – erozyjny), 7 – kierunki rozwoju procesu korytowego, 8 – zwierciadło wody przed i po wybudowaniu stopnia wodnego

Fig. 1. Influence of the reservoir on fluvial processes in alluvial river: 1 – zone of bed load accumulation, 2 – zone of suspended load accumulation, 3 – erosional zone, 4 – side erosion, 5 – abrasion, 6 – segments of different degree of channel development (E/A – transit, A – accumulation, E – erosion), 7 – direction of fluvial processes, 8 – water level before and after dam construction

Powszechnie uważa się, że erozja wgłębna poniżej zbiorników wodnych jest zjawiskiem tak oczywistym, że podczas każdego projektowania zapór na rzekach uwzględnia się zabezpieczenie dna przed jej wpływem. Ponadto twierdzi się, na podstawie dotychczasowych doświadczeń, że proces ten tak długo jest całkowicie ignorowany, jak długo nie stwarza konkretnych problemów. W tym sensie problem dotyczy przede wszystkim tych odcinków koryt rzecznych poniżej zapór, które są położone z dala od człowieka i nie mają istotnego, negatywnego, wpływu na jego gospodarkę.

Decydującym czynnikiem wyzwalającym proces erozji wgłębnej poniżej zapory jest pozbawienie wypływających ze zbiornika wód rumowiska klastycznego, tj. wlezonego i unoszonego (rys. 1). Badania wykazały, że zbiorniki retencyjne są łapaczką od 80 do 99,5% materiału klastycznego. W górnej czaszy Zbiornika Włocławskiego w całości jest akumulowane rumowisko wlezione (100%), natomiast w dolnej czaszy zbiera się rumowisko zwieszane w ponad 41%, czyli przeciętnie około 90% rumowiska klastycznego. Zakumulowany w zbiorniku materiał jest uzupełniany na drodze erozji dna i brzegów koryta w dole rzeki. Do wzrostu erozji przyczyniają się dobowe wahania stanów wody,

związane z pracą hydroelektrowni. W wypadku stopnia we Włocławku w początkowych latach jego działalności dochodziły one do 3 m (BABIŃSKI 1982), natomiast na Włodze poniżej zapory w Saratowie – do 4,6 m, a na rzece Kamie poniżej Zbiornika Wotkińskiego – nawet do 5-6 m (BERKOVICH 1992). Wahania stanów wody poniżej wielu hydroelektrowni na świecie są odczuwalne na odcinkach o długości przekraczających 200 km w dół rzeki, najczęściej w granicach 100 km.

Proces erozji wgłębnej

Rozwój procesu erozji wgłębnej poniżej zapór najczęściej jest charakteryzowany przez tempo obniżania się dna koryta i przemieszczanie się czoła strefy erozyjnej w dół rzeki (rys. 1). Uważa się, że w obydwu przypadkach mamy do czynienia z ogólną tendencją do ich wygasania w czasie. Jednak bardziej szczegółowa analiza pozwala sądzić, że proces jest bardziej złożony. Stwierdzono bowiem, że po okresie szybkich przekształceń koryta w czasie budowy stopni następuje częściowe zahamowanie erozji wgłębnej jako wynik napełniania zbiorników wodą. Dopiero po tym okresie, trwającym od kilku miesięcy do kilku lat, proces uaktywnia się ponownie. Z czasem coraz bardziej jest modyfikowany przez warunki geologiczne dna koryta (ograniczenia), lokalną sieć hydrograficzną i morfologię terenu, a także działalność gospodarczą człowieka.

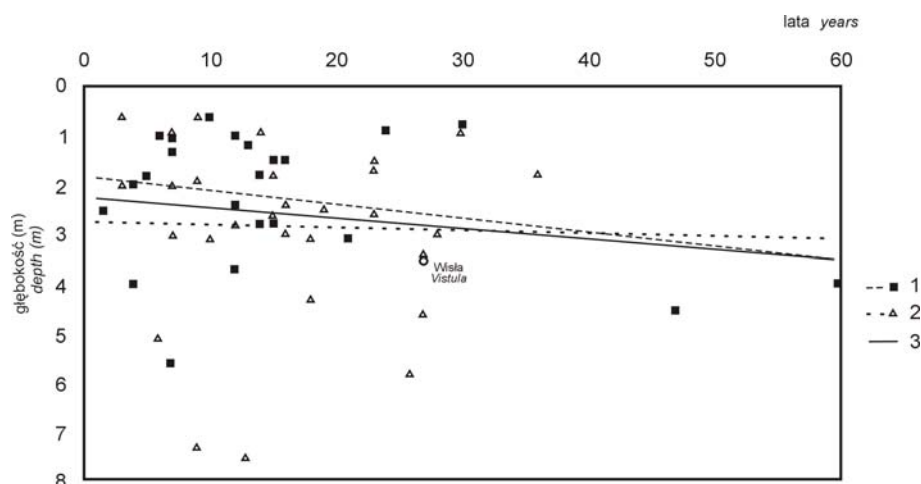
Na świecie w analizowanych odcinkach rzek poniżej zapór stwierdzono, że proces wystąpił najintensywniej w pierwszych latach po okresie piętrzenia i w bezpośrednim sąsiedztwie zapór. Notowano wówczas obniżenia się den koryt. W rzekach amerykańskich wynosiły one 0,6-5,8 m, a maksymalnie dochodziły do 7,5 m (tab. 1). Podczas przejść fal wezbraniowych, w linii wrót elektrowni lub jazów mogą się tworzyć lokalne płosa o głębokości 20 i więcej metrów, a maksymalnie do 31 m, np. poniżej Zbiornika Saratowskiego na Włodze (RAYNOV i IN. 1986). W wypadku stopnia wodnego we Włocławku płosa mogą mieć głębokości dochodzące do 12 m, osiągając podstawę zapory czołowej (BABIŃSKI 1982, 1992). Tego typu przegłębienia dna zagrażające istnieniu zapór wymagają natychmiastowego zabezpieczenia przed dalszą degradacją i najczęściej są wypełniane blokami betonowymi.

Analizując proces erozji wgłębnej w okresie dłuższym niż kilka lat, można stwierdzić, że odznacza się on dużą nieregularnością, jednak z ogólną tendencją do wygasania. Badania amerykańskie wykazały, że okres 20-40 lat działalności stopni wodnych nie zawsze upoważnia do stwierdzenia o tendencji zmniejszającej się dynamiki tego procesu w czasie, wręcz wskazuje na jej niemal prostoliniowy rozwój. Podobny trend stwierdzono w wypadku wielu zapór Rosji (bez podparcia ze strony niżej usytuowanych zbiorników), a także na Wiśle poniżej zapory we Włocławku. Wartości obniżenia koryta w profilu poprzecznym dla okresu dochodzącego do 60 lat działalności analizowanych zapór na świecie przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 2, wraz z prostą regresji degradacji den koryt rzecznych w czasie. Na podstawie analizy profili poprzecznych rzek amerykańskich (WILLIAMS i WOLMAN 1984) obliczono, że przegłębienia koryt poniżej zapór mogą mieścić się w granicach od 0,4 do 38 m, z najczęściej występującą (modalną) głębokością 2 m, a w 98% jest to wartość mniejsza niż 10 m.

Tabela 1. Obniżenie koryt poniżej zapór
Table 1. Decrease of river bed elevation downstream of the dam

Lp.	Rzeka, zapora (zbiornik), region (państwo)	Lata obserwacji	Obniżenie dna w profilu poprzecznym (m)
1	Kolorado, Glen Canyon, Arizona	9	7,3
2	Kolorado, Hoover, Arizona	13	7,5
3	Kolorado, Davis, Arizona	26	5,8
4	Kolorado, Parker, Arizona	27	4,6
5	Kolorado, Imperial, Arizona	18	3,1
6	Jemez, Jemez Canyon, New Mexico	12	2,8
7	Arkansas, John Martin, Colorado	30	0,9
8	Missouri, Fort Peck, Montana	36	1,8
9	Missouri, Garrison, North Dakota	23	1,7
10	Missouri, Fort Randall, South Dakota	23	2,6
11	Missouri, Gavin's Point, South Dakota	19	2,5
12	Medicine Creek, Medicine Creek, Nebraska	3	0,6
13	Middle Loup, Milburn, Nebraska	16	2,4
14	Des Moines, Red Rock, Iowa	9	1,9
15	Smoky Hill, Kanopolis, Kansas	23	1,5
16	Republican, Milford, Kansas	7	0,9
17	Wolf Creek, Fort Supply, Oklahoma	27	3,4
18	North Canadian, Canton, Oklahoma	28	3,0
19	Canadian, Eufaula, Oklahoma	6	5,1
20	Red, Denison, Oklahoma-Texas	16	3,0
21	Neches, Town Bluff, Texas	14	0,9
22	Chattahoochee, Buford, Georgia	15	2,6
23	South Canadian, Conchas, Nev Mexico	7	3,0
24	Salt Fork, Arkansas, Great Salt Plains, Oklahoma	9	0,6
25	Rio Grande, Elephant Butte, Texas	15	1,8
26	An Sabee, Foote Sariyar (Turkey)	15	1,5
27	Saskatchewan, Squaw Rapids	13	1,2
28	Cheyenne, Angostura	16	1,5
29	South Saskatchewan, Dietsbaker	12	2,4
30	Huang He, Sanmenxia, China	4	4,0
31	Syr-Daria, Farchacka	7	1,3
32	Murgab, Hindukuska	60	4,0
33	Murgab, Tadhenska	7	5,6
34	Isar, Dingolfing	14	2,8
35	Lech, Forgensee	10	0,6
36	Saalach, Reichenhall	47	4,6
37	Wertach, Schwabmunchen	5	1,8
38	Dunaj, Faimingen	12	1,0
39	Dunaj, Ingolstadt	14	1,8
40	Rhein, Gerstheim	1,5	2,5
41	Wisła, Włocławek	27	3,5

Na podstawie: WILLIAMS i WOLMAN (1984), GALAY (1983), RAYNOV i IN. (1986), ANDREWS (1986) – szczególnie BABIŃSKI (2002).

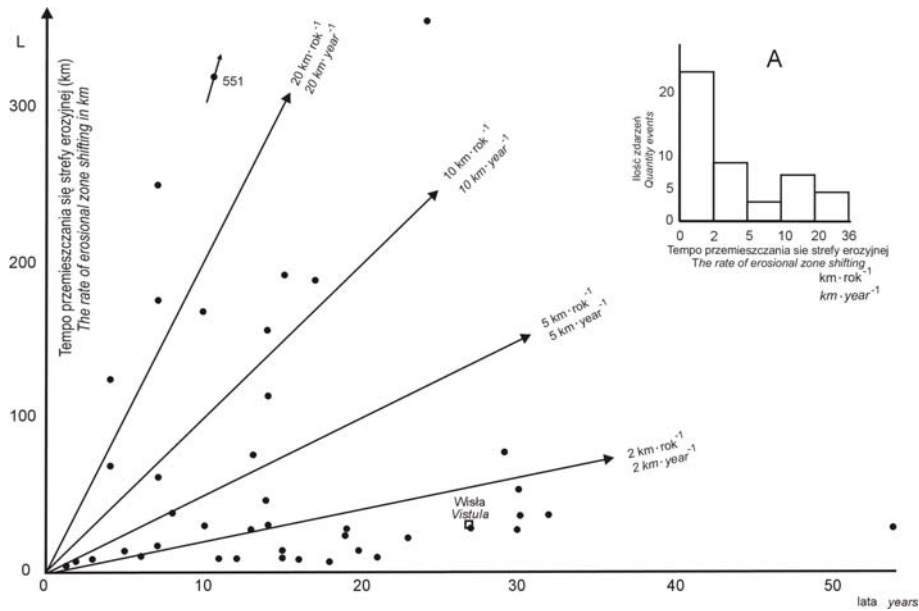


Rys. 2. Tempo degradacji koryt poniżej wybranych zapór świata (m) i prosta regresji, według danych z tabeli 1; dane szczegółowe BABIŃSKI (2002)

Fig. 2. The rate of bottom degradation below the selected dams of world (in m) and its straight regression, after data from Table 1; detail presented in BABIŃSKI (2002)

Ważnym elementem w określaniu zakresu erozji wgłębnej poniżej zapór, oprócz wielkości obniżania się dna, jest badanie zasięgu strefy erozyjnej i tempa przemieszczania się jej czoła. Stwierdzono, na podstawie analizowanych rzek na świecie, że przeciętne roczne tempo przemieszczania się czoła fali erozyjnej wynosiło, dla okresu badań trwającego od 1,5 roku do 54 lat, od 0,4 km do prawie 36 km w kilku przypadkach (na rzece Syr-Daria poniżej zapory Farchackiej; RAYNOV i IN. 1986). Podobną wartością tempa przemieszczania się fali erozyjnej, bo wynoszącą 30,6 km w ciągu roku, charakteryzuje się odcinek Nilu poniżej Zbiornika Namera. Uwzględniając wszystkie analizowane rzeki (BABIŃSKI 2002), można przyjąć, że przeciętne tempo wynosiłoby ponad 6,2 km w ciągu roku, a z pominięciem danych maksymalnych – w granicach 1-3 km na rok (rys. 3). Pod tym względem wpływ stopnia wodnego na Wiśle we Włocławku na tempo przemieszczania się fali erozyjnej, wynoszące $1,1 \text{ km-rok}^{-1}$, jest mało dynamiczny.

Na podstawie porównań tempa przemieszczania i obniżania dna koryta wielu rzek na świecie z charakterystykami dla strefy poniżej zapory na Wiśle można stwierdzić, że wpływ Zbiornika Włocławskiego na proces erozji wgłębnej należy uznać za przeciętny (rys. 2 i 3), a tym samym na pewno niekatastrofalny. Dlatego jedynym wytłumaczeniem zagrożenia – ze strony procesu erozji wgłębnej – podmycia (zniszczenia) zapory jest jej samotne funkcjonowanie (w projekcie zakładano układ kaskadowy).



Rys. 3. Tempo przemieszczania się strefy erozyjnej poniżej zapór: A – liczba zdarzeń w danej strefie tempa przemieszczania się czoła strefy erozyjnej (według danych: GALAYA (1983), RAYNOVA i IN. (1986), ANDREWSA (1986), BELYJA i IN. (2000) zestawionych w pracy BABIŃSKIEGO (2002))

Fig. 3. The rate of erosion zone shifting below the dams: A – quantity events in erosion zone shifting group (after: GALAY (1983), RAYNOV et AL. (1986), ANDREWS (1986), BELYJ et AL. (2000); detail presented in BABIŃSKI (2002))

Wpływ erozji wgłębnej na stabilność zapór na przykładzie stopnia „Włocławek”

Przegrodzenie koryta rzecznej zaporą przyczynia się do wielu zmian w środowisku przyrodniczym otaczającym zbiornik. Część z nich, jak w wypadku Zbiornika Włocławskiego, prawie uległa wygaśnięciu (w początkowej fazie działalności zapory intensywne prawobrzeżne osuwiska, podtopienie i przesuszenie niskiej depresyjnej strefy lewobrzeżnej), natomiast część związana z transportem rumowiska trwa – z jednej strony następuje akumulacja rumowiska klastycznego w 90% w zbiorniku, z drugiej strony zachodzi ustawiczna erozja dna koryta poniżej zapory (BABIŃSKI 1982, 1992, 2002).

Po 30 latach funkcjonowania zapory, koryto średniej wody w jej sąsiedztwie obniżyło się prawie o 3,5 m, asymptotycznie wyklinowując się w odległości ponad 33 km od zbiornika (bilans 0). Dno koryta, na odcinku około 10 km długości poniżej zapory, zostało „wyczyszczone” z piaszczysto-żwirowych aluwii, osiągając odporne na erozję ropy i glinę morenową. Rozpoczął się powolny proces wcinania się rzeki w te utwory, z jednoczesnym niszczeniem nowo utworzonej w strefie zaprowadowej równiny zalewowej. Ten niebezpieczny dla zapory proces obniżania dna koryta, potęgowany tworzącymi

podczas przejść fal wezbraniowych plosami o głębokości do 12 m (każdorazowo wypełnione betonowymi płytami), skłonił hydrotechników do wybudowania w 1998 roku, w odległości 520 m od zapory, progu korekcyjnego, w wyniku którego powstał mikro-zbiornik. Jego wody mają podierać zapórę, co ma być zabezpieczeniem przed ewentualnym jej podmyciem. Po 7-letniej działalności progu, poniżej budowli powstało płośko o głębokości dochodzącej do 16 m. Prawdopodobnie zniszczyło ono w tym miejscu warstwę iltu i gliny, osiągając strop mało odpornych na erozję piaszczystych utworów trzeciorzędowych. Każdorazowo po przejściu fali wezbraniowej procesowi erozji wgłębnej towarzyszy niszczenie progu korekcyjnego. Jest to sygnał wskazujący na zmianę dna koryta z dotychczas stabilnego w niestabilne, co w niedalekiej przyszłości może znacznie spotęgować proces obniżania dna. Oznacza to również, że tymczasowy próg korekcyjny nie sprawdził się w warunkach samodzielnego funkcjonowania zapory, zaprojektowanej w układzie kaskadowym, tym bardziej nie spełni roli planowany kolejny próg w odległości 8 km poniżej tamy. Jedynym więc rozwiązaniem jest budowa niższej usytuowanej tamy w Nieszawie lub Ciechocinku ze Zbiornikiem Nieszawskim, podpierającym zapórę włocławską. Póki co proces erozji wgłębnej przyczynił się do tworzenia się szczelin w zaporze (stały monitoring pęknięć) i odległym od niej o 4,6 km filarze mostu drogowego (osiadanie przęsła). Ponadto wszelka zabudowa hydrotechniczna, również dolny fragment awanportu na zaporze, znajdują się w stanie „zawieszenia” nawet w stosunku do średnich przepływów. Wszystkie dotychczasowe obserwacje wskazują na zagrożenie przerwaniem zapory czołowej Zbiornika Włocławskiego, ze względu na erozję wgłębna potęgowaną niewłaściwymi pracami korekcyjnymi koryta (progi).

Literatura

- ANDREWS E.D., 1986. Downstream effects of Flaming Gorge Reservoir on the Green River, Colorado and Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.* August 97, 8: 1012-1023.
- BABIŃSKI Z., 1982. Procesy korytowe Wisły poniżej zapory wodnej we Włocławku. *Dokum. Geogr.* 1-2.
- BABIŃSKI Z., 1992. Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły. *Pr. Geogr.* 157.
- BABIŃSKI Z., 2002. Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych ze szczególnym uwzględnieniem stopnia wodnego „Włocławek”. *Wyd. AB, Bydgoszcz.*
- BELYJ B.V., VINOGRADOVA I.I., IVANOV V.V., NIKITINA Ł.N., CHALOV R.S., CHERNOV A.V., 2000. Morfologia i deformacja rusła Verchnego Jeniseja, między Sajano-Szuszenskoj GES i Krasnojarskim Vodochraniliszczem. W: *Erozja poczw i ruslovyje processy*. Red. R.S. Chalov. Moskwa: 158-183.
- BERKOVICH K.M., 1992. *Regulirovanije recznych rusel*. Izd. Mosk. Univ., Moskwa.
- GALAY V.J., 1983. Causes of river bed degradation. *Water Res. Res.* 19, 5: 1057-1090.
- RAYNOV S., PECHINOV D., KOPALIANI Z., 1986. River response to hydraulic structures. W: *International Hydrological Programme*. Red. R.D. Hey. UNESCO, Paris.
- VEKSLER A.B., DONENBERG V.M., 1983. *Pereformirovanie rusla v niżnich befach krupnych gidroelektrostancij*. Energoatomizdat, Moskva.
- WILLIAMS G.P., WOLMAN M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *Geol. Survey Profes. Pap.* 1286.

DEEP EROSION DOWNSTREAM OF RESERVOIRS ON THE EXAMPLE OF SELECTED DAMS IN THE WORLD

Summary. On the basis of the literature the one of the most dangerous phenomenon impacting the dams was characterised. It is the process of bed erosion occurring downstream of the dam. The main elements determining intensity and progress in time and space were described. In this frame the results of research on erosion processes downstream of the Włocławek dam in the Vistula river were presented. This dam is still in danger due to local scour intense formation potentially resulting in dam-break.

Key words: dams, reservoirs, deep erosion the rate of erosion zone shifting, fluvial processes

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Zygmunt Babiński, Instytut Geografii, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, ul. Mińska 15, 85-428 Bydgoszcz, Poland, e-mail: zbabinski@ab.byd.edu.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 10.05.2007

Do cytowania – For citation: Babiński Z., 2007. Erozja wgłębna poniżej zbiorników wodnych na przykładzie wybranych zapór świata. Nauka Przyr. Technol. 1, 2, #11.