

Polska Akademia Nauk  
Instytut Geografii  
i Przestrzennego Zagospodarowania

Zygmunt Babiński

PROCESY EROZYJNO-AKUMULACYJNE  
PONIŻEJ STOPNIA WODNEGO WŁOCŁAWEK  
ICH KONSEKWENCJE I WPŁYW  
NA MORFODYNAMIKĘ PLANOWANEGO  
ZBIORNIKA NIESZAWA



Toruń 1997



**Polska Akademia Nauk  
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania**

**Zygmunt Babiński**

**PROCESY EROZYJNO-AKUMULACYJNE  
PONIŻEJ STOPNIA WODNEGO WŁOCŁAWEK,  
ICH KONSEKWENCJE I WPŁYW  
NA MORFODYNAMIKĘ PLANOWANEGO  
ZBIORNIKA NIESZAWA**

**Toruń 1997**

<http://rcin.org.pl>

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN nr 6P20200307  
pt.: „Hydrologiczne i geomorfologiczne konsekwencje zabudowy  
hydrotechnicznej dolnej Wisły” kierowanego przez  
prof. dr hab. Jana Szupryczyńskiego.

ISBN 83-86875-12-7

*Wydawca:*

TOP KURIER  
87-100 Toruń, ul. Lindego 10/5  
tel. (056) 227-57  
Toruń 1997

*Druk i oprawa:*

GERGES, 87-100 Toruń, ul. Y.alinowa 25

## SPIS TREŚCI

I. Wprowadzenie . . . . .	5
II. Cel, zakres i metody pracy . . . . .	6
III. Ogólna charakterystyka dolnej Wisły . . . . .	7
1. Warunki litologiczne dna doliny Wisły . . . . .	7
2. Wybrane elementy reżimu hydrologicznego . . . . .	8
IV. Proces erozji wgłębnej . . . . .	11
V. Konsekwencje erozji wgłębnej . . . . .	16
1. Procesy akumulacyjne . . . . .	16
a. Równina zalewowa . . . . .	16
b. Odcinek agradacyjny . . . . .	21
2. Zjawiska hydrologiczne . . . . .	22
3. Gospodarka . . . . .	32
VI. Prognoza zmian środowiska dna doliny Wisły poniżej zapory . . . . .	36
1. Opcja „0” . . . . .	36
2. Budowa stopnia wodnego „Ciechocinek” . . . . .	38
a. Stopień wodny Ciechocinek i jego zbiornik „Nieszawa” . . . . .	38
b. Zbiornik nieszawski na tle procesów erozyjnych poniżej zapory we Włocławku . . . . .	39
c. Prognoza zmian środowiska geograficznego w strefie oddziaływania stopnia wodnego Ciechocinek i zbiornika Nieszawa . . . . .	40
VII. Uwagi końcowe . . . . .	44
Literatura . . . . .	45



## I. WPROWADZENIE

Człowiek, obok klimatu, stanowi jeden z najistotniejszych czynników wpływających na zmiany środowiska fluwialnego. Fakt ten nabiera szczególnego znaczenia w warunkach zdecydowanej ingerencji w środowisko doliny Wisły poprzez budowę stopni wodnych. W przypadku bowiem przegrodzenia koryta rzecznego zaporą dochodzi do zahamowania jednego z podstawowych czynników kształtujących systemy fluwialne – transportu rumowiska klastycznego, głównie wleczonego. Akumulowane w całości w cofce zbiornika rumowisko wlezione oraz w ponad 40% rumowisko unoszone w dolnej czaszy zbiornika czyni wypływające z niego wody aktywnymi na procesy erozyjne. W warunkach umocnionych brzegów koryta uwidacznia się to przede wszystkim w postaci erozji wgłębnej. Rozwój procesów erozyjnych poniżej stopnia wodnego jest ograniczony w czasie i przestrzeni momentem nasycenia się wód rumowiskiem klastycznym do jego pierwotnej wielkości, przed ich wypłynięciem do zbiornika. Ogromny wpływ ma na nie ruch nieustalony wód powodowany pracą elektrowni. Dzięki niemu następują chwilowe przyrosty energii kinetycznej rzeki (dobowe wahania stanów wody), modyfikujące nie tylko przestrzenny układ procesu erozji wgłębnej, ale także tworzącą się poniżej jego występowania strefę akumulacyjną.

Obiektem rozważań niniejszego opracowania jest przestrzenny i czasowy rozwój procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej stopnia wodnego Włocławek wraz z ich konsekwencjami dla środowiska i gospodarki człowieka. W dotychczasowych opracowaniach autora (m. in. Babiński 1982, 1992) problem ten był traktowany w sposób uproszczony, ponieważ dynamikę strefy erozyjnej i towarzyszący jej odcinek akumulacyjny charakteryzowano w zależności prostoliniowej. W początkowej fazie działalności stopnia wodnego fakt ten mógł być w ten sposób traktowany ze względu na intensywny i jednokierunkowy przebieg procesów erozyjnych, a także ich ograniczony zasięg. Jednak po ponad 26 latach eksploatacji zbiornika, na skutek dużej intensywności procesu erozji wgłębnej, i to w zróżnicowanych warunkach geologicznych dna koryta, przebieg procesów fluwialnych przybrał postać bardziej urozmaiconą przestrzennie. Poznanie mechanizmu różnicującego procesy erozyjno-akumulacyjne, jego przestrzennego układu, ma ogromne znaczenie w prognozowaniu morfodynamiki planowanego zbiornika nieszawskiego. Jest to tematem opracowania, które w tym względzie stanowi syntezę i podsumowanie dotychczasowych badań autora.

## II. CEL, ZAKRES I METODY PRACY

Celem opracowania jest: 1. określenie zróżnicowania przestrzennego i zmiennego w czasie procesu erozyjno-akumulacyjnego poniżej stopnia wodnego Włocławek w powiązaniu ze zjawiskami hydrologicznymi Wisły i pracami regulacyjnymi koryta; 2. scharakteryzowanie ilościowe i jakościowe procesów korytowych na tle mechanizmu tworzenia się nowego typu koryta; 3. określenie warunków fizjograficznych planowanego zbiornika nieszawskiego stopnia wodnego Ciechocinek w zależności od tempa przebiegu procesów erozyjno-akumulacyjnych i czasu powstania zbiornika; 4. przedstawienie prognozy zmian środowiska geograficznego w strefie oddziaływania zbiornika nieszawskiego.

Zakres opracowania obejmuje obszar planowanego zbiornika nieszawskiego oraz ponad dziesięciokilometrowy odcinek koryta poniżej projektowanego stopnia wodnego Ciechocinek. Stanowi to odcinek dna doliny Wisły (koryto + równina zalewowa) o długości ponad 43 km, rozprzestrzeniający się od stopnia wodnego Włocławek (674,8 km) do początku odcinka koryta uregulowanego pod koniec XIX wieku (718,4 km).

Opracowanie obejmuje ponad 26-letni okres działalności stopnia wodnego Włocławek z uwzględnieniem procesów korytowych odnoszących się do warunków poprzedzających powstanie zbiornika. Takie kompleksowe podejście do określenia wpływu przegrodzenia koryta zaporą na procesy korytowe ma na celu wyeliminowanie czynników naturalnych kształtujących koryto Wisły.

Bazę wyjściową pracy stanowią materiały analityczne i ich wyniki pochodzące z dotychczasowych opracowań autora (Babiński 1982, 1986, 1987, 1992, 1993, 1994, 1995a, 1995b), uzupełnione badaniami prowadzonymi w latach 1994/97. Ponadto wykorzystano wyniki badań „Hydroprojektu” O/Włocławek, użytkownika Wisły jako drogi wodnej – Okręgowej Dyrekcji Gospodarki Wodnej we Włocławku i w Toruniu, a także innych ośrodków naukowo-badawczych zajmujących się gospodarką wodną w obrębie dna doliny dolnej Wisły (m. in. Meler 1993, 1995, Giziński 1994, Jarzębińska, Majewski 1994, Kozłowski 1994, Zdulski 1994, 1995, Branicki 1995, Polak 1996).

Przy opracowaniu procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej stopnia wodnego Włocławek stosowano metody kartograficzno-statystyczne. Głównym materiałem analitycznym stały się echosondażowe profile podłużne koryta na całym badanym odcinku oraz profile poprzeczne koryta w okolicy Nieszawy (700–702 km). W drugim przypadku echogramy posłużyły do wykreślenia map batymetrycznych koryta, celem ustalenia akumulacyjno-erozyjnych ruchów dna. Stwierdzono bowiem, że pojedyncze przekroje poprzeczne przez koryto nie określają w sposób jednoznaczny procesów korytowych (Babiński 1982, 1992). Pomocne i uzupełniające w tym względzie okazały się pomiary geodezyjne dynamiki łańcuchów koryta zlokalizowanych w odcinku nieszawskim (Babiński 1992).

Należy dodać, że aby wszystkie przekroje koryta i ich plany batymetryczne stały się porównywalne, odniesiono je do tej samej rzędnej wysokości zwierciadła wody – 387 cm, będącej średnim wieloletnim stanem wody w Nieszawie z okresu przed wybudowaniem stopnia wodnego.

Rozwój przestrzenny procesów korytowych poniżej zbiornika badano także interpretując zdjęcia lotnicze. Szczególnie istotne okazały się zdjęcia lotnicze z 29 sierpnia (od zapor do ujścia Tażyny) i 22 września 1992 r. (poniżej Tażyny), na bazie których określono stan koryta Wisły poniżej zbiornika po 25 latach istnienia stopnia wodnego Włocławek.



wiek. Wykonana na podstawie zdjęć lotniczych mapa w skali zasadniczej 1:10 0000, a następnie zweryfikowana w terenie, stanowi materiał wyjściowy do analizy warunków i procesów, jakie wystąpią w obrębie planowanego zbiornika nieszawskiego (zał.).

Ważnym elementem w interpretacji procesów erozji wglębnej i akumulacji są zjawiska hydrologiczne. Podstawowym materiałem analitycznym były dobowe stany wody ( $h$ ) i przepływy ( $Q$ ), ujęte następnie w formie wartości średnich rocznych i pięcioletnich (wieloletnich) dla punktów wodowskazowych Włocławek i Toruń, dla lat hydrologicznych 1966/95. Wybór posterunku obserwacyjnego Toruń wynikał z faktu, że nie znajduje się on jeszcze pod wpływem stopnia wodnego i stanowi w związku z tym punkt odniesienia do warunków „naturalnych”. Dla celów porównawczych w/w elementów reżimu hydrologicznego zastosowano analizę prostych regresji, a nie – jak to się często ujmuje w przypadku zależności  $h:Q$  – w formie krzywej konsumpcyjnej. Uproszczenie tej metody analizy zjawisk wodnych wynika z ograniczenia jej do strefy przepływów średnich rocznych, z wyłączeniem wartości ekstremalnych. Dla szczegółowej analizy wpływu pracy szczytowo-interwencyjnej stopnia wodnego na stany wody scharakteryzowano pięciodobowy hydrogram opracowany na bazie godzinnych danych dla wybranych (określonych) przepływów rzeki. Ponadto przeprowadzono jednorazowy (21.09.1995) pomiar stanów wody w dodatkowych punktach wodowskazowych: zaporą-dolna woda, Łęg Witoszyn, Bobrowniki, Nieszawa, Łęg Osiek i Silno (szczegółowe dane poniżej), celem dokładnego określenia aktualnego spadku dna koryta Wisły.

### III. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA DOLNEJ WISŁY

#### 1. Warunki litologiczne dna doliny Wisły

Podstawowym czynnikiem kształtującym procesy erozyjne, a tym samym i akumulacyjne, są warunki litologiczne podłoża, w jakim odbywa się przepływ rzeki. Jest bowiem istotne, czy procesy te przebiegają w utworach podatnych na erozję (utwory piaszczysto-żwirowe), czy w utworach trudno rozmywalnych (ił, glina, bruk morenowy). W tych rozważaniach nie jest ważny wiek tych osadów, choć ma on znaczenie dla określenia warunków paleogeograficznych doliny rzecznej – rozwoju koryta rzecznego. W ostatnim przypadku pomocną w wyjaśnieniu tego problemu jest mapa podłoża podczwartorzędowego dna doliny dolnej Wisły wykonana przez E. Wiśniewskiego (1976). Wynika z niej fakt naśladowania („odziedziczenia”) doliny sprzed okresu czwartorzędowego przez przebieg współczesnego dna doliny Wisły, z ogólną tendencją do jego „wyprostowywania się”. Ma to swoje odzwierciedlenie w kontakcie koryta Wisły z wysoczyzną morenową w okolicy Włocławka (brzeg prawy) i Nieszawy (brzeg lewy). Świadczy to również o ograniczonych możliwościach erozyjnych rzeki na tych odcinkach. Na pozostałych bowiem obszarach procesy korytowe Wisły odbywają się w utworach piaszczysto-żwirowych.

Miażdżość utworów piaszczysto-żwirowych na analizowanym odcinku Wisły jest zróżnicowana. Jak wynika z przekrojów geologicznych przez dolinę Wisły wykonanych przez B. Faferka (1960) w linii zapory we Włocławku i E. Wiśniewskiego (1976) poniżej zbiornika, waha się ona w granicach 10–12 m, osiągając maksymalne miażdżości docho-

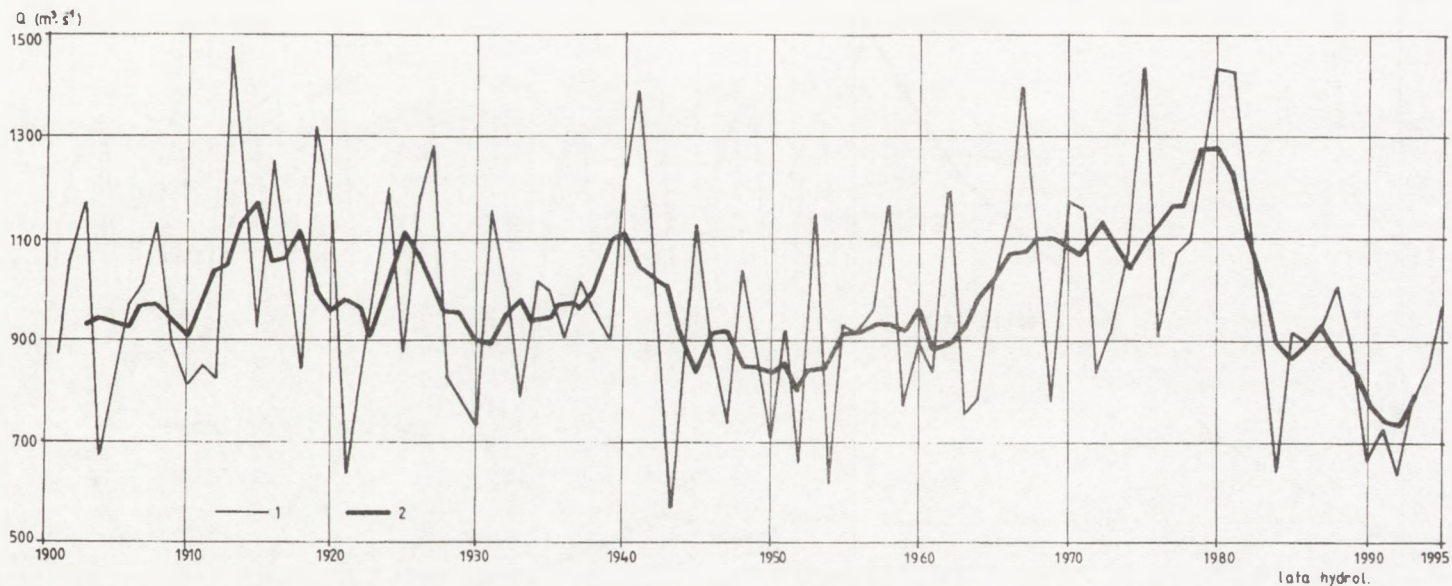
dzące do 25 m. Są jednak miejsca, gdzie tych utworów brak. Wówczas bezpośrednio na powierzchni występują utwory trudno rozmywalne – il trzeciorzędowy, glina i efekt jej rozmycia – bruk morenowy. Te lokalne progi denne, często nazywane „rafami”, uwidaczniają się już przy średnich stanach wody i rozprzestrzeniają się na odcinkach o długości do kilkuset metrów, zajmując niekiedy całą szerokość współczesnego koryta. Ich pojawianie się ma szczególnie znaczenie na odcinku erozyjnym poniżej zbiornika. Aktualnie wychodnie bruku morenowego, ilu i gliny mają miejsce w następujących kilometrach biegu Wisły: 675–677 (sąsiedztwo zapory), 679–680 (most drogowy we Włocławku), 682,5–683,5 i 685,5–687 (prawy brzeg), 690–691,5 (koryto), 702–703 (Nieszawa), 705–705,5 (prawy brzeg)(zał.). Progi te stanowią naturalny czynnik hamujący (modyfikujący) proces erozji w głębszej części poniżej zapory.

Aluwia rzeczne budujące koryto Wisły, reprezentowane przez dynamiczne formy typu łań, składają się głównie z utworów piaszczystych o średnicy ziarn w granicach od 0,37 do 0,57 mm (Babiński 1992). W strefach zaprządowych łań występują często mułki (proces chwilowej akumulacji), zaś w linii nurtu żwir i gładziki. Poza łańcami, w przegłębieniach i płosach, skład mechaniczny utworów jest bardziej zróżnicowany – od mułku, piasku i żwiru do w/w utworów trudno rozmywalnych zalegających *in situ*. Zarówno skład mechaniczny utworów budujących dno koryta, jak i ich miąższość ma ogromny wpływ na przebieg procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej zbiornika.

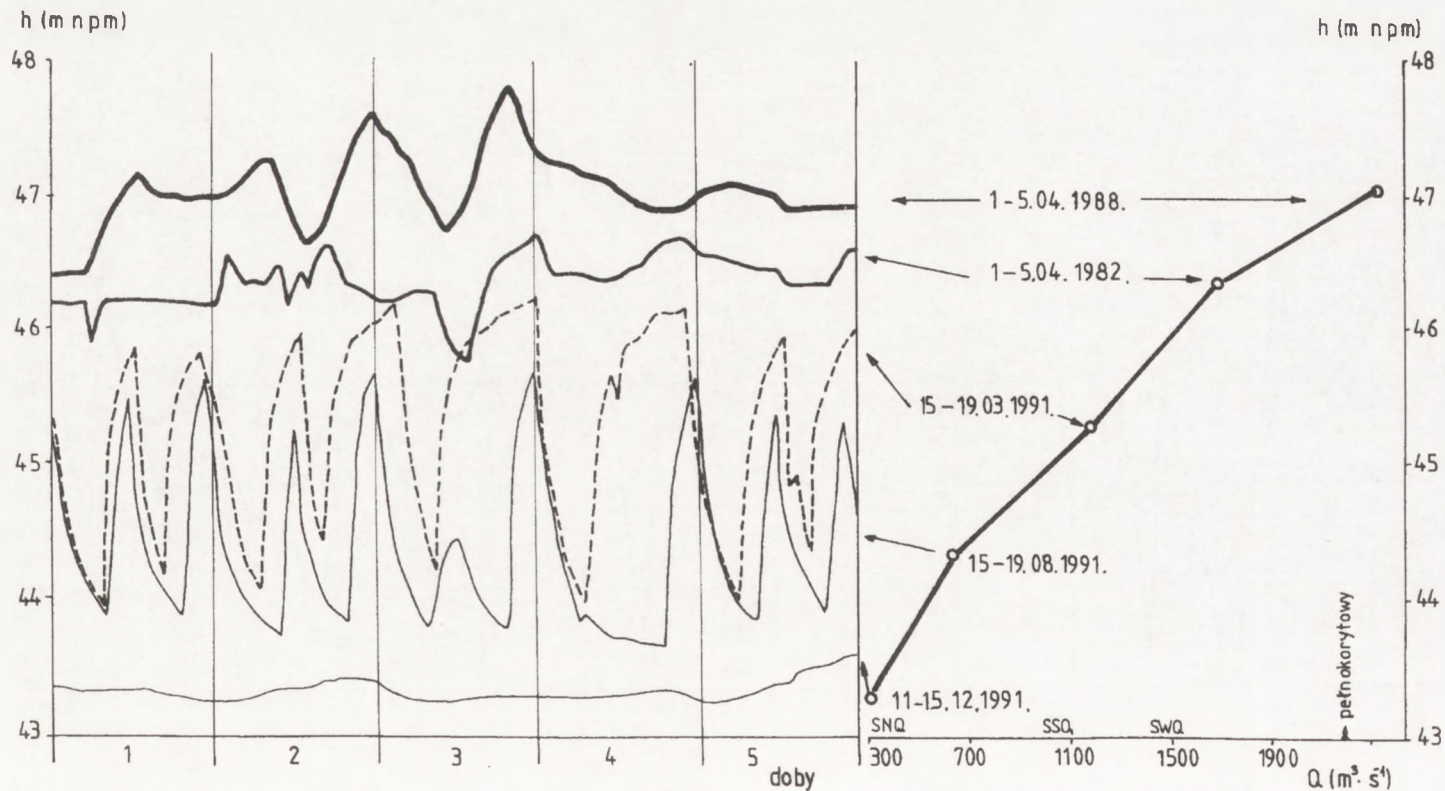
## 2. Wybrane elementy reżimu hydrologicznego

Zasadniczym czynnikiem rozwoju procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej stopnia Włocławek, poza „oczyszczeniem” wód z rumowiska akumulowanego w górnej części zbiornika, jest reżim wód. On to bowiem kształtuje energię rzeki (potencjalną i kinetyczną) zużytkowaną na erozję, akumulację i transport rumowiska. Jego szczególne znaczenie zaznacza się w warunkach dużej zmienności powodowanej szczytowo-interwencyjną pracą elektrowni.

Analizowany 25-letni (1970–1995) okres istnienia zbiornika włocławskiego charakteryzował się generalnie dwoma okresami wilgotnymi, z tendencją obniżania się stanów wody w drugiej połowie lat osiemdziesiątych (ryc. 1). Podczas lat wilgotnych, przypadających na lata hydrologiczne 1975, 1979, 1980–1981, średnie roczne przepływy w punktach wodowskazowych Włocławek i Toruń wahały się od 1250 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> do 1450 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. W tym samym okresie średnie roczne maksymalne przepływy mieściły się w granicach 2100–2500 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, natomiast średnie roczne minimalne wynosiły od 700 do 850 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (Babiński, Grześ 1995). Tym dwóm okresom towarzyszą niżówki z minimami przypadającymi na lata hydrologiczne 1972, 1973, 1976, 1984, 1990–1992. Podczas ich trwania średnie roczne przepływy Wisły uległy zmniejszeniu o prawie 40% w stosunku do przepływów w latach wilgotnych. Szczególnie niskimi stanami (przepływami) wody charakteryzuje się Wisła w ostatnich trzynastu analizowanych latach. Jest to najgłębsza niżówka, jaka wystąpiła w ciągu ostatnich stu lat (ryc. 1). W latach 1984 i 1990–1992 Wisła osiąga na całym swym dolnym odcinku minimalne przepływy rzędu 570–640 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Tę tendencję spadkową przepływów od maksimum przypadającego na rok 1980 do minimum w 1992 r. można prześledzić na podstawie przebiegu średnich rocznych wyrównanych przepływów przedstawionych na rycinie 1.



Ryc. 1. Przebieg średnich rocznych (1) i wyrównanych tzw. przesuwanych 5-letnich (2) przepływów (Q) Wisły w przekroju hydrometrycznym Toruń w latach hydrologicznych 1901–1995



Ryc. 2. Przykłady godzinnych wahań stanów wody Wisły poniżej stopnia wodnego Wrocławek (dolna woda) podczas przepływów od tzw. biologicznego (SNQ –  $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) do petnokorytowego ( $2198 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )

W przebiegu rocznym przepływów dolnej Wisły zauważa się jedną lub dwie kulminacje przedzielone niżówkami. Maksymalny, stwierdzony w marcu 1924 r., przepływ Wisły w profilu wodowskazu Włocławek wynosił  $8305 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $h = 838 \text{ cm}$ ). Wysokie stany występują z reguły w marcu lub kwietniu, rzadziej w lipcu lub sierpniu. W obydwu przypadkach tworzą się fale wezbraniowe o wysokości względnej 3–5 m, maksymalnie do 6 m (Babiński 1982). Fale wezbraniowe, wkraczające na powierzchnię równiny zalewowej, w ciągu ostatnich 35 lat trwały przeciętnie 4–6 dni w roku. Bywały jednak lata, np. 1962 czy 1979, że okres zalewu wydłużał się do 15 dni, i to z podziałem na powódź wiosenna i letnią. Wpływom fal wezbraniowych nie podlega obecnie odcinek intensywnej erozji wgłębnej poniżej stopnia wodnego. Na tym odcinku bowiem problem fal wezbraniowych może dotyczyć głównie powierzchni nowo tworzonej równiny zalewowej.

Najniższe stany (przepływy) wody na dolnej Wiśle występują przede wszystkim na przełomie jesieni i zimy, rzadziej latem (Babiński 1986). Podczas trwania niżówek przepływy Wisły osiągają wartość poniżej  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Ogromne znaczenie w procesie erozji wgłębnej poniżej zapory ma wielkość przepływów (wysokości stanów) wody. Stany przekraczające poziom równiny zalewowej (także nowo tworzonej) przyczyniają się bowiem do wzrostu udziału rumowiska klastycznego w procesie korytowym, małe przepływy ograniczają je z kolei do strefy regulacyjnej koryta. W tym procesie jednak główną rolę odgrywają dobowe wahania stanów wody, przekraczające poziom tzw. wody pełnokorytowej. Szczytowo-interwencyjna praca stopnia wodnego Włocławek sprawia, że poniżej zapory w reżimie hydrologicznym zaznaczają się dobowe wahania stanów wody dochodzące maksymalnie do 3 m, częściej 2,0–2,5 m (Babiński 1982, 1992). Podczas tych nagłych zrzutów wody następują chwilowe przyrosty przepływów (energii kinetycznej) rzeki osiągające wartości  $1500\text{--}1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Są one najczęściej związane z średnimi przepływami na Wiśle (ryc. 2). W okresie trwania niżówek, a także podczas fal wezbraniowych notuje się głównie małe wahania dobowe stanów wody. Dlatego też najintensywniejsze ruchy dna koryta poniżej zapory występują w okresie trwania stanów średnich.

#### IV. PROCES EROZJI WGLĘBNEJ

W wyniku przeprowadzonych w latach 1972–1987 badań terenowych opartych głównie na analizie morfodynamiki mezofarm korytowych (Babiński 1982) oraz wcześniejszych pomiarów przekrojów poprzecznych wykonanych przez wrocławski „Hydroprojekt”, określono dynamikę strefy erozyjnej w formie ubytku materiału dennego ( $Re$ ) i tempa przemieszczania się tzw. fali erozyjnej ( $L$ ). Podstawowe dane odnoszące się do odpowiednich okresów badawczych przedstawiono w tabeli 1. Wielkości sumaryczne ujęto następnie w postaci równań prostych regresji (ryc. 3) dla:

$$L = 1.03x + 1.57 \quad \text{i} \quad Re = 0.67x + 0.05$$

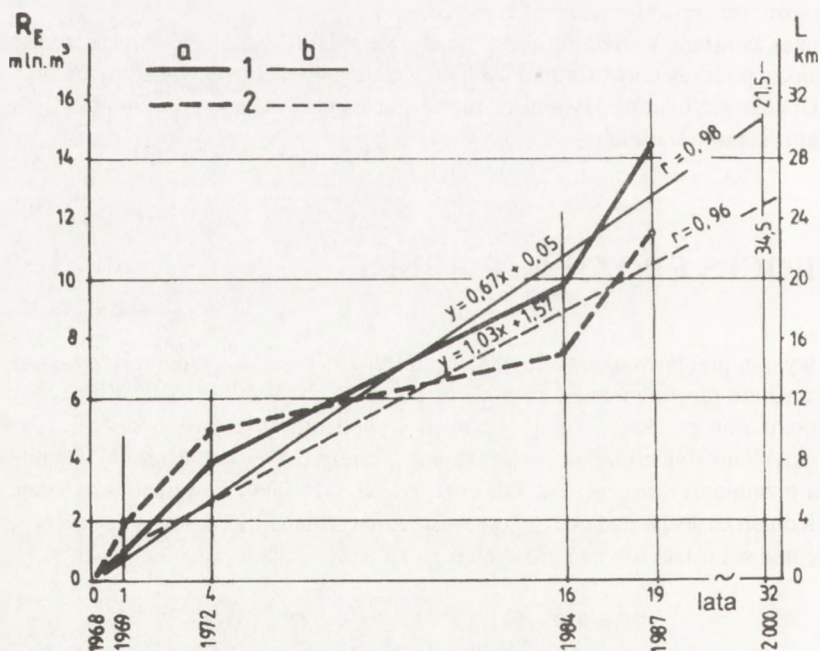
gdzie  $x$  oznacza lata, które z kolei posłużyły do określenia prognoz rozwoju procesu erozji wgłębnej.

Jak wynika z 19-letnich bezpośrednich badań (1968–1987), proces erozji wgłębnej nie przebiegał, jak pierwotnie przypuszczano, jednostajnie, ze stałą tendencją do wygasania (Babiński 1982). Przeciwnie – cechował się zróżnicowanym tempem przemieszczania się czoła strefy erozyjnej w dół rzeki (L) i zmiennym w czasie ubytkiem materiału dennego (Re) (tab., ryc. 3).

**TABELA**  
**Dynamika strefy erozyjnej poniżej stopnia wodnego Włocławek**  
**(dane pomiarowe i ich prognoza)**

Lata hydrologiczne	Ubytek materiału dennego (Re)		Tempo przemieszczania czoła strefy erozyjnej (L)	
	mln m <sup>3</sup> rok <sup>-1</sup>	mln m <sup>3</sup>	km rok <sup>-1</sup>	km
1968–1969	0,8	0,8	2,0	2,0
1969–1972	1,1	3,2	2,4	7,0
1972–1984	0,5	5,9	0,6	6,8
1984–1987	1,6	4,7	2,7	8,0
1987–1995	0,4	3,0	0,6	4,6
1968–1995	0,7	17,6	1,1	28,4
1968–2008	0,7	28,0	1,1	44,0
1968–2020	0,7	36,4	1,1	

Niezgodność wartości zamieszczonych w tabeli, w przypadku ich bezpośrednich przeliczeń, wynika z zaokrąglenia poszczególnych liczb.



Ryc. 3. Bilans erozji rumowiska dennego Re (1a) i tempo przemieszczania się czoła strefy erozyjnej L (2a) poniżej stopnia wodnego Włocławek w latach 1968–87 i ich proste regresji do roku 2000 (odpowiednio 1b i 2b) (Babiński 1992, ryc. 21)

W początkowym okresie działalności stopnia stwierdzono, podobnie jak w przypadku rzeki Ter w Wielkiej Brytanii (Peets i Pratts 1983), nasilenie się procesu erozji wgłębnej koryta. Już po czterech latach strefa erozyjna przemieściła się na odległość ponad 9 km od stopnia wodnego, przy ubytku materiału dennego wynoszącym ponad 4 mln m<sup>3</sup> (ryc. 4). Wartości te dają przeciętną prędkość przesuwania się czoła odcinka erozyjnego 2 km rocznie, z ubytkiem utworów dennych około 1.0 mln m<sup>3</sup>·rok<sup>-1</sup> (tab.). W tym samym okresie, w bliskim sąsiedztwie stopnia wodnego, dno koryta obniżyło się o ponad 2.5 m, z lokalnym plosem o głębokości ponad 10 m. W odległości około 4.6 km od zbiornika dno koryta obniżyło się o prawie 0,5 m. Nieznaczne zmniejszenie dynamiki ruchu rumowiska w pierwszym roku badań (tab.) było związane z piętrzeniem i wypełnianiem zbiornika wodą (retencja wody i zmniejszenie przepływów rzeki).

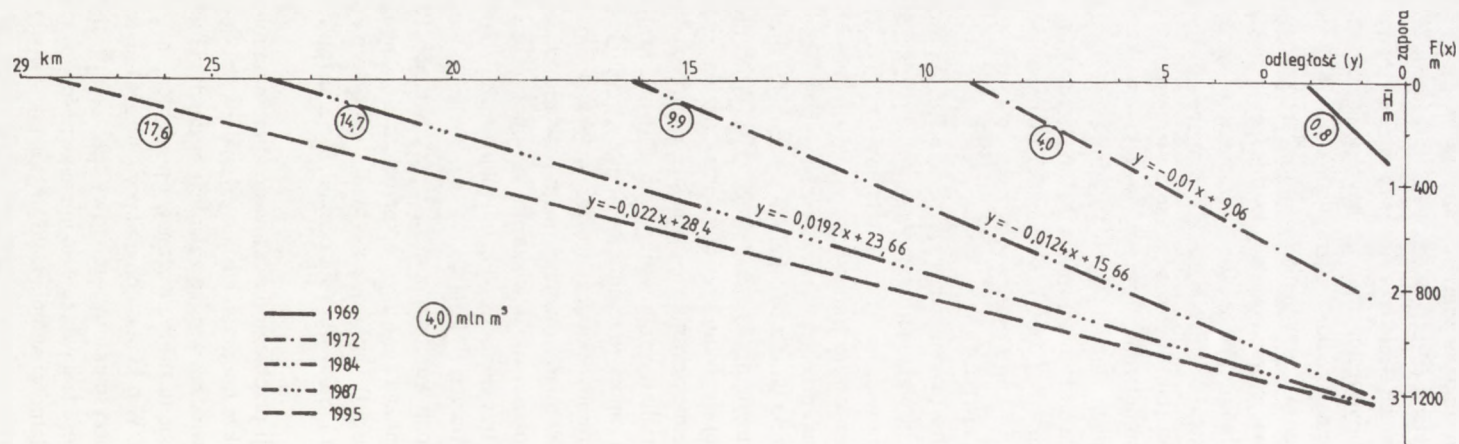
W następnych 12 latach zamykających 16-letni okres działalności zbiornika tempo przemieszczania się czoła erozyjnego spadło do 0,6 km·rok<sup>-1</sup>, ze średnim ubytkiem materiału dennego 0,5 mln m<sup>3</sup>·rok<sup>-1</sup> (tab.). Oznaczało to przemieszczenie się czoła strefy erozyjnej na odległość 15,7 km, z ujemnym bilansem wyerodowanego rumowiska dennego wynoszącym 9,9 mln m<sup>3</sup>(ryc.4).

Z porównania danych z okresu pierwszych czterech lat i następnych dwunastu można by sądzić, że proces erozji wgłębnej poniżej zbiornika przyjął zależność krzywoliniową, z tendencją do wygasania w czasie (ryc. 3 )(Babiński 1982). Świadczyć o tym mogłoby również osiągnięcie przez koryto trudno rozmywalnych utworów budujących dno – iltu i głazów. Dowodem na taki przebieg procesu erozji wgłębnej mogłoby być także wygasanie energii kinetycznej rzeki wraz z oddalaniem się czoła tej strefy od zbiornika.

Tymczasem kolejny trzyletni okres badawczy (1984–1987) wykazał ponowny wzrost dynamiki strefy erozyjnej. Jego intensywność przekroczyła nawet wartość z okresu początkowego. Tempo przemieszczania się czoła strefy erozyjnej wzrosło do 2,7 km·rok<sup>-1</sup> z przeciętną ilością materiału wyerodowanego z dna 1,6 mln m<sup>3</sup>·rok<sup>-1</sup> (tab.). Strefa erozyjna od początku istnienia zapory przemieściła się już na odległość 23,7 km od zbiornika, natomiast bilans ubytku rumowiska dennego zamknął się wartością 14,6 mln m<sup>3</sup> (ryc. 4). Dane te, przy założeniu w miarę równomiernego rozkładu procesu erozyjnego w profilu podłużnym koryta o szerokości 400 m, wskazują na obniżenie się dna koryta strefy erozyjnej od 2 do 3 m na około trzykilometrowym odcinku poniżej zbiornika, 1–2 m na dalszych 10 km do 0–1 m na końcowych 10 km (ryc. 4).

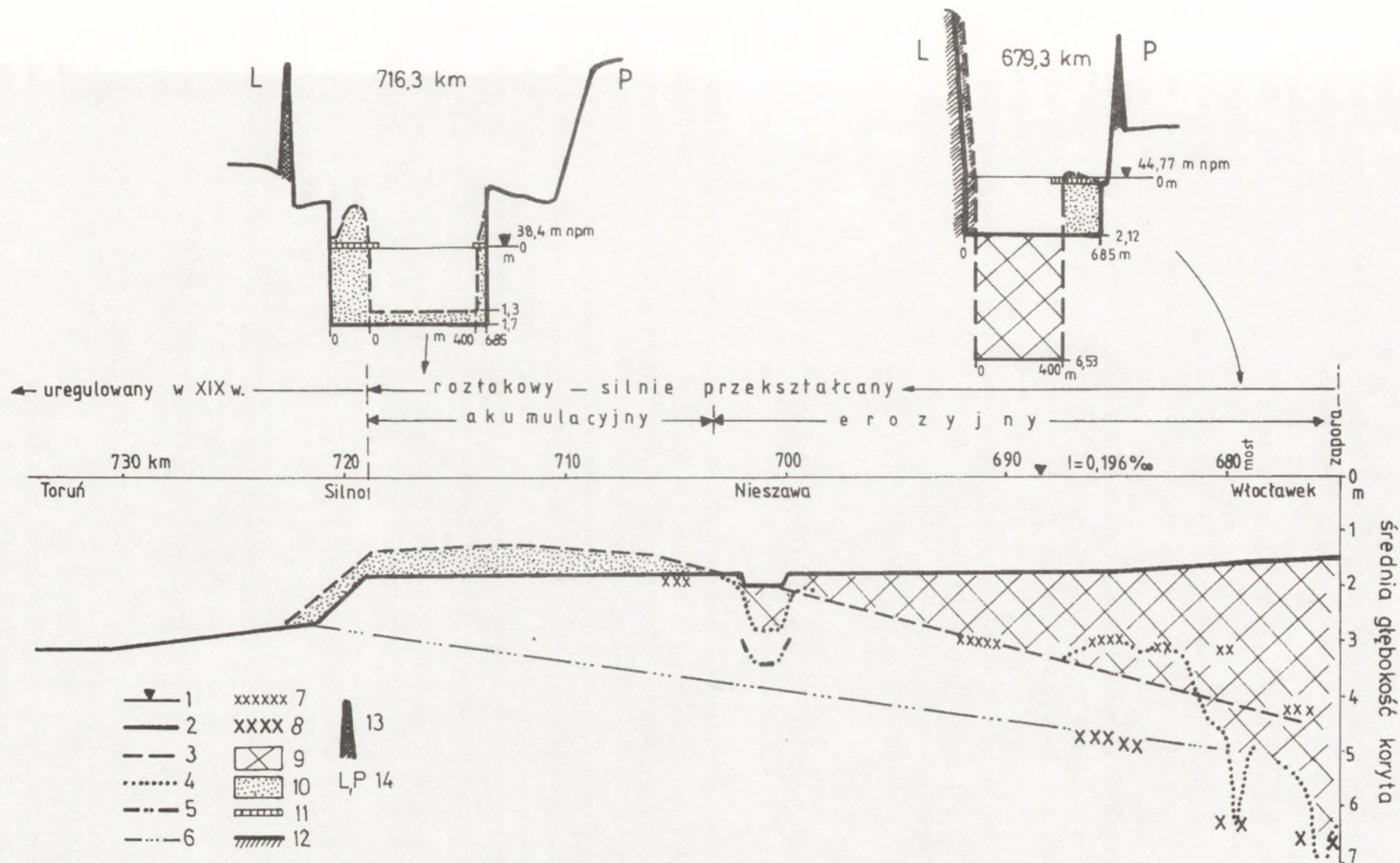
Analizując proces erozji wgłębnej poniżej zapory w latach 1970–1987 w kategoriach wartości uśrednionych, można zauważyć, że przeciętnie w ciągu roku następował ubytek materiału dennego w ilości 0,7 mln m<sup>3</sup>, zaś czoło strefy erozyjnej przemieszczało się z prędkością 1,1 km (tab.). Są to wartości pochodzące z bezpośrednich pomiarów całego odcinka erozyjnego.

Miejszem weryfikacji przebiegu procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej zapory w latach 1970–1987, a także miejscem ich dalszej analizy, stał się odcinek o długości 2 km (700–702 km) w Nieszawie. Jak wynika z danych średnich głębokości koryta tego odcinka, wyraźne pojawienie się tu strefy erozyjnej, z pogłębieniem koryta o 40 cm, nastąpiło na przełomie lat 1994/95. W roku następnym koryto uległo dalszemu pogłębieniu o 63 cm (ryc.5). Wskazuje to na przyspieszony – progowy charakter przebiegu procesu erozyjnego w ostatnim okresie. Wartość ta nawiązuje do intensywności procesu erozji wgłębnej w początkowym okresie działalności stopnia (1969/72), a także dla lat 1984/87. Należy przypuszczać, że zjawisko przyspieszonego procesu erozji wgłębnej poniżej zapory uzewnę-



Ryc. 4. Proste regresji erozji wglębnej (w profilu poprzecznym koryta – F i średniej głębokości – H) i bilansu rumowiska dennego od początku istnienia zbiornika do kolejnych lat badawczych 1969–95 wraz z wielkościami ubytku materiału dennego w mln m<sup>3</sup>





Ryc. 5. Rozwój procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej stopnia wodnego Włocławek wraz z ich prognozą do 2020 r.

1 – średni stan wody przed wybudowaniem stopnia wodnego, 2 – średnia głębokość koryta przed pracami regulacyjnymi, 3 – przeciętna (prosta regresji) głębokość koryta w 1995 r., 4 – średnia głębokość koryta w 1995 r. w odcinku nieszawskim, 5 – jak pkt 4 w 1996 r., 6 – średnia głębokość koryta w 2020 r. (prognoza), 7 – wychodne utworów trudno rozmywalnych w strefie brzegowej koryta, 8 – jak pkt 7 w dnie koryta, 9 – strefa erozyjna, 10 – strefa akumulacyjna, 11 – ostrogi rzeczne, 12 – umocnienia brzegów koryta, 13 – wały przeciwpowodziowe, 14 – L – lewy, P – prawy brzeg koryta

trznąło się nie tylko w wielkości obniżenia się dna, ale również we wzroście tempa przemieszczenia się czoła strefy erozyjnej, które aktualnie sięga 704 km biegu Wisły. Wzrost dynamiki strefy erozyjnej, ze względu na lokalny charakter i krótki czas trwania, podobnie jak we wcześniejszych okresach (1969/72, 1984/87), nie będzie miał większego wpływu na ogólny jego przebieg – zgodny z równaniami prostych regresji (ryc. 3). Tak więc obniżenie strefy dennej koryta do poziomu odcinka uregulowanego w końcu XIX wieku nastąpi do roku 2020 (ryc. 4), tak jak przewidywały wcześniejsze prognozy (Babiński 1992). Przyspieszenie procesu erozji wgłębnej na odcinku nieszawskim ma niewątpliwie związek z jego wkroczeniem w strefę przewężonego koryta Wisły. Natomiast w poprzednich okresach było to związane odpowiednio ze wzrostem energii kinetycznej wód w bezpośrednim sąsiedztwie zapory (1969–1972), a następnie (1984–1987) z wyłączeniem z procesów korytowych dużej ilości wyerodowanego z dna materiału dennego (rumowiska) i ograniczeniem ich do wąskiej strefy regulacyjnej. W ostatnim okresie było to uwarunkowane niskimi stanami (przeływami) wody, które rzadko przekraczały poziom nowo tworzonej równiny zalewowej (Babiński 1992). Zmiana morfometrii koryta oraz reżimu hydrologicznego (lata suche – wilgotne) są głównymi czynnikami modyfikującymi ogólnie prostoliniowy przebieg procesu erozji wgłębnej poniżej zapory.

## V. KONSEKWENCJE EROZJI WGLĘBNEJ

Proces erozji wgłębnej poniżej zapory, w zależności od jego tempa rozwoju w czasie i przestrzeni, przyczyniał się i nadal powoduje zmiany w środowisku rzeczonym zarówno w morfologii łóżyska rzeki, jak i w zjawiskach hydrologicznych, a także oddziałuje na gospodarkę człowieka. Przekształcenia dna doliny uzewnętrzniają się przede wszystkim w postaci dwu stref akumulacyjnych, z których jedna – w formie nowo tworzonej równiny zalewowej – towarzyszy odcinkowi erozyjnemu, druga zaś – poniżej czoła fali erozyjnej – nadaje temu odcinkowi koryta charakter agradacyjny. Te procesy akumulacyjne, wraz z rozwojem strefy erozyjnej, tworzą nowe stosunki wodne w obrębie dna doliny, które z kolei mają negatywny wpływ na istniejącą – nie dostosowaną do nowych warunków – zabudowę hydrotechniczną.

### 1. Procesy akumulacyjne

#### a. Równina zalewowa

Tworzenie się nowego poziomu zalewowego odpowiada generalnie warunkom, jakie występują w przypadku prac regulacyjnych rzek, gdzie pogłębianiu się strefy regulacyjnej (między lewo- i prawobrzeżnymi ostrogami) towarzyszy spływanie obszaru między kolejnymi ostrogami (Babiński 1985, 1987, 1991, 1992). Ten dwukierunkowy rozwój procesów korytowych w odniesieniu do prac regulacyjnych przebiega generalnie w sposób unimorficzny na całej trasie podlegającej zabudowie hydrotechnicznej. W przypadku XIX-wiecznych prac regulacyjnych dolnej Wisły na odcinku od ujścia Tażyny do Bałtyku, na wykształcenie się nowego poziomu zalewowego (koryta) potrzeba było ponad 40 lat (Babiński 1992). Tymczasem równina zalewowa poniżej zapory tworzona jest w sposób

niejednostajny, transgresywny – od stopnia wodnego w dół rzeki, z większą, niż w przypadku samej regulacji rzeki, dynamiką. Ponadto, na skutek braku dostawy rumowiska z górnej części zlewni Wisły (całkowita akumulacja materiału w zbiorniku), ograniczone są możliwości pionowego przyrostu poziomu zalewowego. Dotyczy to szczególnie bezpośredniego sąsiedztwa zapory, gdzie jego powierzchnia może być jedynie modelowana (także obniżana) dzięki dobowym wahaniom stanów wody, względnie „podnoszona” dzięki pogłębianiu się strefy regulacyjnej.

Jak już wspomniano, układ przestrzenny nowego poziomu zalewowego jest ściśle związany z rozwojem strefy erozyjnej poniżej zapory. W początkowej fazie działalności zbiornika – do 1972 roku – następowało szybkie wypełnianie rumowiskiem obszarów zaprawowych rzeki, a więc zakępowych odnog bocznych koryta oraz stref międzyostrogowych. Sprzyjały temu procesowi zarówno duże wahania stanów wody związane z bliskością stopnia wodnego, jak również niestabilizowane warunki hydrodynamiczne koryta rzeki roztokowej. Później następowało powolne wykształcanie się równiny zalewowej, zakończone w latach osiemdziesiątych utwaleniem jej powierzchni przez roślinność (fot. 1, 2). Do 1984 roku powstał poziom zalewowy o długości około 16 km (ryc. 4), który do końca analizowanego okresu (1995) rozprzestrzenił się już na odcinku ponad 26 km, osiągając miejscowość Nieszawę (ryc. 5). Nowy poziom zalewowy, ze względu na dużą zmienność stanów wody oraz trwający nieustannie proces pogłębiania się dna koryta strefy regulacyjnej, nie uległ do chwili obecnej pełnemu wykształceniu. Dzięki temu składa się on z kilku masywów o silnie zróżnicowanej powierzchni i różnym stopniu rozwoju.

Najlepiej wykształcony jest prawobrzeżny poziom, usytuowany w sąsiedztwie zapory o długości około 10 km i szerokości 50–550 m. W jego skład wchodzi dwie wyspy – Włocławska i Grodzka (Babiński 1982) połączone odsypami piaszczystymi. Aktualnie



Fot. 1. Nowo tworzony, prawobrzeżny poziom zalewowy powyżej mostu drogowego we Włocławku, w skład którego wchodzi kępa Włocławska (w tle) oraz odsyp brzegowy (na pierwszym planie)



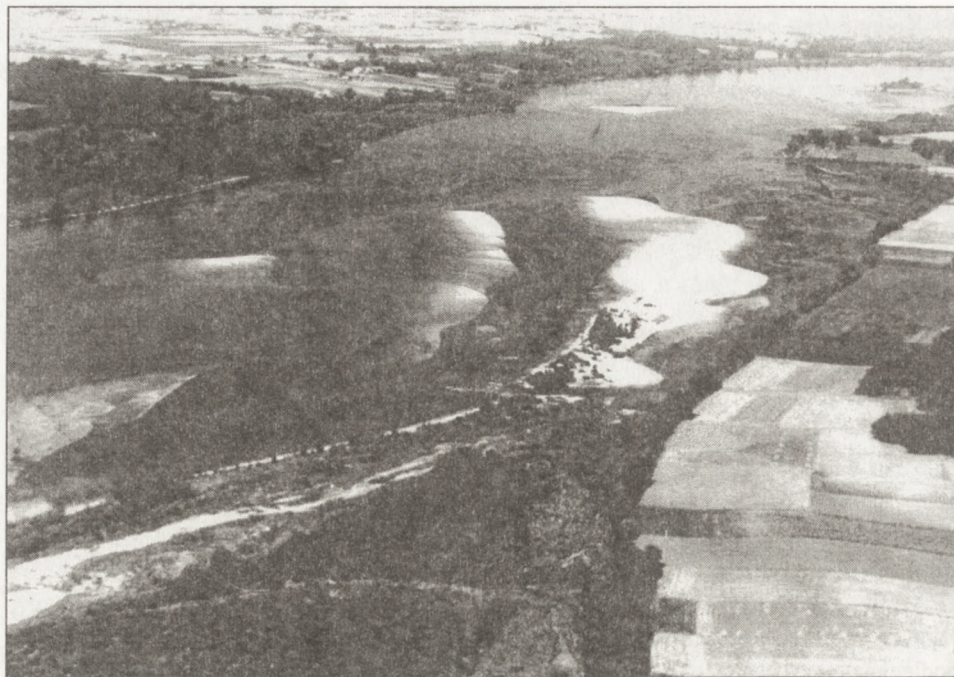
Fot. 2. Nowo tworzony, prawobrzeżny poziom zalewowy poniżej mostu drogowego we Włocławku w formie odsypu brzegowego porośniętego trawą i krzewami, uniemożliwiający funkcjonowanie portu zimowego

porasta go roślinność trawiasto-krzaczasta (fot. 1, 2). W związku z tym, że w strefie występowania nowej równiny zalewowej rzeka nie transportuje rumowiska wlezonego (całkowita akumulacja rumowiska wlezonego w zbiorniku oraz tylko śladowa dostawa materiału z erozji dna koryta), nie następuje jej dalszy przyrost pionowy w formie utworów facji korytowej, lecz tylko poprzez osady facji powodziowej. Ten typowy dla równin zalewowych proces dekantacji utworów ilastych i mułków może następować w wyniku przepływaniu rumowiska unoszonego przez stopień wodny. Czynnikiem modyfikującym proces tworzenia się tego fragmentu równiny zalewowej jest fakt częstego włączania jego powierzchni do procesów korytowych dzięki dobowym wahaniom stanów wody. W wyniku wlewania się wód na powierzchnię równiny uaktywnia się proces erozji (a tym samym i akumulacji) o charakterze lokalnym, kształtując nową rzeźbę. Z czasem czynnik ten będzie się jednak stawał coraz mniej aktywny. Jest to związane z utrwalaniem powierzchni równiny przez roślinność.

Efektom procesu erozji w głębszej poniżej zapory wraz z pracami regulacyjnymi koryta jest także lewobrzeżny poziom zalewowy ciągnący się od kępy Grodzkiej (681 km) do końca kępy Korabnickiej (687 km) (zał.). W skład tej równiny zalewowej o długości 6 km i szerokości 50–400 m wchodzi, oprócz nowo powstałych obszarów między ostrogami rzecznyymi, rozczłonkowane kępy: Krzywogórska i Korabnicka (Babiński 1982). Poziom ten, podobnie jak wyżej opisany prawobrzeżny, podlega tym samym procesom korytowym i tym samym przekształceniom. W obydwu przypadkach są to odsypy brzegowe o wydłużonych kształtach (6–10 km długości) i nieznacznie krętym przebiegu linii brzegowej (trasa regulacyjna). Ich powierzchnie wznoszą się od 0,5 m (nowo utworzone) do 3,5 m (obszary kępy) ponad aktualny, średni stan wody.

Kolejne trzy poziomy zalewowe (2 prawobrzeżne od 687 do 689 km i od 690,5 do 693,5 km oraz lewobrzeżny – 688–691 km biegu Wisły), w przeciwieństwie do wyżej usytuowanych (opisanych) masywów, charakteryzują się inną morfometrią i morfodynamiką. Są one krótsze (2–3 km długości), zaś ich szerokości wynoszą od 400 do 750 m. Powstały głównie w wyniku prac regulacyjnych polegających na zamknięciu odnog bocznych rozczłonkowujących m. in. kępy Rachcińską i Suchą, a następnie ich wypełnieniu przez utwory piaszczyste wyerodowane z dna trasy regulacyjnej. Są to więc masywy brzeżne utworzone w znacznym stopniu z dawnych wysp. Z kolei przebieg trasy regulacyjnej sprawił, że poziomy te są stosunkowo krótkie o dużej krętości linii brzegowej. Ten meandrowy charakter nurtu, wymuszony przez ostrogi rzeczne, ukształtowałyby niemal „doskonały” system rzeczny na tym odcinku Wisły, gdyby nie zbyt duża krzywizna trasy regulacyjnej w górnej części prawobrzeżnej kępy Suchej, powstała w wyniku zamknięcia ostrogą równoległą odnogi bocznej tej kępy (zał.). Ta nieprawidłowość w usytuowaniu ostrogi w odniesieniu do lokalnych warunków hydrodynamicznych rzeki sprawia, że budowla ta ulega ustawicznej dewastacji przez wody Wisły. Ten fragment obszaru między ostrogami nie podlega także wypełnieniu rumowiskiem wleczonym. W pozostałych przypadkach zamknięcie ostrogami odnog bocznych w/w kęp prowadzi do ich scalania i tworzenia nowego poziomu zalewowego. Proces ten, pomimo znacznej odległości od stopnia wodnego i tym samym mniejszej głębokości wcięcia się koryta w strefie regulacyjnej (1,5–2,5 m – zał.), a także dzięki dużemu udziałowi dawnych wysp i małej przestrzeni podlegającej wypełnieniu (wąskie odnogi boczne), jest na tyle intensywny, że po 27 latach eksploatacji zbiornika powierzchnia równiny zalewowej ma charakter niemal dojrzały, ukształtowany. Jest ona bowiem pokryta i utrwalona przez roślinność, zaś w jej strefie przykorytowej powstał (i tworzy się nadal) wał brzegowy typu *levee*.

Najbardziej odległy od zapory, lecz tylko prawobrzeżny fragment nowo tworzonej równiny zalewowej, związany jest z czołem strefy erozyjnej o obniżonym dnie koryta od 1,5 m (ok. 693 km) do 0 m (702–703 km). Jego długość wynosi ok. 8 km, zaś szerokości od 50 do 300 m (zał.). Znajduje się aktualnie w fazie inicjalnej. Oznacza to, że powierzchnia tego poziomu nie jest umocniona przez roślinność i w przeważającej części podlega w dalszym ciągu procesom korytowym. Można więc przyjąć, że poziom ten aktualnie odpowiada bardziej charakterowi odsypu brzegowego niż równinie zalewowej (Babiński 1982). Ten stan chwiejnej równowagi dynamicznej formy wynika z jej peryferyjnego położenia względem stopnia wodnego – o czym wspomniano wyżej, ale przede wszystkim z niewłaściwych (nie zakończonych) na tym odcinku koryta, prac regulacyjnych. Prace regulacyjne polegały tu bowiem na stałym uzupełnianiu prawobrzeżnej (lewy brzeg jest bądź umocniony, bądź stanowią go wyższe poziomy terasowe Wisły) zabudowy hydrotechnicznej w postaci zróżnicowanych przestrzennie i pod względem długości ostróg rzecznych, nie zawsze zgodnych z warunkami hydrodynamicznymi rzeki i „meandrowym” przebiegiem trasy regulacyjnej. Dotyczy to przede wszystkim górnego analizowanego odcinka w km 693–695. Tu, na skutek złej zabudowy hydrotechnicznej – polegającej na budowie zbyt krótkich ostróg rzecznych usytuowanych tylko w strefie brzegowej koryta (powinny mieć długość do 750 m), następuje stały, nieustabilizowany, skierowany ku środkowi koryta przyrost odsypu brzegowego (inicjalny poziom zalewowy) w postaci kolejnych jego faz rozwoju (fot. 3). Stwarza to, wraz z występowaniem w korycie trasy regulacyjnej łańcuch piaszczystych, ogromne trudności dla żeglugi. Ponadto utrudnia to proces integracji nowo tworzonego poziomu zalewowego. Aktualnie tylko włączone do



Fot. 3. Fazy rozwoju równiny zalewowej powyżej Bobrownik w postaci kolejnych trzech ciągów łach bocznych-centralnych (lipiec 1988)



Fot. 4. Faza inicjalna nowego poziomu zalewowego pod Bobrownikami (lipiec 1988)

tego poziomu powierzchni kęp i wyższe jego partie są pokryte roślinnością (fot. 4). Jednak duży udział w tym umacnianiu formy mają małe przepływy Wisły (suche lata 1983–1995 – ryc. 1). Należy jednak przypuszczać, że postępujący rozwój strefy erozyjnej i pogłębianie się dna koryta (obniżenie dna o ponad 1,5 m) spowoduje pełne wykształcenie się równiny zalewowej. Jak wykazuje prognoza (Babiński 1992), może to już nastąpić w latach 2010–2020, gdy czoło strefy erozyjnej osiągnie odcinek uregulowany Wisły poniżej Niziny Ciechocińskiej (ryc. 5, pkt. 6).

## **b. Odcinek agradacyjny**

Jak już wspomniano wyżej, w wyniku procesu erozji wgłębnej poniżej zapory, następuje „uzupełnianie” wód rumowiskiem wleczonym. Część tego rumowiska przechwytyują zaprawdowe obszary międzyostrogowe już w sąsiedztwie strefy erozyjnej (nowa równina zalewowa), część natomiast transportowana jest w dół rzeki. Po osiągnięciu przeciętnej wartości rocznej transportu – ok. 0,7 mln m<sup>3</sup>, która jest wielkością progową dla mocy transportowej dolnej Wisły (Babiński 1992), „zrzuca” go, tworząc odcinek o wymuszonej akumulacji. Ten agradacyjny charakter procesu korytowego nadaje Wiśle na tym odcinku zarys typowej rzeki roztokowej z licznymi łachami centralnymi i bocznymi (Babiński 1992) (zał.), (fot. 3). Powierzchnie tych łach są wyższe niż ich odpowiedniki na innych odcinkach koryta nieuregulowanego (roztokowego) Wisły, np. w okolicy Wyszogrodu, i wynurzają się o prawie 0,2–0,4 m ponad średni stan wody. Są one dzięki temu wskaźnikiem pojawienia się strefy akumulacyjnej poniżej stopnia wodnego.

Położenie odcinka agradacyjnego jest ściśle związane z dynamiką czoła fali erozyjnej. Jak wykazały badania terenowe, po czterech latach działalności zbiornika odcinek akumulacyjny znajdował się między 9 a 20 km poniżej zapory. Strefa denną koryta na tym odcinku podniosła się średnio o około 0,21 m (Babiński 1982, 1992). Natomiast do połowy lat osiemdziesiątych odcinek ten przesunął się o dalsze 7 km w dół rzeki, by w końcu analizowanego okresu (1995) znajdować się już na wysokości Niziny Ciechocińskiej, tj. w km 703–720 (zał., ryc. 5). W ten sposób proces agradacji rzeki wkroczył w odcinek Wisły uregulowanej w XIX w.

Wielkość agradacji rzeki ujętą nie jak to wyżej scharakteryzowano – w formie wysokości łach, lecz średniej głębokości koryta, obliczono na podstawie pomiarów batymetrycznych koryta Wisły w km 700–702 (odcinek nieszawski), przy uwzględnieniu stałej wysokości zwierciadła wody na wodowskazie w Nieszawie – 387 cm. Jak wynika z analizy planimetrycznej planów batymetrycznych, od drugiej połowy lat 70-tych do połowy lat 80-tych odcinek przejawiał stałą (oscylacyjną) tendencję głębokości koryta mieszczącą się w granicach 2,42–2,44 m. W 1987 r. zanotowano wyraźne zmniejszenie się średniej głębokości do 1,99 m, odpowiadającej parametrom koryta rzeki roztokowej (Babiński 1992). Jak się później okazało, było to największe spłylenie koryta, wskazujące na maksymalną agradację rzeki. Biorąc pod uwagę cały odcinek akumulacyjny, mieszczący się w tym czasie w km 698–718, to niewątpliwie maksimum agradacji rumowiska dennego znajdowało się w jego części końcowej (górnjej), leżącej w sąsiedztwie czoła fali erozyjnej, a nie jak wynikałoby z bezpośrednich obserwacji terenowych łach – na początku jego strefy. Ma to swe uzasadnienie w rozkładzie energii rzeki i jej mocy transportowej. Proces akumulacji materiału wlezonego na odcinku agradacyjnym koryta odbywa się bowiem na podobnych zasadach jak m. in. podczas powodzi w obrębie równiny zalewowej czy kęp, gdzie

najintensywniej przebiega on w bezpośrednim kontakcie z dynamicznym korytem (nurtem rzeki), wygasając następnie wraz z oddalaniem się od tej strefy.

Od 1987 roku obserwuje się obniżanie dna koryta Wisły w odcinku nieszawskim. Już w roku następnym koryto średniej wody obniżyło się o 19 cm (średnia głębokość koryta – 2,18 m), wskazując na to, że jest to jeszcze w dalszym ciągu odcinek o charakterze akumulacyjnym. Dopiero w połowie lat 90-tych stwierdzono wyraźne obniżenie się dna koryta, podczas którego w 1995 r. osiągnięto ono średnią głębokość 2,84 m, zaś już w 1996 r. – 3,47 m. Na bazie tych danych należy przypuszczać, że pojawienie się na odcinku nieszawskim strefy erozyjnej nastąpiło dopiero w roku 1995, natomiast poprzedzający je okres z obniżonym (obniżającym się) dnem odpowiadał warunkom strefy przejściowej między agradacją a erozją wgłębną. Oznacza to, że między odcinkiem o charakterze erozyjnym i agradacyjnym nie istnieje wyraźna granica, lecz kilkukilometrowej długości strefa przejściowa. W związku z tym w czołowej części strefy erozyjnej mogą występować formy akumulacyjne typu łach, zaś usytuowana w sąsiedztwie końcowa części strefy agradacyjnej, może podlegać już procesowi obniżania się. Aktualnie odcinek ten mieści się w km 694–704 Wisły (zał.), przy czym jego przeważająca część znajduje się w strefie erozyjnej, towarzyszącej odcinkowi nowo tworzonej równiny zalewowej (faza inicjalna). Niewątpliwie fakt ten wiąże się z nie zakończonym procesem korytowym na tym odcinku, gdzie w dalszym ciągu w rozwoju koryta bierze czynny udział materiał chwilowo zdeponowany na poziomie zalewowym.

Proces tworzenia się nowego poziomu zalewowego towarzyszy nie tylko strefie erozyjnej, o czym wspomniano wyżej, lecz także ma miejsce w sąsiedztwie strefy agradacyjnej (ryc. 5). W przypadku strefy akumulacyjnej ogromną rolę w jej kształtowaniu odgrywają prace regulacyjne przy współudziale dużej dostawy rumowiska wleczonego. Przeładowana rumowiskiem rzeka gwarantuje bowiem dostawę materiału do budowy i pełnego jego wykształcenia się, w przeciwieństwie do wcześniej powstałej równiny w sąsiedztwie zapory. Niestety, niepełna (niesystematyczna) zabudowa hydrotechniczna tego ciągnącego się w km 703–719 km odcinka Wisły, utrudnia właściwe wykształcenie się poziomu zalewowego. Stąd też w chwili obecnej reprezentuje on typ rzeki roztokowej z licznie nagromadzonymi beładnie w korycie łachami piaszczystymi, centralnymi i bocznymi. Z tego względu odcinek ten stanowi ogromne utrudnienia dla żeglugi, a także jest dużym zagrożeniem dla tworzenia się niebezpiecznych dla Niziny Ciechocińskiej, zatorów sryżowo-łodowych. Zjawisko to ulegnie zanikowi z momentem pełnego wykształcenia się poziomu zalewowego, który według prognoz nastąpi po roku 2020 (Babiński 1992).

## 2. Zjawiska hydrologiczne

Proces intensywnej erozji wgłębnej poniżej zapory we Włocławku spowodował i przyczynia się w dalszym ciągu do zmian w przebiegu zjawisk hydrologicznych. Jest to związane przede wszystkim z ustawicznym obniżaniem się na odcinku erozyjnym zwierciadła wody w Wiśle. Zmiany te można generalnie rozpatrywać w dwóch wymiarach: w odniesieniu do całego analizowanego odcinka oraz w ujęciu lokalnym. W pierwszym przypadku dotyczy to wartości przeciętnego spadku zwierciadła wody na odcinku erozyjnym, w drugim zaś – jego modyfikacji wynikających z lokalnej zmienności przebiegu procesów erozyjnych warunkowanych budową geologiczną dna koryta.



Podstawowym materiałem do obliczenia spadku zwierciadła wody są stany wody dwóch lub więcej punktów obserwacyjnych. Od początku działalności stopnia wodnego funkcjonowały na analizowanym odcinku dwa posterunki obserwacyjne: stopień wodny – dolna woda (674,85 km) oraz wodowskaz (limnigraf) we Włocławku (679,4 km). Porównanie stanów wody z tych wodowskazów, odległych od siebie o 4,55 km, wykazało, iż w pierwszych czterech latach działalności stopnia wodnego średni spadek zwierciadła wody zmalał z 0,196‰ do 0,109‰ (Babiński 1992). W tym samym czasie notowano chwilowe spadki zwierciadła wody, powodowane szczytowo-interwencyjną pracą elektrowni, dochodzące maksymalnie do 0,45‰, w okresie zaś minimalnego upustu wód ze zbiornika (zamknięte jazy), do około 0,01‰ (Babiński 1982). Niestety, była to jedyna tego typu analiza spadku zwierciadła wody Wisły na odcinku erozyjnym oparta na bezpośrednich pomiarach stanów wody pochodzących z tzw. dolnej wody i limnigrafu we Włocławku (z jednogodzinnym opóźnieniem w odczycie), ponieważ w całości mieścił się on w tym okresie między punktami wodowskazowymi.

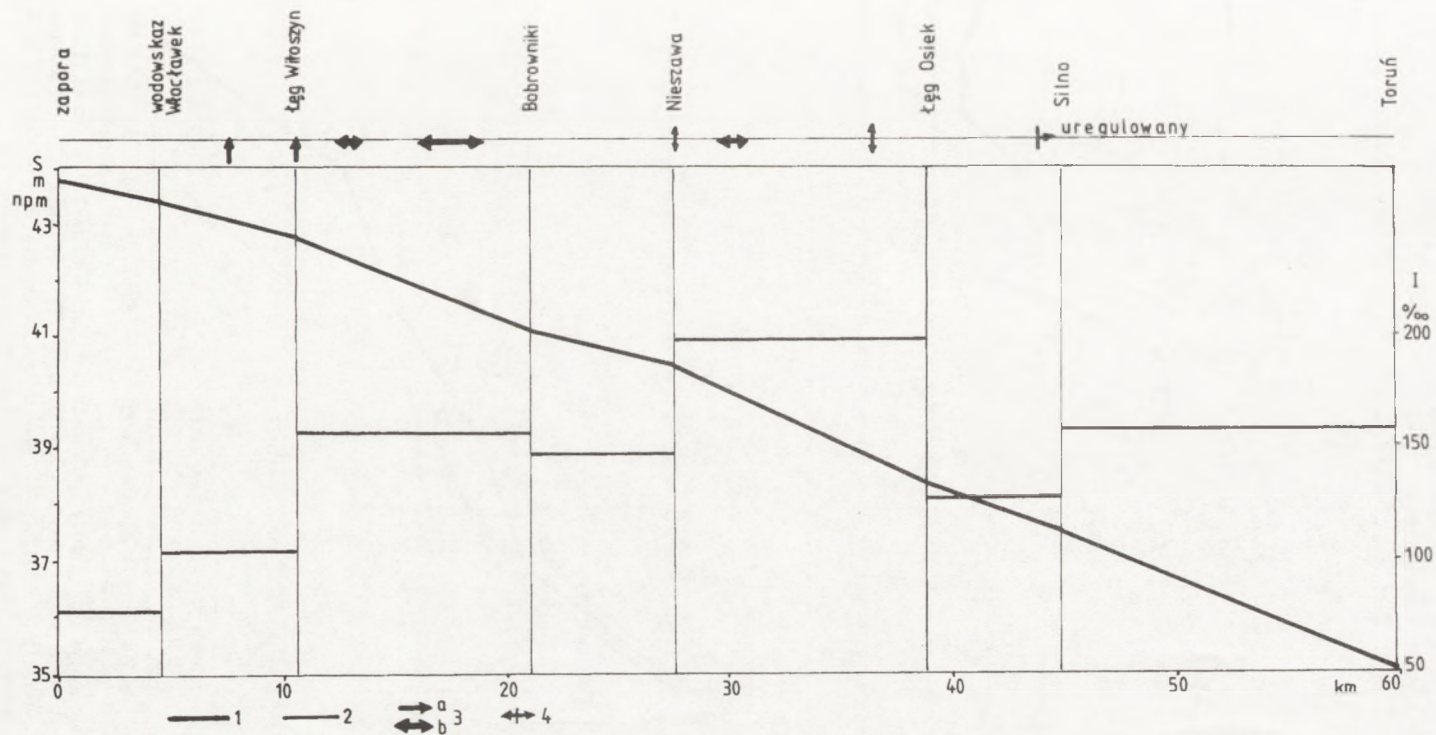
Po przesunięciu się czoła strefy erozyjnej poza wodowskaz Włocławek spadki zwierciadła wody i dna koryta obliczano metodą pośrednią z użyciem równań prostych regresji przedstawionych na rycinie 4 (Babiński 1982, 1992). Z ich analizy statystycznej wynika, że w 1972 r. spadek zwierciadła wody podczas trwania średnich niskich stanów wody wynosił tylko 0,033‰. W okresie występowania tzw. wody brzegowej wzrastał on ponad dwukrotnie, osiągając wartość 0,078‰. Generalnie są to więc wartości zaniżone ponad trzykrotnie dla koryta ograniczonego stanem SNW i prawie 1,4-krotnie dla koryta wody brzegowej w stosunku do tych, które otrzymano drogą analizy hydrologicznej. Za przyczynę tych rozbieżności należy niewątpliwie uznać zastosowanie dwóch różnych metod badawczych: hydrologicznej i geomorfologicznej. Pierwsza z nich, bazująca na bezpośrednich pomiarach terenowych, określa rzeczywisty spadek zwierciadła wody, będący elementem składowym reżimu hydrologicznego rzeki. Z kolei metoda geomorfologiczna, o charakterze pośrednim, obarczona jest większymi błędami pomiarowymi. Dotyczy to szczególnie uwzględnienia w przebiegu prostej regresji intensywnego procesu erozji w bezpośrednim sąsiedztwie zapory, gdzie lokalne spadki dna koryta mogą być równe zeru, a nawet przyjmują wartości im przeciwne! (w 1974 r. spadek dna koryta zmalał o 0,222‰, co przy spadku zwierciadła wody przed wybudowaniem stopnia – 0,196‰ – daje wartość spadku dna 0,026‰ – ale o tendencji przeciwnej). Metoda ta ma jednak tę zaletę, że daje możliwość określenia w analizowanym przypadku warunków hydrodynamicznych rzeki na odcinku dłuższym niż 4,55 km. Pozwala na badania tych zmian wraz z rozwojem strefy erozyjnej w czasie. Na tej m. in. podstawie stwierdzono, że po 1972 roku następował dalszy wzrost spadku dna koryta, a wraz z nim zwierciadła wody. I tak już w 1984 r. dla koryta ograniczonego średnim stanem wody wynosił on 0,063‰, a dla wody brzegowej – 0,099‰ (przeciętnie 0,080‰) (Babiński 1992). Następne pomiary, przypadające na lata 1987 i 1995, potwierdziły te tendencje wzrostowe. Ujawniły zarazem pewną stabilizację dna koryta w bezpośrednim sąsiedztwie zapory (ryc. 4). Taki kierunek rozwoju przeciętnego spadku dna koryta i zwierciadła wody w strefie erozyjnej będzie występował do chwili osiągnięcia przez czoło fali erozyjnej odcinka uregulowanego Wisły. Wówczas średni spadek dna koryta i zwierciadła wody osiągną wartość nieznacznie przewyższającą tę sprzed okresu wybudowania stopnia wodnego – 0,196‰ (wzrost spowodowany pracami regulacyjnymi koryta).

Podczas badań terenowych prowadzono również pomiary zwierciadła wody na wybranych odcinkach, na specjalnie zainstalowanych w tym celu wodowskazach w Łęgu Witoszynie (685,3 km), Bobrownikach (695,8 km), Łęgu Osieku (713,5 km), w nawiązaniu do już istniejących wodowskazów IMGW we Włocławku (679,4 km), Nieszawie (702,4 km), Silnie (719,8 km) oraz w Toruniu (734,7 km). W ten sposób dokonano podziału analizowanego koryta Wisły na odcinki o długości mierzonej od zapory (0 km): 1–4,6 km, 2–5,9 km, 3–10,5 km, 4–6,6 km, 5–11,1 km, 6–6,3 km i 7–14,9 km – łącznie 59,9 km (zał.). Dla przykładu podano tylko dane ostatniego pomiaru wykonanego 21 września 1995 r., przy stanie wody na zaporze 43,78 m npm i w Toruniu 35,05 m npm ( $h = 309$  cm). Pomiary były wykonane podczas spływu statkiem. Dzięki temu otrzymano spadki odpowiadające danemu przepływowi rzeki ( $832 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), a nie dla określonego czasu, na co ma duży wpływ ruch nieustalony wody poniżej zapory (ryc. 6). Ponadto uznano, że przy przepływie mniejszym niż średni roczny, spadki będą bardziej zróżnicowane, ujawniając tym samym wpływ na nie budowy geologicznej dna koryta.

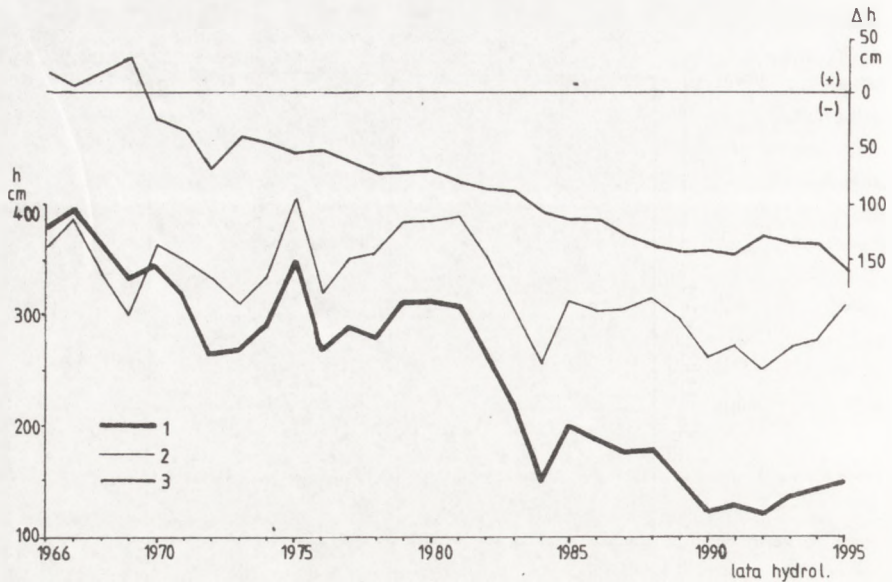
Jak wynika z wartości spadków zwierciadła wody na poszczególnych odcinkach (ryc. 6), największe z nich mieszczą się w strefie nr 3 (0,168‰) i 5 (0,194‰), zaś najmniejsze w strefie przyzaporowej nr 1 (0,077‰) i 2 (0,108‰), a także nr 4 (0,093‰) i 6 (0,129‰). Znaczne obniżenie spadku zwierciadła wody i dna koryta w bezpośrednim sąsiedztwie zapory jest w dalszym ciągu związane z intensywnym procesem erozyjnym „oczyszczającym” strefę regulacyjną z aluwii, a także ma na nie wpływ „podparcie” wód przez występujące w dnie koryta i na jego prawym brzegu progi ilasto-gliniaste, często pokryte głazami (zał., ryc. 6). W strefie progów, a także poniżej nich, spadki wzrastają. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku odcinka nr 5 poniżej Nieszawy, gdzie dodatkowym czynnikiem powodującym z jednej strony podpiętrzenie wód i zmniejszenie spadku zwierciadła w górę rzeki, a z drugiej jego wzrost w dół rzeki, jest przewężenie koryta w 702 km, jak również próg w dnie koryta w 705 km. Zwierciadło wody na odcinku uregulowanym, tzn. od Silna do Torunia, w chwili obecnej ma niemal taki sam spadek (0,165‰) jak w okresie przed wybudowaniem zbiornika (0,161‰ – Babiński 1992). Należy przypuszczać, że postępujący proces erozji wgłębnej będzie powodował dalsze różnicowanie spadków zwierciadła wody i dna koryta całego analizowanego odcinka. Dotyczy to szczególnie okresu trwania średnich, a tym bardziej niskich stanów wody. W przypadku bowiem przepływów pełnokorytowych, bądź powodziowych, spadek zwierciadła wody „wyrównuje się”, przyjmując wartość nieznacznie większą niż średni spadek dla całego badanego odcinka, wynoszący aktualnie 0,146‰. Jak już wspomniano, do roku 2020 wzrośnie on do 0,196‰, a nawet go przekroczy.

Dokładna analiza danych hydrologicznych pozwala, oprócz możliwości określania wielkości hydromorfologicznych koryta w postaci spadków dna i zwierciadła wody, na stwierdzenie ilościowe efektów procesu erozji wgłębnej poniżej zapory. Służą do tego nie tylko bezpośrednie dane w postaci stanów wody, ale przede wszystkim ich wartości uśrednione – wieloletnie. Tego typu analizę przeprowadzono w ujęciu wartości średnich rocznych oraz dla pięcioleci od okresu poprzedzającego powstanie zbiornika (1966) do chwili obecnej (1995), dla posterunków wodowskazowych Włocławek i Toruń (jako punkt nie będący pod wpływem stopnia wodnego) (ryc. 7).

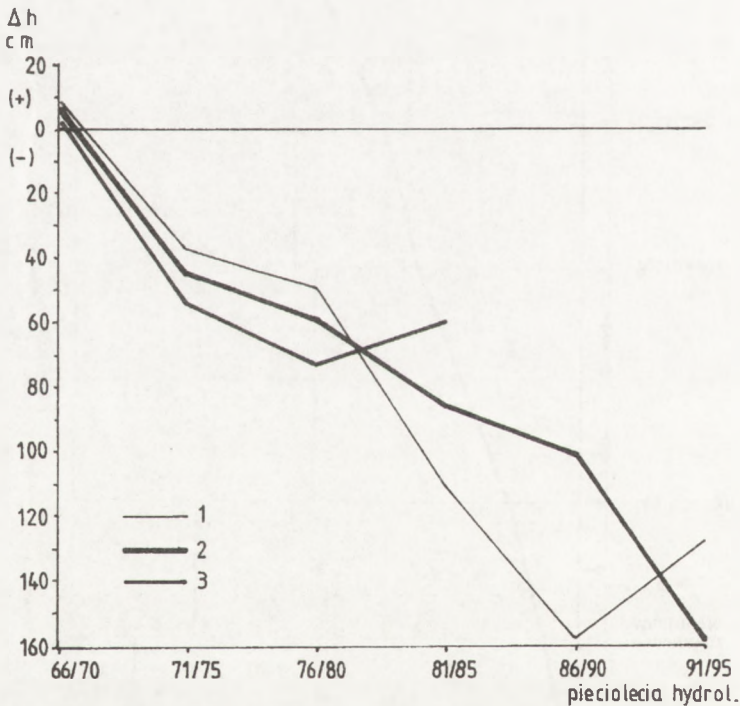
Przed wybudowaniem stopnia wodnego Włocławek stany wody mierzone w obydwu analizowanych punktach miały wartości względne podobne, przy czym we Włocławku były one przeciętnie w pięcioleciu 1966–1970 o 12 cm wyższe (ryc. 7). Różnica ta wów-



Ryc. 6. Spad dna koryta w m n.p.m. (1) i jego spadki w ‰ w poszczególnych odcinkach (2) w dniu 21.09.1995 r., na tle budowy geologicznej-progów (3): a – prawobrzeżnych, b – występujących w korycie, a także przewężeń koryta (4)



Ryc. 7. Średnie roczne stany wody Wisły (h) w profilu: 1 – Włocławek i 2 – Toruń i różnice między nimi ( $\Delta h$ ) – 3



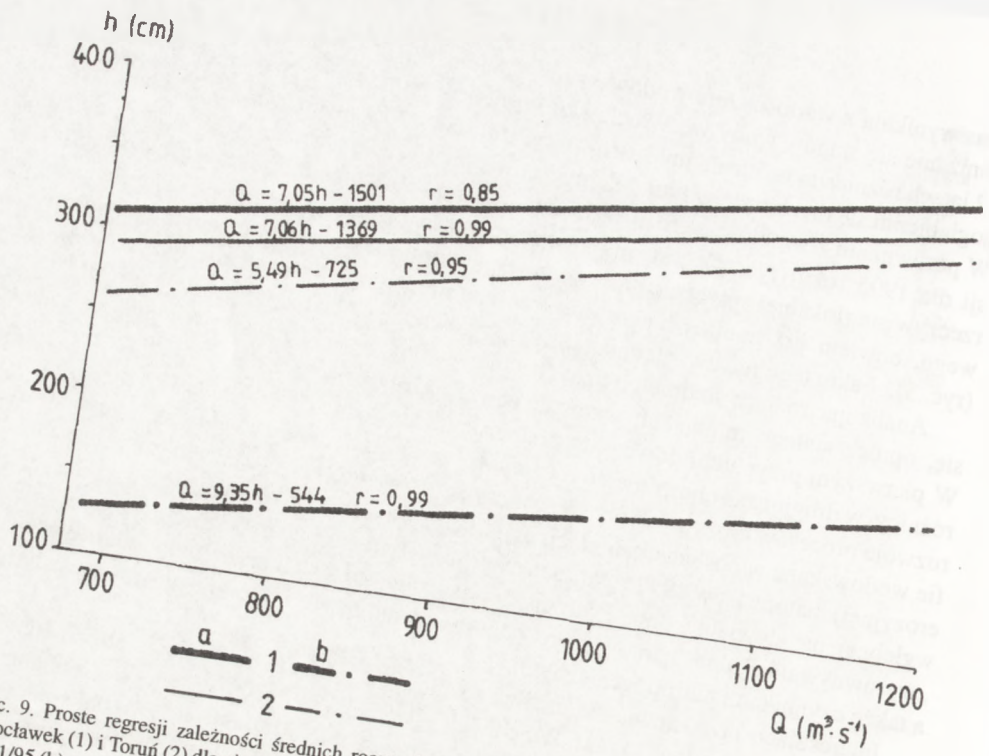
Ryc. 8. Różnice ( $\Delta h$ ) w stanach wody między wodowskazami Włocławek (W) i Toruń (T) dla określonych średnich rocznych przepływów: minimalnych –  $577 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (W) i  $640 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (T) – 1, średnich wieloletnich 1966/95 – odpowiednio  $971$  i  $1007 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  – 2 oraz maksymalnych  $1344$  (W) i  $1458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (T) – 3, obliczonych z równań prostych regresji dla poszczególnych pięcioleci hydrologicznych

czas wynikała z wartości zera wodowskazowego. Od 1970 roku następowało ustawiczne obniżanie się stanów wody we Włocławku względem punktu obserwacyjnego Toruń. Po 12 latach różnica ta wynosiła już 1,0 m, zaś w 1995 roku 1,71 m, co świadczy o wyraźnym pogłębieniu się dna koryta w tym odległym o 4,6 km od zapory profilu wodowskazowym. W porównaniu z wielkością erozji wgłębnej dla tego przekroju, obliczoną z prostej regresji dla 1995 roku (ryc. 4), jest ona prawie o 1 m zaniziona (2,7 m). Niewątpliwie to rzeczywiste (lokalne) spłylenie dna koryta jest związane z wpływem na nie mostu drogowego, bowiem już poniżej niego zaznacza się strefa pogłębionego o ponad 1 m dna (ryc. 5). Faktu tego nie uwzględnia jednak „wyrównujący” charakter prostej regresji.

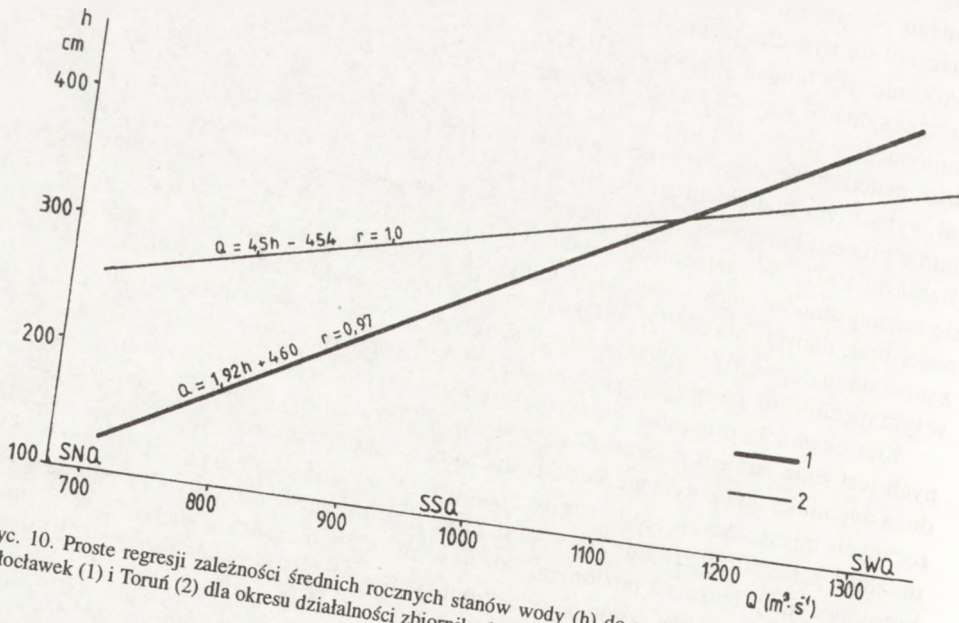
Analizując różnice średnich rocznych stanów wody we Włocławku i Toruniu zauważa się, oprócz stałego trendu ich wzrostu, pewne odchylenia w 1969 i 1972 r. (ryc. 7). W pierwszym przypadku dotyczy to podniesienia się stanów we Włocławku do +34 cm różnicy, w drugim zaś obniżenie do różnicy -69 cm. Fakty te należy wiązać z wstępną fazą rozwoju procesów erozyjnych poniżej zapory, które w 1969 roku uzewnętrzniły się w strefie wodowskazu w postaci akumulacji materiału i spłylenia dna koryta (przed czołem fali erozyjnej), natomiast w 1972 roku zaznaczył się w tym miejscu maksymalny wpływ erozji wgłębnej na aluwialne dno. Późniejsze obniżanie się dna koryta było tylko efektem „wyrównywania” dna, hamowanego odpornymi na erozję utworami ilasto-gliniastymi, a także czynnikami antropogenicznymi.

Interesująco przedstawia się analiza różnicy wartości średnich pięcioletnich stanów wody (h) między wodowskazami Włocławek i Toruń dla średniego rocznego minimalnego przepływu (SNQ), który wyniósł w 1984 r. odpowiednio 577 i 640  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , dla średniego z wielolecia 1966–1995 (SSQ) – 971 i 1007  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a także dla średniego maksymalnego (SWQ), który wystąpił w 1975 r. – odpowiednio 1344 i 1458  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (ryc. 8). Na początku badanego okresu, do przelomu pięcioleci 1976–1980 i 1981–1985 największe różnice zaznaczały się w strefie przepływów SWQ, zaś najmniejsze przy SNQ. Później nastąpiło odwrócenie tych tendencji z wyraźnym wzrostem różnic między tymi charakterystykami. Pierwszą sytuację w przebiegu zjawisk hydrologicznych niewątpliwie należy wiązać z generalnym obniżaniem się dna koryta na tym odcinku, o długości ponad 4,6 km (stały udział materiału dennego w procesie korytowym – Babiński 1982), późniejszą zaś z niemal wyłącznym pogłębianiem się strefy regulacyjnej koryta, z jednoczesnym wyłączeniem z procesu korytowego utrwalanego przez roślinność nowego poziomu zalewowego (Babiński 1992). Wystąpienie w ostatnim pięcioleciu 1991–1995 tendencji zmniejszenia się różnicy stanów wody w odniesieniu do tych samych przepływów SNQ, a w szczególności brak danych dla SWQ, jest związane z niemożliwością analizy tych parametrów z powodu małego zróżnicowania danych hydrologicznych (np. średnie roczne stany wody w tym pięcioleciu wahały się tylko od 123 cm do 151 cm) (ryc. 8).

Konsekwencją procesów erozyjnych poniżej zapory w sferze zjawisk hydrologicznych jest stała zmiana zależności stanów wody (h) do przepływów (Q). Ze względu na dużą dynamikę dna koryta we Włocławku, zależność tę ograniczono do wartości średnich rocznych mieszczących się w strefie przepływów od SNQ do SWQ. Dzięki temu było możliwe scharakteryzowanie jej w postaci prostych regresji zamiast w postaci krzywej konsumpcyjnej (łącznie z poziomem zalewowym). Celem ustalenia wielkości tych zmian przeprowadzono analizę porównawczą z punktem wodowskazowym Toruń, nie będącym jeszcze pod wpływem stopnia wodnego (ryc. 9, 10).



Ryc. 9. Proste regresji zależności średnich rocznych stanów wody (h) do przepływów (Q) dla wodowskazu Włocławek (1) i Toruń (2) dla pięciolecia przed wybudowaniem zbiornika 1966/70 (a) i pod koniec okresu badań 1991/95 (b)



Ryc. 10. Proste regresji zależności średnich rocznych stanów wody (h) do przepływów (Q) dla wodowskazu Włocławek (1) i Toruń (2) dla okresu działalności zbiornika 1971/95

Jak wynika z układu prostych regresji zależności  $h:Q$  punktów hydrometrycznych Włocławek i Toruń dla okresu poprzedzającego działalność zbiornika (1966–1970) miały one przebieg równoległy (ryc. 9). Oznaczało to wówczas dużą stabilność dna koryta na tym odcinku. Z chwilą zaznaczenia się procesów erozyjnych w profilu wodowskazu Włocławek następowało różnicowanie się układu tych prostych. Efektem finalnym tych zmian do roku 1995 są przebiegi prostych regresji dla ostatniego analizowanego pięciolecia 1990–1995. Generalnie zachowały one względem siebie układ równoległy, z wyraźną tendencją wzrostu  $Q$  przy tej samej wartości  $h$  – co wskazywałoby na obniżenie się dna koryta w obydwu przypadkach. W odniesieniu do punktu wodowskazowego Toruń zmiany te są niewielkie i mieszczą się dla tych samych przepływów w granicach 15–30 cm (ryc. 9). Należy przypuszczać, że są one wynikiem trwania w ostatnim dziesięcioleciu okresu suchego (ryc. 1), a także skutkiem prac hydrotechnicznych związanych pośrednio z remontem mostu kolejowego (przewężenie koryta) i pracami bagrowniczymi. W przypadku Włocławka wskazują one na wyraźny charakter erozyjny, gdzie w odniesieniu do strefy średnich rocznych przepływów różnice w stanach wody wahają się w granicach 180–200 cm (ryc. 9). Oznacza to, że koryto mieszczące średni wieloletni przepływ wody zostało trwale obniżone w przekroju wodowskazowym Włocławek o 2 m. W porównaniu z wartością otrzymaną z analizy prostej regresji (ryc. 4) to obniżenie dna koryta jest o 0,7 m mniejsze. Można więc przyjąć, że w wyniku procesu erozji wgłębnej dna koryta średniej wody w odległości 4,6 km od zapory w ciągu 26 lat działalności stopnia wodnego uległo obniżeniu o około 2,2–2,4 m.

Analiza przebiegów prostych regresji  $h:Q$  punktów wodowskazowych Włocławek i Toruń dla całego okresu istnienia stopnia wodnego (1970–1995), umożliwiła określenie tendencji zmian w profilu pionowym koryta (ryc. 10). Podobną analizę przeprowadzono także dla punktów hydrometrycznych Włocławek i Chełmno (Babiński 1992). Jak wynika z układu prostych regresji (ryc. 10), największe zmiany w przekroju poprzecznym koryta we Włocławku nastąpiły w strefie SNQ. Wraz ze wzrostem przepływów następuje asymptotyczne ich zbliżanie aż do strefy między SSQ i SWQ, skąd przyjmują układ o tendencji odwrotnej. Oznacza to, że w pierwszej strefie (dennej) na odcinku włocławskim nastąpił wyraźny proces erozji wgłębnej, w drugiej zaś (powyżej SSQ/SWQ), akumulacja i wypełnienie koryta osadami (nowy poziom zalewowy). W konsekwencji wskazuje to na mniejsze zmiany przekroju poprzecznego koryta na odcinku erozyjnym niż wynikałoby z interpretacji prostych regresji procesu erozyjnego (ryc. 4). Należy jednak odnieść się do tego wniosku z pewną rezerwą, ponieważ analiza bazuje wyłącznie na danych dla strefy średnich wieloletnich przepływów, nie uwzględniając wartości ekstremalnych. Fakt tej nieścisłości potwierdzają badania K. Polaka (1996), który stwierdził w ostatnich latach (1988–1995) postępujące obniżanie się zwierciadła wody Wisły w zakresie tzw. wód elektrownianych, tj. wysokich, i stosunkowo mniejsze przy przepływach niższych. Oznaczałoby to stały ubytek materiału z powierzchni nowej równiny zalewowej i powiększanie tym samym przekroju poprzecznego koryta. Proces ten, jak wynika z badań terenowych, ma jednak niewielki wpływ na przekształcenia koryta.

Przegrodzenie koryta zapora we Włocławku spowodowało zmiany w przebiegu zjawisk lodowych poniżej stopnia. Charakterystyczną ich cechą jest brak pokrywy lodowej w bezpośrednim sąsiedztwie zapory. Jak twierdzi M. Grześ (1991), przyczyn tego upatrywać można w tym, że ze zbiornika wypływa woda o podwyższonej temperaturze i zubożona w zawiesinę. Dodatkowy przyrost temperatury wody powodują zrzuty ścieków

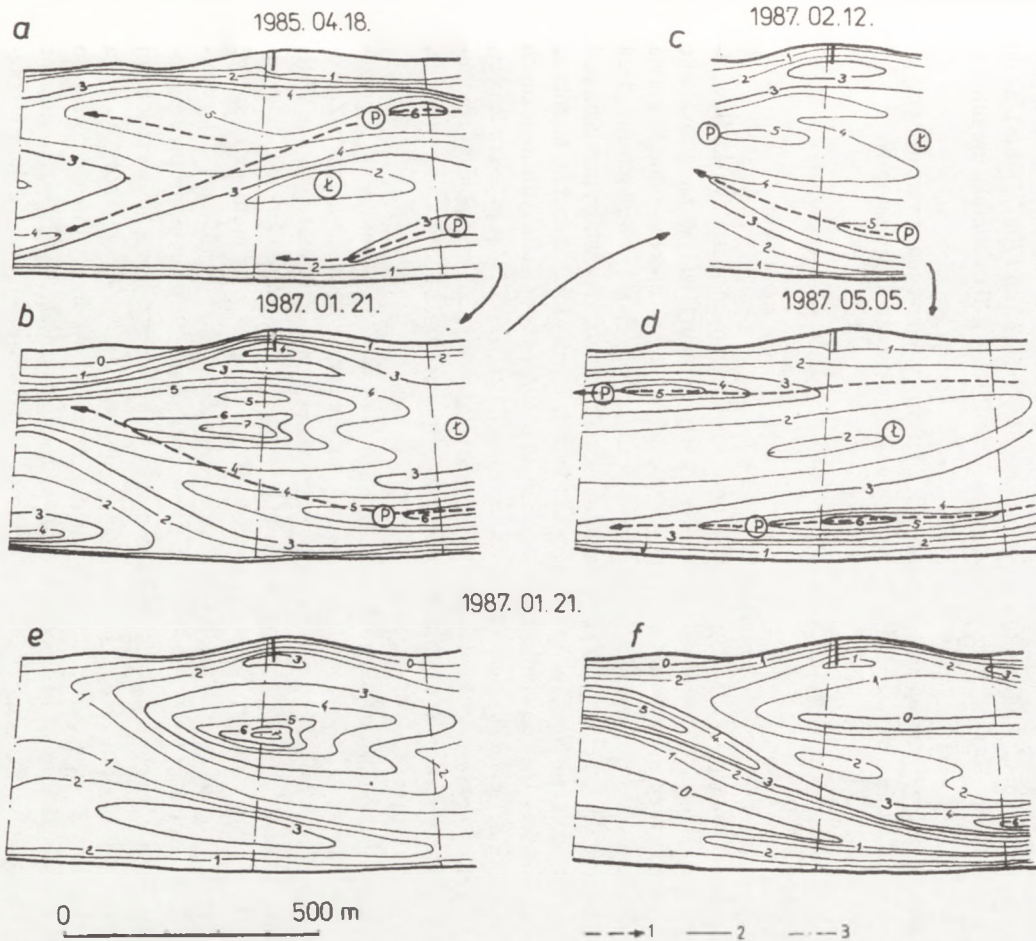
z Włocławka. Z punktu widzenia zjawisk lodowych analizowany odcinek Wisły poniżej zbiornika podzielić można obecnie na cztery odrębne odcinki (Babiński, Grześ 1995):

- I – stopień wodny (675 km) – 688/692 km; utrudnione warunki hydrodynamiczne formowania pokrywy lodowej, powstawanie bezpostaciowego śryżu,
- II – 688/692 km – 695/698 km; formowanie pokrywy lodowej z krążków i pól śryżowych,
- III – 695/698 km – 701/702 km; odcinek zatorowy – zatory śryżowe i śryżowo-lodowe,
- IV – 701/702 km – 718 km; formowanie pokrywy lodowej ze słoczonych krążków śryżowych.

Długość poszczególnych odcinków oraz przebieg zjawisk lodowych warunkowane są zarówno przez czynniki naturalne – zjawiska klimatyczne i reżim hydrologiczny rzeki, jak i następstwa działalności człowieka – szczytowo-interwencyjna praca stopnia oraz procesy erozyjne. Z punktu widzenia warunków hydroklimatycznych kształtujących zjawiska lodowe, do szczególnie niebezpiecznych należą sytuacje z niewielkimi natężeniami przepływu (poniżej  $500 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$ ) i długotrwałymi ochłodzeniami (Grześ 1991). Z kolei praca elektrowni może przyczynić się do rozwoju niebezpiecznych zatorów poprzez ich nagłe przemieszczanie się i „upakowywanie się” w formie znacznych (do 3,5 m) napięć. Dodatkowym czynnikiem ułatwiającym tworzenie się zatorów śryżowo-lodowych na badanym odcinku jest zmienność morfologiczna koryta (zwężenia koryta) głównie w 702 i 710 km Wisły (zał.). W miejscach tych niemal corocznie powstają zatory (Grześ 1991, Babiński, Grześ 1995), z których najbardziej niebezpieczny, z konsekwencjami morfologicznymi, utworzył się w 710 km w końcu marca 1924 roku (Gierszewski 1991). Stwarzają one bezpośrednie zagrożenia dla Nieszawy i Niziny Ciechocińskiej. W przypadku Ciechocinka zagrożenie to wzrosło na skutek uaktywnienia się na tym odcinku procesu akumulacji materiału wlezonego w postaci licznych łach (czynnik śryżogenny).

Przykład zatoru śryżowo-lodowego w przewężeniu koryta pod Nieszawą (701–702 km) z zimy 1986/87 wraz z jego konsekwencjami morfologicznymi obrazuje rycina 11. Odcinek ten był poddany przez autora szczegółowej analizie morfodynamicznej w latach 1981–1989 (Babiński 1992). Jak wynika z porównania zjawisk lodowych z batymetrią dna koryta, maksymalną miąższość zakumulowanego w korycie śryżu i kry lodowej stwierdzono w jego przegłębieniu w bezpośrednim sąsiedztwie dolnej krawędzi łachy (b–e), przy zachowaniu przebiegu nurtu sprzed okresu tworzenia się zatoru – znaczonego maksymalną miąższością warstwy wody (b–f, ryc. 11). Oznacza to, że rzeka w strefie zatoru może zachować swoje warunki hydromorfologiczne, wypełniając śryżem i lodem przekrój poprzeczny koryta w miejscu zaprawowym koryta (tak jak w warunkach sedymentacji materiału wlezonego). Często jednak dokonuje się interpretacji zjawisk lodowych na podstawie pojedynczego przekroju poprzecznego koryta, błędnie określając przy tym przebieg nurtu. Wówczas uważa się, że maksymalne wypełnienie koryta śryżem i lodem następuje w nurcie rzeki, zaś on sam ulega przemieszczeniu w strefę występowania m. in. łach. Może to stwarzać warunki do radykalnej przebudowy koryta. Nie potwierdzają tego badania z lat 1981–1989 (Babiński 1992, s. 100), kiedy niemal corocznie występujący na tym odcinku zator nie doprowadził do zauważalnych (radykalnych) zmian w morfologii koryta poza „normalnym” ich rozwojem. Zdarzają się jednak sytuacje niemal całkowitego wypełnienia przekroju koryta śryżem i lodem. Wówczas następuje „obejskie” zatoru poza korytem w strefie równiny zalewowej, jak to miało miejsce w końcu marca 1924 roku w 708–710 km Wisły (Gierszewski 1991). Wystąpienie takiej sytuacji





Ryc. 11. Plany batymetryczne koryta odcinka zatorowego pod Nieszawą (701,5–702,4 km) przed – (a), w trakcie zatoru (b i c) i po zatorze (d), wraz z miąższością warstwy sryżu i kry (e) oraz warstwy wody (f). 1 – nurt, 2 – izobaty, 3 – przekroje poprzeczne

w chwili obecnej mogłoby zagrozić przerwaniem wału przeciwpowodziowego otaczającego Nizinę Ciechocińską i zalaniem tego cennego ośrodka balneologicznego. Należy przypuszczać, że wraz z rozwojem strefy erozyjnej zagrożenie zatorami śryżowo-lodowymi na analizowanym odcinku ulegnie redukcji na skutek:

- wydłużania się poniżej zapory strefy pozbawionej zjawisk lodowych (stałe zubożenie rzeki w zawiesinę i rumowisko denne – jako czynniki śryżogenne),
- zaniku zatorogennych łańcuchów najpierw na odcinku nieszawskim (701–702 km), później w strefie koryta roztokowego na odcinku ciechocińskim (708–718 km), aż do chwili osiągnięcia przez czoło fali erozyjnej (ok. 2010–2020 r.) odcinka uregulowanego w XIX w.

Należy dodać, że przewężenia koryta w 702 i 710 km zawsze będą stwarzały sprzyjające warunki do spiętrzania się lodu i śryżu, a tym samym tworzenia się zatorów.

### 3. Gospodarka

Radykalne zmiany, jakie zaszły na skutek procesów erozyjnych w środowisku fluwialnym poniżej stopnia wodnego Włocławek, wywarły ogromny wpływ na gospodarkę człowieka. Dotyczy to zarówno zabudowy hydrotechnicznej w obrębie samego koryta (zapora i budowle regulacyjne w postaci ostróg rzecznych), jak i wszelkich urządzeń zainstalowanych i współdziałających z wodami rzeki (ujęcia i zrzuty wody, przejścia pod dnem koryta kabli i rurociągów itp.). Wszystkie wymienione wyżej urządzenia, łącznie ze stopniem wodnym, były bowiem zaprojektowane do pracy w warunkach hydrologicznych Wisły odpowiadających stanowi wód sprzed ingerencji człowieka. W przypadku zapory, miała ona pracować w systemie kaskadowym, ze stałym poziomem wód poniżej zbiornika. Dlatego pozostawienie stopnia wodnego w jego obecnym stanie niesie określone, szkodliwe dla człowieka konsekwencje.

Najbardziej szkodliwym dla gospodarki efektem procesu erozji wgłębnej jest zagrożenie dla prawidłowego funkcjonowania, a nawet istnienia samego stopnia wodnego. Zaprojektowano go bowiem tak, że minimalny poziom dolnej wody, jaki miała osiągnąć Wisła w wyniku procesu erozji wgłębnej po 5–8 latach działalności stopnia (do momentu wybudowania stopnia wyrównawczego w Ciechocinku), nie powinien przekroczyć 45,2 m npm. Tymczasem obecnie, przy przepływie tzw. biologicznym ( $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), zwierciadło wody obniża się już do rzędnej 43,5 m npm (Zdulski 1994), natomiast przy przepływie  $832 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  osiąga wysokość 43,78 m npm (ryc. 6). To przekroczenie wyznaczonych wstępnie założeniami bariery gwarantującej stateczność elementów zapory wywiera także określone konsekwencje na pracę stopnia. Zmusza bowiem hydroelektrownię do niemal ciągłej pracy zapewniającej życie biologiczne w rzece (Zdulski 1994). Konieczne są także dodatkowe zrzuty interwencyjne wód umożliwiające prawidłową żeglugę w obrębie awanportu („zawieszenie” dna dolnego wejścia do śluzy przy małych przepływach) i na odcinku koryta poniżej stopnia. Zwiększenie spadku wody w linii zapory o ponad 3 m (planowane piętrzenie normalne 11,3 m) niekorzystnie wpływa także na pracę turbozespołów (Meler 1995).

Proces erozji wgłębnej poniżej stopnia sprawił, że wiele elementów dotychczasowej zabudowy hydrotechnicznej Wisły oraz urządzeń gospodarczych straciło swój charakter i nie funkcjonuje zgodnie z przeznaczeniem, co grozi nawet ich rozmyciem i zniszcze-

niem. Dotyczy to przede wszystkim efektu „zawieszenia” (wynurzenia) budowli ponad określony stan wody, często z niebezpiecznym dla ich stateczności odsłonięciem fundamentów, m. in. (zał.):

- lewobrzeżnego bulwaru na odcinku wrocławskim (fot. 5, 6),
- mostu drogowego we Wrocławku (fot. 5),
- zabudowy ujściowego odcinka Zgłowiączki (erozja wsteczna ograniczona 4 progami w odcinku o długości ok. 250 m od koryta Wisły) (fot. 7),
- lewo- i prawobrzeżnych ostróg rzecznych. Do 690 km Wisły korony tych budowli, zaprojektowanych do funkcjonowania przy średnich wieloletnich stanach wody, aktualnie są wynurzone nawet w okresie trwania przepływów przekraczających  $SWQ - 2100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , zmieniając tym samym reżim rzeczny (Polak 1996) (fot. 8),
- ujęcia wód wiślanych przez Zakład Celulozy i Papieru i Zakłady Azotowe „Wrocław-Wek” i zrzutów wód z prawo- i lewobrzeżnej oczyszczalni ścieków oraz licznych ujść rur kolektorów deszczowych Wrocławka (lokalizacja na załączniku, wg *Miasło...*, 1993) (fot. 9, 10),
- rurociągów PERN i ZAW oraz kabli przeprowadzonych pod dnem koryta,
- portu zimowego we Wrocławku.

Ponadto proces erozji w głębszej przyczynił się do utrudnień w żegludze w sposób:

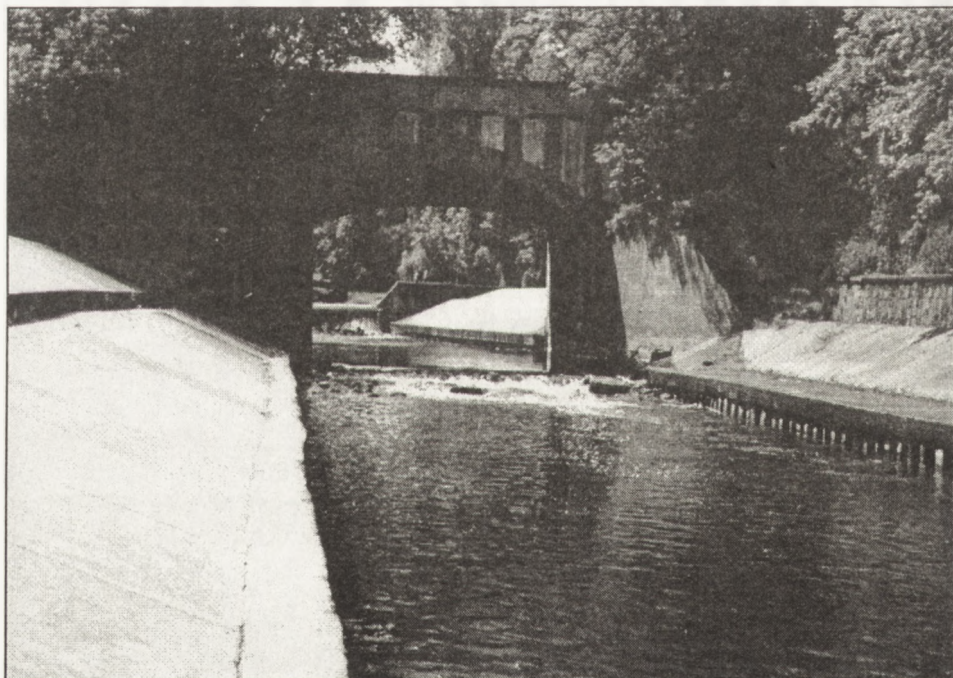
- bezpośredni, na odcinku erozyjnym w miejscach wychodni progów tzw. „raf” (zał.),
- pośredni, na odcinku agradacyjnym z licznie nagromadzonymi łachami piaszczystymi, znajdujący się obecnie w sąsiedztwie Niziny Ciechocińskiej.



Fot. 5. Niszczone umocnienia betonowe lewobrzeżnego bulwaru we Wrocławku, a także mostu drogowego



Fot. 6. Brzeg bulwaru wrocławskiego podczas trwania stanów średnich niskich



Fot. 7. Korekcje progowe w ujściowym odcinku Zgłowiączki hamujące proces erozji wstecznej



Fot. 8. Zarastająca korona ostrogi, wynurzona ponad średni wysoki stan wody



Fot. 9. „Zawieszono” na skutek procesu erozji wgłębnej ujście wód z ZCiP do Wisły



Fot. 10. „Zawieszono” rury kolektora deszczowego we Włocławku

## VI. PROGNOZA ZMIAN ŚRODOWISKA DNA DOLINY WISŁY PONIŻEJ ZAPORY

Zmiany jakie następują i będą się kształtować w dalszym ciągu w wyniku procesu erozji wgłębnej poniżej zapory należy rozpatrywać w dwóch przypadkach: 1 – tzw. opcji „0” – bez wyraźnej ingerencji człowieka, z pozostawieniem zabudowy hydrotechnicznej w dotychczasowej formie, ale z uwzględnieniem prac gwarantujących bezpieczeństwo zapory oraz 2 – wybudowania stopnia wyrównawczego „Ciechocinek” ze zbiornikiem Nieszawa. Natomiast zaniechanie jakichkolwiek prac hydrotechnicznych w obrębie analizowanego odcinka może spowodować nieobliczalne, wręcz katastrofalne (m. in. przerwanie zapory) skutki dla gospodarki człowieka.

### 1. Opcja „0”

Pozostawienie analizowanego odcinka Wisły z jego obecną zabudową hydrotechniczną jest równoznaczne z kontynuacją dotychczasowych procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej zapory. Charakteryzują je proste regresji ubytku materiału dennego ze strefy erozyjnej (Re), tempo przemieszczania się czoła fali erozyjnej (L), a także rozwój odcinka agradacyjnego do roku 1995 (zał., ryc. 3, 4, 5). Obliczone na podstawie tych danych prognozy wskazują, że do roku 2008–2010 czoło strefy akumulacyjnej osiągnie już odcinek Wisły uregulowanej pod koniec XIX w. (tab.). Oznacza to, że w tym momencie

zaniknie w strefie regulacyjnej koryta odcinek akumulacyjny, eliminując tym samym niebezpieczeństwo tworzenia się zatorów śrężowo-lodowych dla Niziny Ciechocińskiej. Natomiast w strefie między ostrogami będzie kształtował się nowy poziom zalewowy, który do tego czasu przyjmie „dojrzałą” formę na odcinku do Nieszawy. Zostanie on w pełni ukształtowany i połączy się z nową równiną zalewową, powstałą w wyniku XIX w. prac regulacyjnych, dopiero po roku 2020. W tym bowiem czasie, jak wynika z prognoz (tab., ryc. 5), dno koryta obniży się do poziomu dna uregulowanego poniżej Silna. Nastąpi wówczas scalenie i tym samym korzystne dla gospodarki człowieka ujednoczenie tych, różnych pod względem rozwoju koryta i procesów korytowych, odcinków dolnej Wisły (Babiński 1982, 1992). Wiąże się z tym, poza wyżej wymienionym wyeliminowaniem procesu tworzenia się groźnych dla Ciechocinka zatorów śrężowo-lodowych, również polepszenie warunków żeglugowych na tym odcinku, a także obniżenie zwierciadła wód gruntowych (osuszenie) Niziny Ciechocińskiej.

Niestety, ten optymistyczny wariant rozwoju procesów korytowych poniżej zapory we Włocławku mógłby przebiegać w powyższy sposób w warunkach stabilnego dna koryta poniżej zbiornika. Jak wynika z badań terenowych, chwilowe ograniczenie rozwoju procesu erozji wgłębnej poniżej zapory (połączenie pochodzących z różnych okresów prostych regresji poniżej zbiornika – ryc. 4), jest związane z istnieniem w dnie koryta odpornych na erozję iłów, gliny morenowej, a także pochodzących z jej rozmycia głązów. Utwory te są jednak aktualnie silnie niszczone (Polak 1996), stwarzając tym samym możliwości ustawicznego obniżania się dna koryta, przekraczającego prognozowaną głębokość. Fakt ten nabierze szczególnego znaczenia z chwilą przerwania przez procesy erozyjne płaszcza utworów trudno rozmywalnych i wcięcia się dna koryta w starsze utwory piaszczysto-żwirowe. Wówczas należy liczyć się z ponownym wzrostem tempa obniżania się dna koryta. W tej sytuacji nieodzowne są (istnieje już w chwili obecnej taka koncepcja) prace hydrotechniczne zmierzające do zahamowania procesu erozji wgłębnej głównie poprzez budowę, w odległości kilku kilometrów poniżej zbiornika, progu stabilizacyjnego (mini zapory). Będzie to jednak tylko częściowe ograniczenie procesu erozji wgłębnej, gdyż w dalszym ciągu będzie on miał miejsce poniżej nowo wybudowanego progu itd. Ponadto konieczne staną się prace hydrotechniczne zabezpieczające obecne budowle m. in. (Stopień wodny... 1997):

- przebudowa regulacji rzeki na odcinku 9 km poniżej stopnia,
- przebudowa budowli regulacyjnych poniżej tego odcinka,
- wykonanie nowych budowli regulacyjnych wraz z robotami bagrowniczymi,
- przebudowa drenażu zapory czołowej,
- przebudowa ujęć i zrzutów wody do Wisły,
- budowa prawobrzeżnego obwałowania Wisły we Włocławku, .
- zabezpieczenie bulwaru we Włocławku przed utratą stateczności,
- zabezpieczenie podpór mostu drogowego we Włocławku,
- modernizacja i naprawa poszuru jazu i elektrowni.

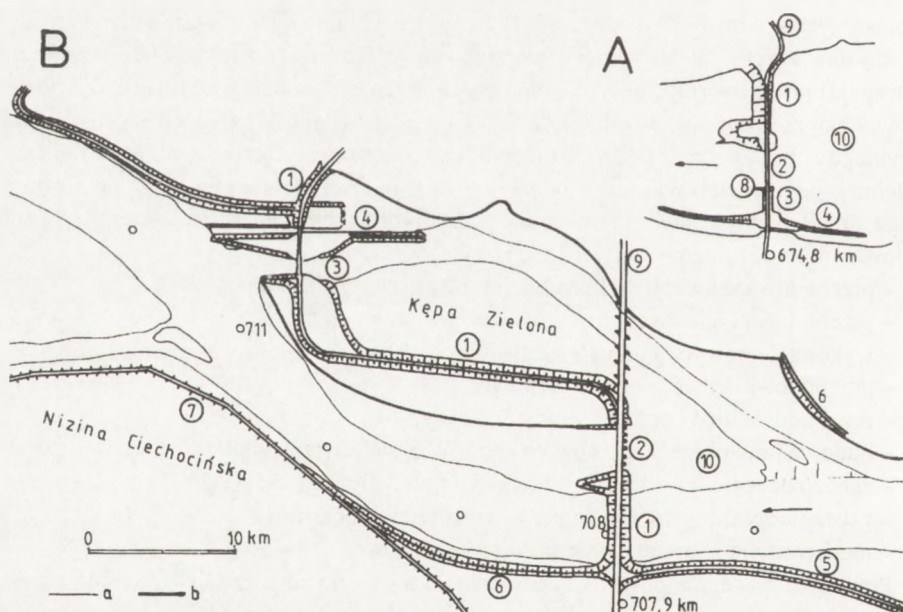
Powyższe prace, nie przynoszące w efekcie wymiernych korzyści – zwrotu poniesionych nakładów finansowych, według wstępnych obliczeń na tle kosztów budowy stopnia wodnego Ciechocinek (Stopień wodny... 1997) stanowią około 20–25% tej planowanej inwestycji. W tej sytuacji jedynym racjonalnym rozwiązaniem jest wybudowanie stopnia wodnego w Ciechocinku.

## 2. Budowa stopnia wodnego „Ciechocinek”

### a. Stopień wodny Ciechocinek i jego zbiornik „Nieszawa”

Stopień wodny Ciechocinek wraz z zaporą we Włocławku mają stanowić środkową część kaskady dolnej Wisły (KDW). Będą się one składać z podobnych elementów, a więc ze śluzy (4), elektrowni (3), przepławki dla ryb (8), jazów (2), z zapory ziemnej czołowej (1) i bocznej (5), przy czym przebieg tych elementów w przypadku stopnia Ciechocinek będzie miał zmienny kształt podobny do litery S oraz przeciwstawny do Włocławka układ (ryc. 12). Spiętrzenie wód w planowanym stopniu Ciechocinek do 8,5 m (75% włocławskiego) przyczyni się do powstania zbiornika „Nieszawa” o objętości  $V = 95,0 \text{ mln m}^3$  (24%), powierzchni  $P = 31,3 \text{ km}^2$  (45%), oraz długości 34 km (60% zbiornika włocławskiego) (ryc. 13). Biorąc pod uwagę podstawowe parametry ( $V$  i  $P$ ) analizowanych stopni wodnych, zbiornik w Ciechocinku stanowi tylko 1/3 akwenu włocławskiego. Pomimo jednak tych znacznych różnic morfometrycznych zainstalowana moc elektrowni wodnych w obydwu przypadkach będzie jednakowa – 162 MW.

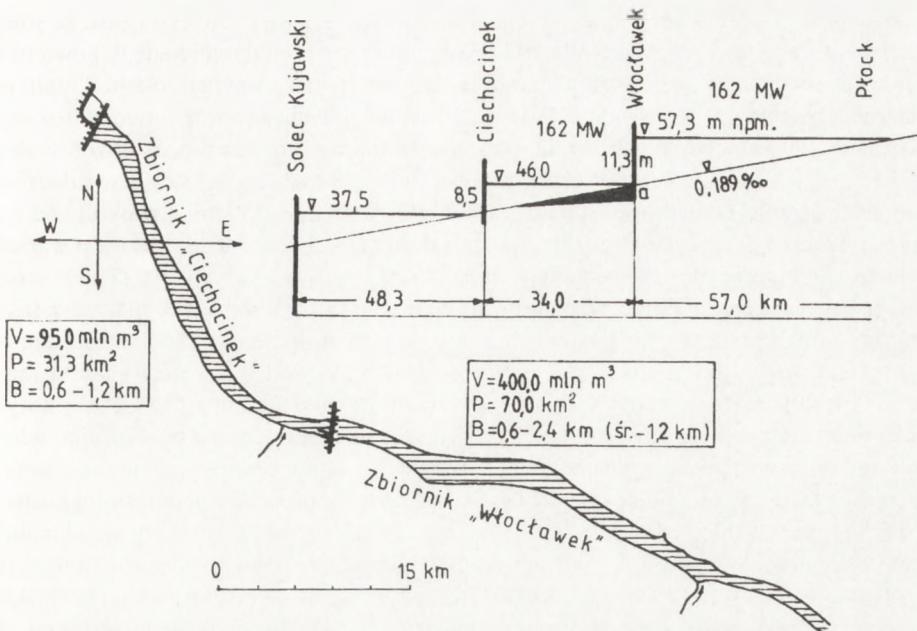
Spiętrzenie wód przez stopień wodny Ciechocinek do rzędnej 46,0 m npm (ryc. 13) przyczyni się do zalania lub podtopienia obszarów leżących w dnie doliny Wisły poniżej tej poziomu. W związku z tym zaprojektowano wzdłuż brzegów zbiornika 8 zapór bocznych o łącznej długości 28,3 km (zał.). Wały te mają chronić tereny, które są obecnie zalewane przez wody wezbraniowe. Regulowanie stosunków wodnych obszarów pozawałowych odbywać się będzie za pomocą 9 pompowni połączonych z odpowiednimi systemami odwadniającymi (Stopień wodny... 1997).



Ryc. 12. Schematyczny plan stopni wodnych: A – Włocławek, B – Ciechocinek

1 – ziemna zapora czołowa, 2 – jazy, 3 – elektrownia, 4 – śluza, 5 – zapora boczna, 6 – planowany wał przeciwpowodziowy, 7 – istniejący wał przeciwpowodziowy, 8 – przepławka dla ryb, 9 – droga, 10 – zbiornik  
Zarys koryta Wisły: a – obecny, b – po wybudowaniu zapory





Ryc. 13. Ogólna charakterystyka hydromorfometryczna zbiornika włocławskiego i niezawskiego  
 $V$  – objętość,  $P$  – powierzchnia,  $B$  – szerokość,  $a$  – strefa obniżonego na skutek procesów erozyjnych dna zbiornika niezawskiego

Realizację stopnia wodnego w Ciechocinku rozpoczęto już w 1970 roku, zaraz po napełnieniu zbiornika włocławskiego. Zgodnie z założeniami, wykonano wstępne prace regulacyjne koryta Wisły w strefie planowanej inwestycji, głównie w obrębie kępy Zielonej. W tym samym czasie dokonywano zmian projektowych stopnia, który w ostatecznej formie został zaakceptowany w 1979 r. Niestety, brak pieniędzy zniweczył te zamierzenia i na początku lat 80-tych zaniechano dalszej inwestycji. Budowę stopnia odłożono na dalsze lata. W międzyczasie uległy dewastacji efekty prac regulacyjnych.

Myśl kontynuacji budowy kaskady dolnej Wisły podjęto dopiero na początku lat 90-tych, zakładając 6 sierpnia 1992 roku Fundację „Kaskada Dolnej Wisły”. Wieloletnie starania Fundacji sprawiły, że w połowie 1997 roku przygotowano Raport Rządowy pt. „Stopień wodny Ciechocinek na dolnej Wiśle. Konieczność, główne uwarunkowania i sposób realizacji”. Jak wynika z Raportu (Stopień... 1997), okres realizacji stopnia wodnego Ciechocinek trwałyby około 4 lat. Zakładając, że początek tej inwestycji przypadłby na przełom lat 1998/99, to jej zakończenia należałoby spodziewać się około roku 2003.

#### b. Zbiornik niezawski na tle procesów erozyjnych poniżej zapory we Włocławku

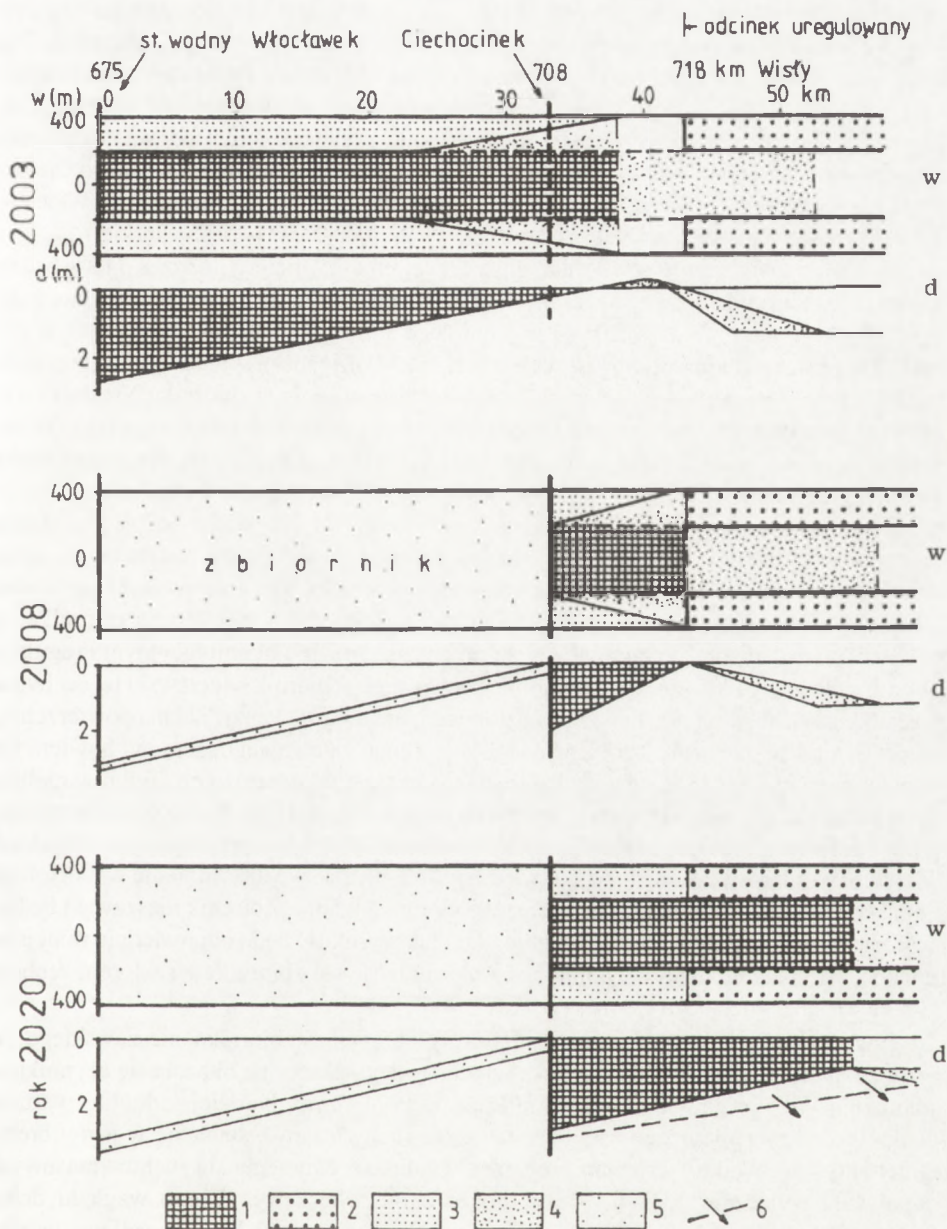
Wybudowanie stopnia wodnego Ciechocinek, zakończone przegrodzeniem koryta Wisły w km 707,9 (ryc. 12) i powstaniem zbiornika niezawskiego (zał., ryc. 13) około 2003 roku, nastąpiłoby w określonych warunkach morfodynamicznych koryta, kształtowanych przez procesy erozyjno-akumulacyjne zbiornika włocławskiego. Jak wynika z analizy procesu erozji wgłębnej (ryc. 3), w chwili zmiany procesów fluwialnych na zbiornikowe czoło strefy erozyjnej będzie usytuowane w linii elektrowni i służy planowa-

nego stopnia, a więc 3 km poniżej jego jazów (zał., ryc. 12, 14). Do tego czasu ze strefy regulacyjnej dna koryta zostanie wyerodowane, a następnie zakumulowane w nowo tworzonej równinie zalewowej i strefie agradacyjnej poniżej fali erozyjnej, około 23 mln m<sup>3</sup> materiału piaszczysto-żwirowego. Przy zachowaniu dotychczasowego trendu rozwoju procesu erozji wgłębnej, a więc m. in. obecności odpornych na ten proces utworów dennych koryta w sąsiedztwie zapory włocławskiej, powstanie w obecnej strefie regulacyjnej planowanego zbiornika nieszawskiego rynna o szerokości 250–550 m i głębokości od 5 m poniżej włocławskiej zapory do 10,8 m w linii stopnia ciechocińskiego. Pierwsza wartość głębokości zbiornika nieszawskiego wynika z obniżenia dna koryta na skutek erozji wgłębnej i piętrzenia wód do rzędnej 46 m npm (ryc. 5 i 13, pkt a), druga zaś z faktu obniżenia dna koryta w linii jazów o 0,5 m w stosunku do średniej głębokości koryta wynoszącej w tym miejscu 1,8 m (ryc. 5) + spiętrzenie wód o 8,5 m. Rynna ta (zał., ryc. 14) jest nowym elementem zbiornika powstałym na skutek erozji wgłębnej koryta i prac regulacyjnych na tym odcinku. Tego typu forma nie występuje w zbiorniku włocławskim, ponieważ jego powstanie nie było poprzedzone pracami regulacyjnymi. Oprócz tej formy erozyjnej, sprzyjającym zjawiskiem dla rozwoju procesów geomorfologicznych w obrębie planowanego zbiornika nieszawskiego okaże się także tworzący się aktualnie nowy poziom zalewowy. W chwili powstania zbiornika w pełni (pokryty roślinnością) wykształci się on do 23–25 km (700 km biegu Wisły), natomiast do zapory Ciechocińskiej znajdował się będzie głównie w fazie inicjalnej (ryc. 14). Wysokość tego poziomu, na który składają się fragmenty kęp i dawnej równiny zalewowej oraz utrwalone przez roślinność odsypy piaszczysto-żwirowe, osiągnie w pierwszym przypadku rzędną piętrzenia zbiornika w górnej jego części (kępa Włocławska i Grodzka) i 44–45 m npm w części dolnej (kępa Kozia i Zielona), zaś w drugim – odpowiednio 44–45 i 40–41 m npm (dane te wynikają z badań terenowych na tle przebiegu procesów erozyjno-akumulacyjnych i analizy rycin 5 i 6). Oznacza to, że poziom ten w miejscu kęp i dawnej równiny zalewowej ulegnie podtopieniu bądź zalaniu do 1 m miąższości warstwy wody, natomiast w odniesieniu do nowych odsypów brzegowych ich powierzchnie znajdować się będą na przeciętnej głębokości 1,5 m w górnej czaszy zbiornika i 5,5 m przy jego zaporze. Poziom ten w warunkach zbiornikowych będzie stanowił platformę abrazyjną, w znacznym stopniu wyhamowującą energię fal. To pozytywne dla przemian środowiska i gospodarki człowieka zjawisko nie miało miejsca w przypadku zbiornika włocławskiego. Jest to przykład prawidłowej realizacji budowy stopnia wodnego, poprzedzonej pracami regulacyjnymi koryta.

### **c. Prognoza zmian środowiska geograficznego w strefie oddziaływania stopnia wodnego Ciechocinek i zbiornika Nieszawa**

Stopień wodny Ciechocinek i jego zbiornik Nieszawa, ze względu na sąsiedztwo z wyżej usytuowaną zaporą Włocławek, będzie przejawiał podobne cechy i zmiany środowiska geograficznego. Nie wystąpi tu jednak szereg zjawisk typowych dla samotnych zbiorników, a pewne procesy ulegną redukcji z powodu jego mniejszych rozmiarów (1/3 zbiornika włocławskiego).

Jednym z ważnych i szkodliwych dla gospodarki człowieka procesów, który nie wystąpi w zbiorniku nieszawskim, jest akumulacja rumowiska wlezonego. Wiąże się to przede wszystkim z jego całkowitą sedymentacją w górnej czaszy zbiornika włocławskie-



Ryc. 14. Prognoza procesów erozyjno-akumulacyjnych poniżej stopni wodnych Włocławek i Ciechocinek w planie (w – szerokość koryta) i profilu podłużnym (d – przeciętne obniżenie-pogłębienie koryta) do lat 2003, 2008 i 2020. W profilu podłużnym nie uwzględniono głębokości zbiornika.

1 – erozja wgłębna, 2 – poziom zalewowy utworzony w wyniku XIX-wiecznych prac regulacyjnych, 3 – nowo tworzony poziom zalewowy, 4 – akumulacja rumowiska, 5 – akumulacja zawiesiny, 6 – tendencje rozwojowe procesów erozyjnych

go. Ma to również uzasadnienie w niemożliwości tworzenia się delty w górnej części zbiornika nieszawskiego w wyniku redepozycji materiału dennego, którego brak wśród odpornych na erozję osadów dennych. Brak akumulacji rumowiska wlezonego w górnej części zbiornika spowoduje, że jego dno w tym miejscu nie będzie ulegało spłycaeniu. Nie będą więc wymagane prace bagrownicze, jak również nie zaznaczy się zagrożenie zatorami sryżowo-lodowymi. Mogą wystąpić jedynie zatory lodowe tworzące się ze spiętrzonej kry spływającej ze zbiornika wrocławskiego – ułatwi to stała pokrywa lodowa na zbiorniku nieszawskim. Należy jednocześnie dodać, że bezpośrednio poniżej stopnia wodnego Ciechocinek nie wystąpią zjawiska lodowe, podobnie jak to ma miejsce poniżej zapory we Wrocławku. Przystanie więc istnieć problem powodzi zatorowych dla Niziny Ciechocińskiej.

Nowym zjawiskiem w strefie dotychczasowej erozji wgłębnej (obszar, który będzie zajęty przez zbiornik Nieszawa) stanie się akumulacja zawiesiny (ryc. 14). Zgodnie z danymi dla zbiornika wrocławskiego, wypływające z niego wody są pozbawione w ponad 40% ogólnego ładunku zawiesiny (Babiński 1994). Można przypuszczać, że w podobnej bądź mniejszej proporcji nastąpi dalsza redukcja zawiesiny w zbiorniku Nieszawa, i to głównie na zanurzonej powierzchni nowo utworzonej równiny zalewowej (zał.). W ten sposób akwen stanie się miejscem akumulacji osadów szkodliwych dla organizmów żywych oraz kolejnym „filtrem” oczyszczającym wody wpływające do Bałtyku.

Z powstaniem zbiornika nieszawskiego wiąże się rozwój procesu abrazji w jego strefie brzegowej. W stosunku do zbiornika wrocławskiego przebieg abrazji będzie mniej intensywny. Jest to związane z morfologią tworzonego zbiornika, jego rozmiarami i usytuowaniem względem zasadniczego kierunku wiatru. Jeśli chodzi o morfologię zbiornika, to w chwili powstania będzie on miał, dzięki procesom erozyjno-akumulacyjnym i regulacji koryta, rozwinięty układ nowego poziomu zalewowego. Zbiornik wrocławski tej cechy nie posiadał, gdyż objął on odcinek rzeki roztokowej, nie uregulowanej. Zalana powierzchnia nowego, a także dawnego – holocenińskiego – poziomu zalewowego, stanowi bowiem już rozwiniętą platformę abrazyjną, wyhamowującą energię fal wiatrowych. Tylko w nielicznych przypadkach, tam gdzie wody zbiornika będą podmywały wyższe poziomy terasowe pradoliny, proces abrazji zintensyfikuje się (Babiński 1993). Nie przybierze on jednak tak wielkich rozmiarów, jak na zbiorniku wrocławskim, co ma swe uzasadnienie w morfologii i układzie zbiornika względem zasadniczego kierunku wiatru. Zbiornik nieszawski będzie przeciętnie o 25% węższy, dlatego rozbieg fal i ich wysokość będą odpowiednio mniejsze. Energię falowania dodatkowo pomniejszy niezgodność osi zbiornika z sektorem zachodnim najczęściej wiejącego wiatru (ryc. 13)

Dogodne warunki tworzenia się platformy abrazyjnej zbiornika nieszawskiego (w przypadku 26 lat działalności zbiornika wrocławskiego platforma okazała się czynnikiem stabilizującym procesy stokowe – M. Banach 1994), oraz bardziej jednolite warunki geologiczne i morfologiczne zboczy sprawią, że ruchy masowe staną się w jego obrębie mniej aktywne. Według wstępnej prognozy, warunkom tworzenia się ruchów masowych odpowiada wyłącznie odcinek strefy zbocza okolic Nieszawy. Z tego względu dolny fragment zbocza, na którym usytuowana jest Nieszawa, musi być umocniony jeszcze przed piętrzeniem zbiornika.

Spiętrzenie wód Wisły przyczyni się do zmiany stosunków wodnych obszarów przyległych do zbiornika nieszawskiego. Dotyczy to wąskiej strefy niskiego brzegu, terenów pozawałowych oraz depresyjnych w sąsiedztwie zapory czołowej i poniżej niej. Na obszarze niskiego brzegu, do którego należy zaliczyć 3 km długości fragment prawego brzegu

okolice Łęga Witoszyn, nastąpi podtopienie terenów z jednoczesną stabilizacją jego poziomu (amplituda do 0,6 m). W przypadku terenów pozawałowych, do których należy zaliczyć obecnie już chronione obszary równiny zalewowej w strefie mostu drogowego we Włocławku i Korabnik, a także planowane prawobrzeżne w okolicy Szpetala Dolnego, Bógpomóż Stary, Bobrownik i Nowogródka oraz lewobrzeżnego Siarzewa, należałoby się liczyć z ich podtopieniem lub nieznacznym zalaniem (w granicach 0–1,5 m). Problem nadmiernego uwilgocenia tych obszarów, jak już wspomniano wyżej, będzie rozwiązany przez budowę specjalnych systemów 9 przepompowni.

Zmiany stosunków wodnych w obrębie oddziaływania przyszłego zbiornika nieszawskiego będą dotyczyć głównie obszaru depresyjnego Niziny Ciechocińskiej (zał.). Teren ten w przypadku ewentualnego przerwania wałów bocznych bądź samego stopnia wodnego, a następnie wałów przeciwpowodziowych może znaleźć się pod wodą wraz z przeważającą częścią zabudowy Ciechocinka. Jednak ze względu na podwójny system wałów ochronnych (zał.) taka sytuacja jest bardzo mało prawdopodobna.

Warunki hydrograficzne i hydrogeologiczne obszaru depresyjnego Niziny Ciechocińskiej będą uzależnione nie tylko od wód zbiornika, lecz przede wszystkim pośrednio od procesów erozyjnych poniżej stopnia wodnego. Podobnie jak w przypadku zapory we Włocławku, poniżej zbiornika nieszawskiego będzie następowało sukcesywne pogłębianie się dna koryta (ryc. 14). Wraz z nim będzie obniżało się zwierciadło wód gruntowych na obszarze Niziny Ciechocińskiej. Dzięki temu wyschną wszystkie mokradła i podmokłości znajdujące się na pozawałowym fragmencie równiny zalewowej (zał.). Należy przypuszczać, że do roku 2020, w strefie o szerokości 2–3 km wzdłuż koryta Wisły, zwierciadło wód gruntowych obniży się o 2–3 m, ustalając się na rzędnej 36–37 m npm. Generalnie proces osuszania Niziny Ciechocińskiej wpłynie pozytywnie na rozwój miasta. Pozwoli pozyskać nowe tereny (równina zalewowa) pod zabudowę, ułatwi także odpływ wód z wysoczyzny (wzrost spadku na obszarze Niziny). Fakt ten może mieć również wpływ na obieg wód jurajskich (Babiński 1993).

W celu dokładnego określenia tempa zmian warunków hydrograficznych i hydrogeologicznych Niziny Ciechocińskiej, związanych z procesem erozji wgłębnej, dokonano jego analizy na podstawie wyników badań poniżej stopnia Włocławek (ryc. 14). Stosując równanie prostej regresji tempa przemieszczania się czoła strefy erozyjnej (ryc. 3), ustalono, o czym wspomniano już wyżej, że w momencie zakończenia budowy stopnia Ciechocinek (2003 r.) jego czoło będzie znajdowało się w linii elektrowni, a więc 3 km poniżej jazów. Wpłynie to na obniżenie zwierciadła wód gruntowych we wschodniej części Niziny, natomiast zachodnia jej część w dalszym ciągu będzie sąsiadowała ze strefą agradacyjną. Po pięciu latach funkcjonowania zbiornika (2008 r.) czoło strefy erozyjnej osiągnie początek uregulowanego w XIX w. odcinka Wisły (ryc. 14). Obniżone dno erozyjne połączy się z dnem koryta, pogłębionym na skutek prac regulacyjnych. Gdyby nie wzmożona agradacja występująca zawsze poniżej strefy erozyjnej – od stopnia Ciechocinek w dół rzeki – Wisła byłaby w pełni żeglowna. Te dogodnie warunki do żeglugi (średnia głębokość koryta ponad 2 m) nastąpią dopiero po roku 2020 (ryc. 14), niezależnie jednak od wybudowania stopnia wodnego Ciechocinek. Do tego czasu dno koryta ulegnie wyrównaniu i w pełni wykształci się nowy poziom zalcowy, łącząc się z dawnym, poregulacyjnym. Można przypuszczać, że proces erozji wgłębnej będzie trwał nadal jeszcze po roku 2020, zarówno w kierunku pionowym koryta, jak i w dół rzeki (ryc. 14). W bezpośrednim sąsiedztwie zapory przyjmie jednak znacznie bardziej niebezpieczne rozmiary niż

poniżej stopnia Włocławek; nie ograniczy się bowiem tylko do pogłębienia dna koryta przeciętnie o 3–4 m (zał., ryc. 4), lecz przekroczy tę wartość. Jest to związane z występowaniem w dnie koryta utworów piaszczystych o miąższości przekraczającej 8 m (Kucharski 1966, Wiśniewski 1976). Poniżej zapory we Włocławku, przed piętrzeniem, dno było zbudowane z utworów piaszczystych; obecnie pogłębione o ponad 3,5 m, jest pokryte (chronione) odpornymi na erozję głazami, iłem lub gliną. Mając na względzie możliwość tworzenia się niebezpiecznych przegłębień (tzw. wybojów) dna koryta poniżej stopnia Ciechocinek, należy je szczególnie zabezpieczyć przed ewentualnym podmyciem.

## VII. UWAGI KOŃCOWE

Zaprojektowany w systemie kaskadowym, a funkcjonujący samotnie przez ponad 26 lat stopień wodny Włocławek, przyczynił się do licznych zmian środowiska geograficznego, często szkodliwych dla gospodarki człowieka. Szczególnie istotne w tym względzie są przekształcenia dna doliny Wisły poniżej zbiornika, związane z procesem erozji wgłębnej. Zjawisko to, powodowane głównie dużymi przyrostami energii rzeki wyzwalanej szczytowo-interwencyjną pracą elektrowni, miało zmienny w czasie i przestrzeni przebieg. Ponadto ograniczone zostało do strefy regulacyjnej koryta, określonej główkami ostróg rzecznych. Te zabiegi hydrotechniczne wraz z pracą stopnia przyczyniły się do wykształcenia rynny erozyjnej rozprzestrzeniającej się do chwili obecnej na odcinka o długości ponad 28 km. Rynnie tej towarzyszy po obu jej brzegach nowo utworzony poziom zalewowy. Ten ukierunkowany proces przekształcania koryta, typowy dla XIX-wiecznych prac regulacyjnych dolnej Wisły poniżej Niziny Ciechocińskiej, ma jednak w przypadku wpływu stopnia wodnego przebieg bardziej dynamiczny i zróżnicowany. Dotyczy to przede wszystkim jego transgresywnego charakteru, rozwijającego się w formie tzw. fali erozyjnej przemieszczanej w dół rzeki z przeciętną prędkością 1,1 km w ciągu roku. Ponadto obniżanie dna koryta nie następuje jednocześnie na całym analizowanym odcinku, lecz przebiega najintensywniej w sąsiedztwie zapory z ponad 3,5 m przegłębieniem, wyklinowując się wraz z oddalaniem od zbiornika. Zjawisko wcinania się dna koryta poniżej zapory nie ma także charakteru wygasania w czasie, jak to miało miejsce w przypadku XIX-wiecznej regulacji koryta, kiedy po 30–40 latach od jej zakończenia zostało ono zahamowane na wartości obniżenia trasy regulacyjnej przeciętnie o 1,2–1,5 m. Wręcz przeciwnie, trwa ono nadal, chwilowo tylko hamowane odpornymi na erozję utworami dennymi. Po przerwaniu tej warstwy należy liczyć się z uaktywnieniem procesu erozji wgłębnej!

Powyższe fakty, powodowane samotną pracą stopnia, przynoszą szkodliwe efekty gospodarcze głównie w postaci niedostosowania istniejącej („starej”) zabudowy hydrotechnicznej do nowych warunków związanych z obniżonym dnem koryta. Dotyczy to przede wszystkim samej zapory oraz mostu drogowego we Włocławku – dalszy rozwój procesu erozji wgłębnej grozi zmniejszeniem ich funkcjonalności, a nawet zniszczeniem.

Proponowane przez hydrotechników w warunkach opcji „0” zahamowanie procesu erozji wgłębnej przez budowę progu wyrównawczego poniżej zapory jest czynnikiem doraźnym, który tylko częściowo ograniczy ten proces i przeniesie go w inne miejsce w dół rzeki. Jedynym rozwiązaniem w sytuacji stale obniżającego się dna koryta (co jest

szkodliwe dla istniejącej zabudowy hydrotechnicznej) jest budowa stopnia wyrównawczego w Ciechocinku. Powstanie zbiornika nieszawskiego całkowicie wyeliminuje bowiem na jego odcinku procesy erozyjno-akumulacyjne i związane z nimi przemieszczanie się rumowiska klastycznego, przekształcając je w proces abrazji. Temu procesowi, typowemu dla zbiorników wodnych, będzie sprzyjał nowo utworzony poziom zalewowy. Fakt ten, wraz z niewystąpieniem agradacji materiału wlezonego w górnej części zbiornika (materiał całkowicie akumulowany w zbiorniku wrocławskim) i ograniczeniem ruchów masowych wyłącznie do odcinka nieszawskiego, a także małym udziałem obszarów depresyjnych (poza niżej usytuowaną Niziną Ciechocińską) sprawi, że planowany stopień wodny Ciechocinek wpłynie na zmiany środowiska przyrodniczego w sposób zdecydowanie mniej efektywny niż istniejący zbiornik wrocławski. W związku z tym także jego szkodliwość dla gospodarki człowieka będzie bardziej zredukowana. Problemem, z którym w dalszym ciągu należy się liczyć jest proces erozji wgłębnej poniżej zapory ciechocińskiej. Może on być całkowicie wyeliminowany tylko w warunkach budowy kolejnych stopni wodnych kaskady dolnej Wisły w kierunku Bałtyku.

## LITERATURA

- Babiński Z., 1982, *Procesy korytowe Wisły poniżej zapory wodnej we Wrocławku*, Dok. Geogr., 1/2.
- Babiński Z., 1985, *Hydromorfologiczne konsekwencje regulacji dolnej Wisły*, Przegl. Geogr., 57, 4, 471–486.
- Babiński Z., 1986, *Zmiany warunków hydrologicznych i morfologicznych Wisły poniżej stopnia wodnego „Wrocławek”*, (w:) J. Szupryczyński (red.), *Zbiornik Wrocławski – niektóre problemy z geografii fizycznej*, Dok. Geogr., 5, 41–54.
- Babiński Z., 1987, *Morphometry and morphodynamics of the Lower Vistula channel mesoforms*, Geogr. Polon., 53, 85–100.
- Babiński Z., 1991, *Wpływ regulacji na zmiany hydromorfologiczne dolnej Wisły*, Gosp. Wodna, 4, 89–94.
- Babiński Z., 1992, *Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły*, Prace Geogr., 157.
- Babiński Z., 1993, *Stopień wodny Ciechocinek i jego zbiornik Nieszawa – prognoza zmian środowiska geograficznego na tle przekształceń otoczenia stopnia Wrocławek*, Zesz. IGiPZ PAN, 12, 5–27.
- Babiński Z., 1994, *Stan zagospodarowania Dolnej Wisły na tle transportu rumowiska rzecznego*, Kaskada, 1, 7–11.
- Babiński Z., 1995a, *Zmiany środowiska fluwialnego poniżej stopnia wodnego Wrocławek i ich wpływ na gospodarkę człowieka*, Kaskada, 1/2, 6–7.
- Babiński Z., 1995b, *Procesy erozyjno-akumulacyjne poniżej stopnia wodnego „Wrocławek”*, (w:) *Hydrologiczne i geomorfologiczne problemy zbiornika Wrocławek*, *Przewodnik Wycieczki nr 1*, 44 Zjazd PTG, Toruń, 16–20.
- Babiński Z., Grześ M., 1995, *Monografia hydrologiczna zbiornika stopnia wodnego „Wrocławek”*, Zesz. IGiPZ PAN, 30.
- Banach M., 1994, *Morfodynamika strefy brzegowej zbiornika Wrocławek*, Prace Geogr., 161.
- Branicki A., 1995, *Ochrona przeciwpowodziowa na Dolnej Wiśle i mity funkcjonujące wokół tego tematu*, Kaskada, 3, 9–14.

- Fąferek B., 1960, *Inżynierskie badania geologiczne dla stopnia wodnego we Włocławku*, Przgl. Geol., 2, 84–89.
- Gierszewski P., 1991, *Zatorowe deformacje poziomu zalewowego Wisły w rejonie Ciechocinka*, Przgl. Geogr., 63, 1–2, 133–141.
- Giziński A., 1994, *Problemy ekologiczne Dolnej Wisły*, (w:) T. Jarzębińska, W. Majewski (red.), *Problemy przyszłego zagospodarowania i wykorzystania Dolnej Wisły*, Materiały Konf. nauk.-techn., Bydgoszcz.
- Grześ M., 1991, *Zatory i powódzie zatorowe na dolnej Wiśle. Mechanizmy i warunki*, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Jarzębińska T., Majewski W., 1994, *Hydrologia i gospodarka wodna Dolnej Wisły*, (w:) T. Jarzębińska, W. Majewski (red.), *Problemy przyszłego zagospodarowania i wykorzystania Dolnej Wisły*, Materiały Konf. nauk.-techn., Bydgoszcz.
- Kozłowski S., 1994, *Opis stanu koryta Dolnej Wisły na odcinku od Włocławka do Nowego*, Kaskada, 1(2), 12–14.
- Kucharski M., 1966, *Geomorfologia i czwartorzęd doliny Wisły w okolicach Ciechocinka*, Zesz. Nauk. UMK, Geogr. V, 14, 37–58.
- Meler Z., 1993, *Kaskada Dolnej Wisły. Wielozadaniowa inwestycja*, Kaskada, 1, 7–10.
- Meler Z., 1995, *Doświadczenia z dotychczasowej eksploatacji stopnia wodnego we Włocławku*, Kaskada, 1/2, 22–24.
- Miasto Włocławek. Sieć wodociągowa i kanalizacyjna*, 1993, WBPP, Włocławek, (mapa w skali 1:5000).
- Peets G. E., Pratts J. D., 1983, *Channel changes following reservoir construction on a lowland English rivers*, Catena, 10, 77–85.
- Polak K., 1996, *Przyczyny postępującej erozji w dolnym stanowisku stopnia wodnego „Włocławek” na tle oceny przebiegu procesów erozyjnych koryta w latach 1988/94*, Kaskada, 3, 12–14.
- Stopień wodny Ciechocinek na dolnej Wiśle. Konieczność, główne uwarunkowania i sposób realizacji*, 1997, Fundacja Kaskada Dolnej Wisły, Włocławek, 30 str. maszynop.
- Wiśniewski E., 1976, *Rozwój geomorfologiczny doliny Wisły pomiędzy Kotliną Płocką a Kotliną Toruńską*, Prace Geogr., 119.
- Zdulski W., 1994, *Negatywne skutki braku zabudowy kaskadowej Dolnej Wisły dla hydroelektrowni Włocławek*, Kaskada, 3(4), 15–16.



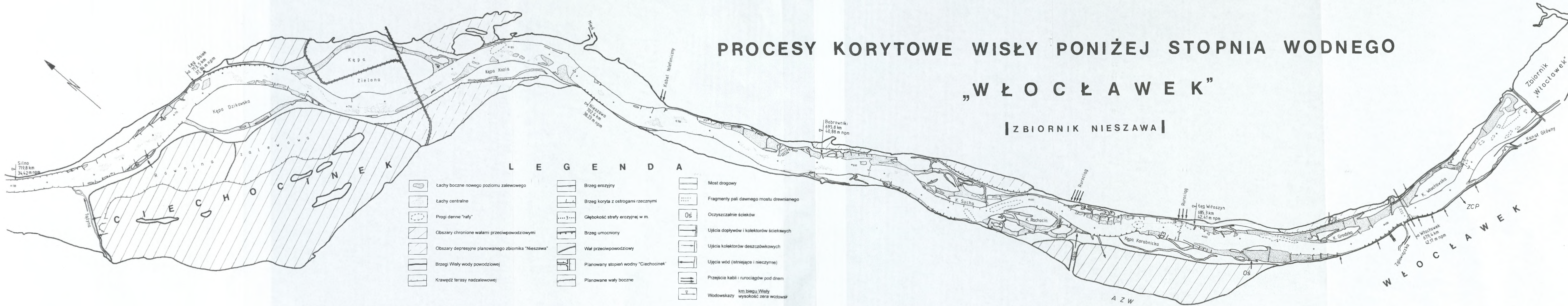




# PROCESY KORYTOWE WISŁY PONIŻEJ STOPNIA WODNEGO

## „WŁOCŁAWEK”

[ ZBIORNIK NIESZAWA ]



### L E G E N D A

- |  |   |  |                                       |  |  |
|--|---|--|---------------------------------------|--|--|
|  | Łąchy boczne nowego poziomu zalewowego              |  | Brzeg erozyjny                        |  | Most drogowy   |
|  | Łąchy centralne                                     |  | Brzeg koryta z ostrogami rzecznyymi   |  | Fragmenty pali dawnego mostu drewnianego               |
|  | Progi denne "rafy"                                  |  | Głębokość strefy erozyjnej w m.       |  | Oczyszczalnie ścieków                                  |
|  | Obszary chronione wałami przeciwpowodziowymi        |  | Brzeg umocniony                       |  | Ujęcia dopływów i kolektorów ściekowych                |
|  | Obszary depresyjne planowanego zbiornika "Nieszawa" |  | Wał przeciwpowodziowy                 |  | Ujęcia kolektorów deszczówkowych                       |
|  | Brzegi Wisły wody powodziowej                       |  | Planowany stopień wodny "Ciechocinek" |  | Ujęcia wód (istniejące i nieczynne)                    |
|  | Krawędź terasy nadzalewowej                         |  | Planowane wały boczne                 |  | Przejścia kabli i rurociągów pod dnem                  |
|  |   |  |                                       |  | km biegu Wisły<br>Wodowskazy<br>wysokość zera wołowski |

