

Funkcjonowanie zbiorników zaporowych na Słupii jako czynnik rzeźbotwórczy

Reservoirs of the Słupia river as morphogenetic agents

Elżbieta Florek*¹, Waclaw Florek*², Leszek Łęczyński³

¹*Akademia Pomorska w Słupsku, Zakład Kartografii, ul. Partyzantów 27, 76-200 Słupsk*

²*Akademia Pomorska w Słupsku, Zakład Geomorfologii i Geologii Czwartorzędu, ul. Partyzantów 27, 76-200 Słupsk*

³*Uniwersytet Gdański, Instytut Oceanografii, Zakład Geologii Morza, al. Marszałka J. Piłsudskiego 46, 81-378 Gdynia*

Zarys treści: Przy wykorzystaniu map dawnych, a także badań i obserwacji terenowych autorzy dokonali oceny stopnia przekształcenia rzeźby dna doliny Słupii w jej środkowym biegu, na odcinku, na którym w latach 20. XX w. wybudowano szereg urządzeń hydrotechnicznych, w tym dwie elektrownie wodne i towarzyszące im zbiorniki dolinne. Badania wykazały, że dno doliny Słupii w ciągu ponad 80 lat przekształciło się w zróżnicowanym stopniu, a tempo i zasięg współczesnych procesów formo- i osadotwórczych są niewielkie, z wyjątkiem górnych części zbiorników i odcinka koryta Słupii położonego poniżej elektrowni Krzynia.

Słowa kluczowe: zbiorniki, elektrownie wodne, akumulacja, procesy brzegowe, delta, meandry

Abstract: The subject of the study is the channel and valley floor of the Słupia river along its >10 km length reach south of Słupsk. In the early 20th century this reach of the valley was heavily altered through channelization and drainage, followed by extensive hydro-engineering works in the 1920s. The aim of this study is to recognize the magnitude of geomorphic change in the channel and the valley floor consequent to these human-induced perturbations.

In 2001–2007 monitoring of selected processes and sites was carried out and involved mapping and repeated surveying of shorelines of reservoirs, bathymetric measurements, assessment of shoreline landforms, and repeated photography. Shoreline erosion, delta progradation and wave behaviour were among the monitored processes.

Hydropower stations have been working continuously since their opening, whereas the reservoirs have never been flushed or dredged. The most important consequence is the dominant role of sedimentation in re-shaping of the Słupia valley floor, whose pattern is the following:

- in the shallowest part of the reservoirs (10–30 cm) an older floodplain has been quickly and completely covered by deposits and vegetation succession proceeds,
- in the middle sections, where reservoirs widen out, delta progradation takes place,
- fine material is deposited in near-dam widening and in local coves, most intensively if water depth is less than 1 m, with the contributing role of aquatic plants.

The course of fluvial processes below the Krzynia power station is different. The channel is modelled by scour and lateral erosion, which develop because of local scouring. In the effect of scour, the floodplain has been extensively drained over many kilometers, resulting in drying-up of oxbows cut off during the early 20th century straightening, desiccation of pool floors. At the same time, meanders migrate at the rate of 0.4–0.8 m per year.

Key words: reservoirs, hydropower plants, accumulation, littoral processes, delta, meanders

* e-mail: florekw@pap.edu.pl

Wprowadzenie

W połowie XVIII w. rozpoczęto na Pomorzu i Pobrzeżu realizację ważnych projektów melioracyjnych (Kończak 1981). Przeważały wśród nich, podobnie jak dziś, urządzenia odwadniające, co musiało przyczynić się do wzrostu nierównomierności odpływu. Nasilające się w drugiej połowie XIX w. powodzie (największa wystąpiła w roku 1898) spowodowały podjęcie kolejnych prac melioracyjnych i regulacyjnych. Rozpoczęto je w 1860 r. Objęły one pogłębianie koryt rzecznych, usuwanie z koryt głazów i pni, piaszczystych łach, a przede wszystkim likwidację zakoli, umacnianie brzegów koryt oraz budowę jazów, tam i zbiorników wodnych (Florek 1991, 1993).

Zasadniczy etap regulacji Słupi rozpoczął się w roku 1905. Regulację prowadzono etapami, na różnych odcinkach, aż po okres międzywojenny. Prace polegały na odcięciu najbardziej rozwiniętych zakoli, co spowodowało znaczne skrócenie biegu rzeki (Herstellung 1931). Wywołało to zwiększenie spadku podłużnego, a w konsekwencji prędkości płynięcia wody. Tym samym powstały warunki do uruchomienia intensywnych procesów korytowych (Florek 2001).

Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg procesów fluwialnych i prowadzącym do zmiany profilu podłużnego rzeki była zabudowa hydrotechniczna, dynamicznie rozwijana od początku XIX w. Na zabudowę tę składały się: młyny wodne, tartaki o napędzie wodnym, elektrownie wodne oraz wszystkie budowle związane z działalnością wymienionych zakładów, takich jak: zapory, jazy, kanały i progi rozmieszczone na niemal całym biegu rzeki, od wypływu z Jeziora Gowidlińskiego po Słupsk. Najbardziej znaczące zmiany dokonały się w środowisku rzeczonym i dolinnym środkowej Słupi w wyniku wybudowania tu w latach 1898–1926 czterech elektrowni wodnych (Struga w Soszycy, Gałąźnia Mała, Strzegomino [Konradowo] i Krzynia) oraz towarzyszących im: zbiorników zaporowych, kanałów, podziemnych sztolni i budynków (Florek 2001). Kluczowym momentem było wybudowanie w Krosnowie zapory piętrzącej wody Słupi i Bytowy, dzięki czemu możliwe stało się skierowanie ich przez Jezioro Głębokie, którego rzędną lustra wody obniżono, i dalej kanałem do elektrowni w Gałąźni Małej. Usytuowane poniżej, zbiorniki elektrowni Strzegomino i Krzynia stały się tymi elementami zabudowy hydrotechnicznej, które w stosunku do stanu pierwotnego wprowadziły największe zmiany w rzeźbie otaczającego je terenu. Oba wykorzystują odcinek doliny Słupi o podobnych parametrach morfologicznych i zbliżonej budowie geologicznej, a zachodzące w nich i ich otoczeniu procesy cechuje duża zbieżność.

Zakres i metody badań

W latach 2001–2007 prowadzono monitoring wybranych procesów i obiektów terenowych.

Prace obejmowały:

- pomiary i kartowanie przebiegu linii brzegowej zbiorników,
- pomiary batymetryczne zbiorników (maj–listopad 2001),
- kartowanie stanu strefy brzegowej zbiorników.
- wykonanie dokumentacji fotograficznej.

Monitoring dotyczył: erodowanych fragmentów linii brzegowej, przyrostu delty oraz falowania w niektórych ekstremalnych warunkach pogodowych.

Pomiary batymetryczne oraz kartowanie strefy brzegowej wykonano z łodzi o napędzie elektrycznym (elektrownie i ich zbiorniki zlokalizowane są w Parku Krajobrazowym „Dolina Słupi”) wyposażonej w echosondę oraz DGPS. Odbiornik radiowych sygnałów systemu nawigacji Navstar GPS (Globalny System Pozycjonowania) francuskiej firmy MLR Electronique model FX412 zastosowano do lokalizacji punktów pomiarowych. Urządzenie to umożliwiło wykorzystywanie sygnałów z dowolnych stacji referencyjnych wysyłających sygnały RTCM, co wpłynęło na dużą dokładność pomiaru pozycji. Do pomiaru głębokości użyto echosondy Bathy 500 MF.

W trakcie prac kameralnych wykorzystano:

- mapy topograficzne Messtischblatt, w skali 1:25 000, arkusz 1669 Gr. Dübsow z roku 1907 oraz arkusz 1769 Alt Kolziglow z roku 1911,
- mapy topograficzne w skali 1:10 000, 1:5000,
- zdjęcia lotnicze z lat: 1951, 1968, 1984, 1993, 1996,
- zdjęcia lotnicze pionowe i ich fotointerpretacje, w skali 1:5000, z 1995 roku dla Konradowa i z 1997 roku dla obszaru Krzyni,
- opracowania własne dotyczące delty Słupi, publikowane (Florek 1997) oraz niepublikowane, materiały archiwalne „ENWOD” Elektrowni Wodnych Słupsk Sp. z o.o. (Uproszczona dokumentacja... 1953a, Uproszczona dokumentacja... 1953b).

Nie zachowały się plany projektowe zbiorników na Słupi; autorzy dysponowali jedynie technicznymi danymi z momentu uruchomienia elektrowni. Z kolei w latach 1945–2005 nie wykonano żadnego zdjęcia sytuacyjno-wysokościowego zbiorników i jego otoczenia, z wyjątkiem niewielkich fragmentów terenu wokół zapór. Jedynymi materiałami topograficznymi z tego okresu są: mapa topograficzna w skali 1:10 000 (uaktualniona w 1985 r.) oraz zdjęcia lotnicze zbiorników z 1995 (Konradowo) i 1997 (Krzynia). Taka szczupłość dokumentacji archiwalnych zmusza do traktowania wszystkich wielkości, które są wynikiem porównania z danymi projektowymi zbiorników, jedynie w kategorii szacunku.

Zdjęcia lotnicze znalazły głównie zastosowanie przy określaniu wielkości i charakteru akumulacji w górnej części zbiorników oraz w interpretacji wielkości i sposobu kształtowania się delt. Przy określaniu przebiegu aktualnej linii brzegowej zdjęcia lotnicze można było wykorzystać jedynie w ograniczonym zakresie, ponieważ korony drzew sięgające do 3 m nad taflę zbiornika skutecznie ją zasłaniały.

W przeprowadzonych analizach wykorzystano również wyniki badań osadów zbiornika Krzynia wykonanych przez Banacha i Chlost (2005, 2007)

Budowa geologiczna i sytuacja geomorfologiczna obszaru badań

Od wypływu z jeziora Węgorzyno po ujście Kamienicy Słupia płynie, wykorzystując głównie odcinki dolin marginalnych, lokalnie również równoleżnikowo ułożonych rynien (Florek 1991). Odcinek ten przez Keilhacka (1897, 1898), a potem Sylwestrzaka (1969) określany był jako stanowiący część „pradoliny pomorskiej”. Dolinie Słupi towarzyszy tu sześć

poziomów sandrowych (Sylwestrzak 1969, Orłowski 1983a). Poniżej Gałąźni Małej Słupia wykorzystuje jedną z rynien rozcinających Wysoczyznę Słupską. Na tym odcinku Słupi towarzyszą cztery poziomy sandrów dolinnych (Orłowski 1983a).

Szczegółowy opis cech litologicznych i wieku osadów budujących wymienione poziomy morfologiczne zawierają prace Florka i in. (1989a, 1991). Wyższe poziomy sandrowe zbudowane są z różnoziarnistych piasków i żwirów, zaś dolne – z miększych warstw zróżnicowanego, źle wysortowanego materiału mineralnego oraz z późnoglacialnych i holocenijskich osadów organogenicznych i organiczno-mineralnych (Florek 1991). Osady sandrów dolinnych powstały zapewne w okresie pomiędzy schyłkiem fazy pomorskiej a fazą gardzieńską, to jest w przedziale około 16,5–14,0 tysięcy lat wstecz.

W dolinie Słupi, podobnie jak w dolinach innych rzek północnego skłonu Pomorza, występuje najczęściej jedna terasa nadzalewowa. Obecność drugiej ogranicza się do odcinków, na których odpływ wód był czasowo zatamowany przez formy marginalne kolejnych etapów recesji lądolodu vistuliańskiego.

MORZE BAŁTYCKIE



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle zlewni Słupia; zaznaczono odcinki pokazane na rycinach 2–4

Fig. 1. Location of the study area within the Słupia drainage basin. Valley reaches shown on Figs 2–4 are indicated

Powszechna jest na całej długości holocena równina zalewowa osiągająca szerokość od kilkunastu do ponad 400 m.

Rzeźba doliny środkowej Słupi sprzed zabudowy hydrotechnicznej

Dolina Słupi na odcinku Krzynia–Gałąźnia Mała ma charakter przełomowy, o rynnowych założeniach. Słupia przecina tutaj wzniesienia moren czołowych akumulacyjnych, które w kulminacjach tuż na zachód od zbiornika Krzynia sięgają około 150 m n.p.m., a deniwelacje terenu wynoszą do 120 m. Tak duże deniwelacje oraz miejscowe występowanie powierzchni sandrowych decydują o charakterze rzeźby doliny środkowej Słupi.

Rzeźbę doliny Słupi sprzed zabudowy można prześledzić na mapie topograficznej z 1907 r., a więc wykonanej 19 lat przed wybudowaniem w Krzyni elektrowni i zbiornika oraz na 17 lat przed uruchomieniem elektrowni w Strzegomiu i wybudowaniem zbiornika Konradowo (tylko niewielki fragment doliny znajduje się na mapie z 1911 r.).

Lustro wody w okolicy Krzynia (Klein Krien) leżało na rzędnej 33,3 m n.p.m., w górę rzeki, w odległości 6470 m, w miejscowości Konradowo (Klaushof) na rzędnej 39,8 m n.p.m., a w odległości 9000 m od Klaushof, w miejscowości Gałąźnia Mała (Klein Gansen) na rzędnej ok. 53,0 m n.p.m. Spadek lustra wody między Gałąźnią Małą a Krzynią wynosi 1,0–1,5‰.

Na odcinku między Krzynią a Gałąźnią Małą całą szerokość dna doliny z małymi wyjątkami zajmowała równina zalewowa. Na południe od Krzyni w miejscu późniejszego wybudowania zapory równina zalewowa leżała na rzędnej ok. 33,7 m n.p.m. i od wschodu łagodnie przechodziła w nisko położone poziomy sandrowe (35,0–40,0 m n.p.m.). Od zachodu dna doliny ograniczają wyraźne krawędzie wycięte w osadach morenowych, których najbliższe kulminacje osiągają wysokości rzędu 100–120 m n.p.m. W górę rzeki szerokość równiny zalewowej wynosiła średnio ok. 250 m, a Słupia, płynąc, tworzyła tu liczne zakola. Na tym odcinku, głównie na wschodnim brzegu doliny, krawędzie wyższych poziomów sandrowych podcięte są erozją, wskutek czego mają bardzo duże nachylenie (ok. 30°). Od zachodu zaczyna towarzyszyć Słupi terasa sandrowa niższa (terasa IX ok. 50,0 m n.p.m.), której podcięcia nie tworzą tak wyraźnych form jak na brzegu prawym. W pobliżu Konradowa oba zbocza doliny Słupi łagodnieją, ich nachylenie wyraźnie się zmniejsza, dolina staje się rozległa, zwłaszcza przy ujściu lewobrzeżnego dopływu Brodek (Brotken). Szerokość równiny zalewowej nie zmienia się i wynosi ok. 250 m, zwiększając się jedynie w paru miejscach, gdzie rzeka skomplikowanie meandruje.

Powyżej miejsca, w którym później zamknięto dolinę zaporą Konradowo, dno doliny rozszerza się do około 460 m. To rozszerzenie tworzą równina zalewowa i zachowany na prawym brzegu fragment terasy nadzalewowej. Z kolei na lewym brzegu nawiązuje do niego w okolicy Neu-Johanishof rozległy płaski teren sandrowy (znajdujący się na rzędnych 45,0–50,0 m n.p.m.) z licznymi zagłębieniami, wznoszący się ponad dno doliny na ok. 5,0–8,0 m. Środkowy odcinek doliny Słupi, między miejscowościami Konradowo i Gałąźnia Mała, jest wyraźnie węższy od pozostałych. Dno doliny ma tutaj szerokość około 100–130 m, koryto rzeki nie meandruje, a równina zalewowa ma szerokość miejscami zaledwie 20 m, natomiast na lewym brzegu na całym odcinku występuje terasa nadzalewowa (wyniesiona 7 m ponad lustro wody) osiągająca szerokość do 135 m. Krawędzie tej terasy podcinają poziomy sandrowy występujący tutaj na rzędnej 70,0 m n.p.m. Ostatnie 4 km doliny rzeki powyżej mostu w Klein Gansen to 2-kilometrowy odcinek doliny szerszej, z licznymi zakolami i 2-kilometrowy odcinek z dnem nie szerszym niż 100 m. Cechą tego 4-kilometrowego odcinka doliny jest to, że jej zbocza o niewielkim nachyleniu przechodzą niepostrzeżenie w rozległy wyższy poziom terasy sandrowej.

Zobrazowanie rzeźby dna doliny Słupi na odcinku Krzynia–Gałąźnia Mała na mapach z lat 1907 i 1911 pokazuje, że na usytuowanie elektrowni i zbiorników wybrano optymalne miejsca. Wybór rozszerzenia doliny powyżej Krzyni oraz drugiego stwarzającego znacznie większe możliwości, w miejscowości Konradowo, pozwolił zaprojektować spiętrzenie wód Słupi na 7 m – do rzędnej 38,0 m n.p.m. i na 12 m – do rzędnej 50,6 m n.p.m., w efekcie czego powstały dwa zbiorniki wodne. W Krzyni wybudowano zbiornik o długości 6470 m i pojemności 2,0 mln m³, a w Konradowie zbiornik o długości 9000 m i pojemności 5,1 mln m³ (Florek 1995).

Zmiany w morfologii doliny powstałe w trakcie zabudowy doliny obiektami hydrotechnicznymi

Prace przy budowie elektrowni i zapory zbiornika Krzynia ingerujące w środowisko doliny rzecznej polegały na wybudowaniu:

- wybudowaniu zapory ziemnej o długości 220 m, z koroną na rzędnej 39,8 m n.p.m. i o szerokości 4 m; zapora wyposażona jest w betonowe upusty burzowe;
- wybudowaniu kanału dopływowego o długości 150 m wykonanego częściowo przez wykop i częściowo przez nasyp grobli;
- wybudowaniu budynku elektrowni przy drodze do miejscowości Kleine Krien;

- wybudowaniu kanału odpływowego o długości ok. 100 m między elektrownią a jeziorem Kriener See;
- przekształceniu jeziora Kriener See w wyrównawczy zbiornik odpływowy poniżej elektrowni.

Do budowy zapory nie wykorzystano materiału miejscowego, bowiem nie wybierano materiału z cza-szy zbiornika. Z porównania rzeźby tego terenu na mapie archiwalnej i wykonanej w 2001 r. batymetrii wynika, że zbiornik powstał jedynie przez zalanie spiętrzonymi o 7 m wodami Słupi, bez wykonywania na dnie jakichkolwiek prac ziemnych. Do rzędnej 38 m n.p.m. zalana została tylko równina zalewowa i nisko położone fragmenty najniższej terasy sandrowej na prawym brzegu. Na lewym brzegu i w górę zbiornika, wszędzie tam, gdzie występują strome zbocza wyższych poziomów morfologicznych, zalane zostały jedynie ich podnóża. Tak więc kształt zbiornika wyraźnie nawiązuje do przebiegu koryta rzeki i do kształtu jej równiny zalewowej. Cofka zbiornika sięga dolnej wody kanału odpływowego elektrowni w Konradowie. Prawdopodobnie jedyną pracą wykonaną na obszarze zbiornika było wycięcie drzew rosnących wzdłuż koryta Słupi, ponieważ całą równinę zalewową zajmowały łąki, w większej części zaznaczane na mapach jako łąki podmokłe.

Przy budowie elektrowni i zapory zbiornika Konradowo prace zmieniające środowisko doliny rzecznej polegały na wybudowaniu:

- zapory ziemnej o długości 460 m z koroną na rzędnej 52,30 m n.p.m. i o szerokości korony 4 m; zapora wyposażona jest w betonowe upusty burzowe i upust głębinowy;
- kanału dopływowego o długości 960 m wykonanego częściowo przez wykop i częściowo przez nasyp grobli nad którym usytuowano dwa mosty;
- budynku elektrowni przy drodze do Klaushof;
- kanału odpływowego o długości ok. 100 m między elektrownią a Słupią.

Poniżej, około 2,5-kilometrowy odcinek dawnych meandrów rzeki położony pomiędzy zaporą a kanałem odpływowym, zasilają jedynie wody Brodka, lewobrzeżnego dopływu Słupi.

Przy budowie zbiornika Konradowo wykorzystano sprzyjające warunki morfologiczne występujące w dolinie Słupi powyżej tej miejscowości. Wody Słupi, spiętrzone na 12 m, to jest do rzędnej 50,6 m n.p.m., zalały obszerne rozszerzenie jej doliny, z terasą nadzalewową na prawym brzegu, oraz wlały się głęboko w dolinę małego lewobrzeżnego dopływu w okolicy Neu-Johanishof oraz przyległe obniżenie. Prawdopodobnie zalanie sięgnęło samego dworu, ponieważ na późniejszych mapach nie zaznaczono już jego zabudowań. W górę rzeki, podobnie jak w Krzyni, kształt zbiornika nawiązuje do kształtu dna doliny. Charakterystycznym elementem tego zbiornika jest zwężenie w jego środkowej części, gdzie zalaniu nie uległa lewobrzeżna terasa nadzalewowa, a minimalna szerokość zbiornika wynosi zaledwie 25 m.

Przemiany środowiska środkowej Słupi w wyniku zabudowy hydrotechnicznej i regulacji koryta rzeki

Wpływ zabudowy hydrotechnicznej i regulacji rzeki na rzeźbę dna doliny Słupi

Zmiany na obszarach zbiorników (w górnych, środkowych i dolnych częściach)

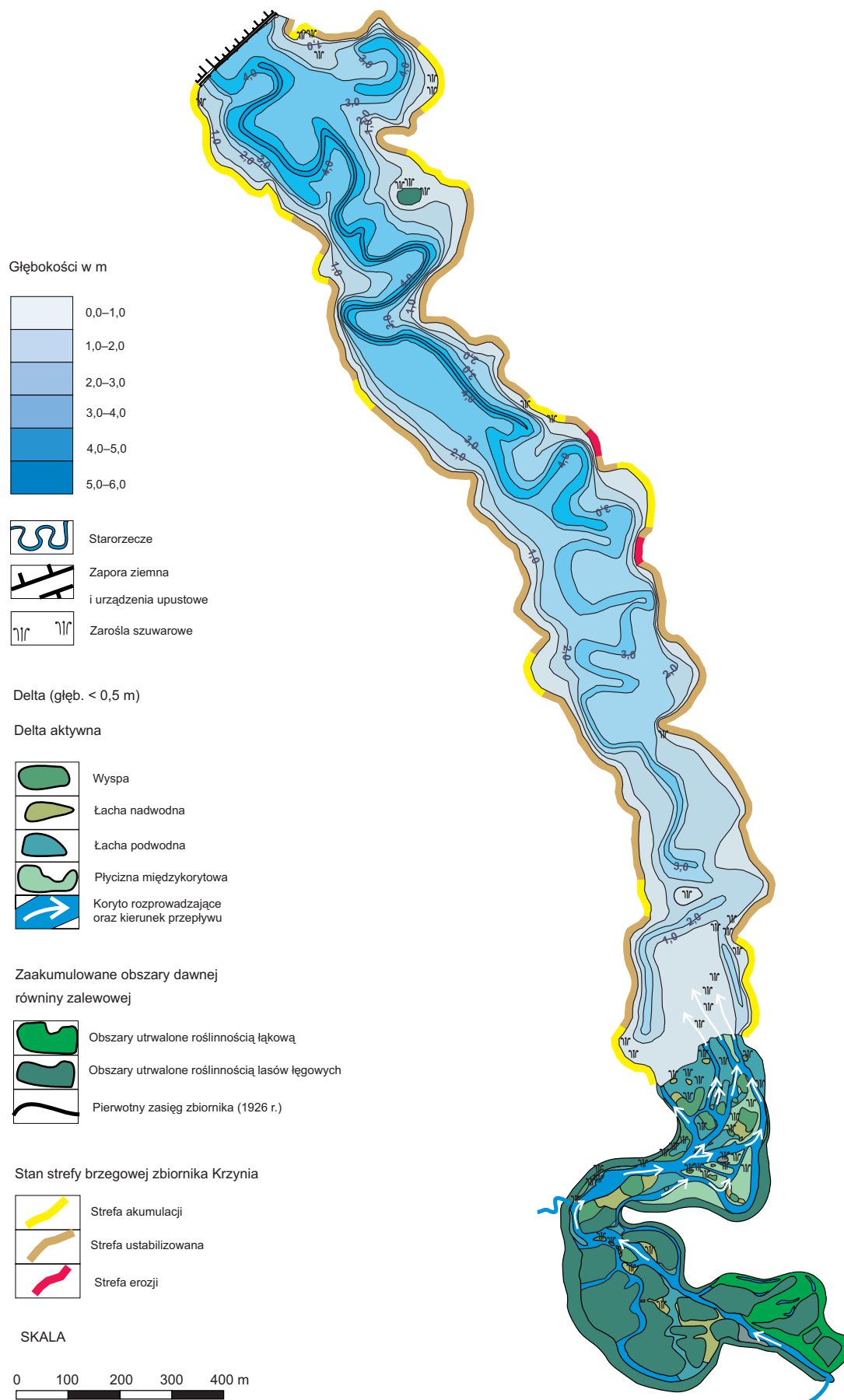
Archiwalne materiały kartograficzne oraz liczne i z różnych lat zdjęcia lotnicze dają możliwość prześledzenia trwającego przeszło 80 lat procesu zasypywania zbiorników, tworzenia się delt oraz ewolucji jego brzegów.

Rozwój delt

W zbiorniku Krzynia całkowitemu zasypaniu uległ górny, liczący 700 m odcinek, łączący się z niżej położoną, szerszą częścią zbiornika przewężonym zakolem w kształcie litery „S” (ryc. 2). Do tego miejsca rzeka zasypała swoimi osadami dawną równinę zalewową i wyprostowała swój bieg, odcinając dwa duże meandry. Poniżej, w rozszerzeniu zbiornika, występuje coraz bardziej rozrastająca się, aktywna część delty. Starsza część delty utrwalona jest roślinnością drzewiastą i krzewiastą. Na część aktywną delty wkracza roślinność szuwarowa porastająca formy wynurzone. Długość całego zasypanego odcinka, licząc w osi doliny, wynosi ok. 1420 m, a jego powierzchnia 19 ha. O wielkości i charakterze akumulacji w górnych partiach zbiornika decyduje nie tylko ilość niesionego i osadzanego materiału, ale również ukształtowanie tej części zbiornika.

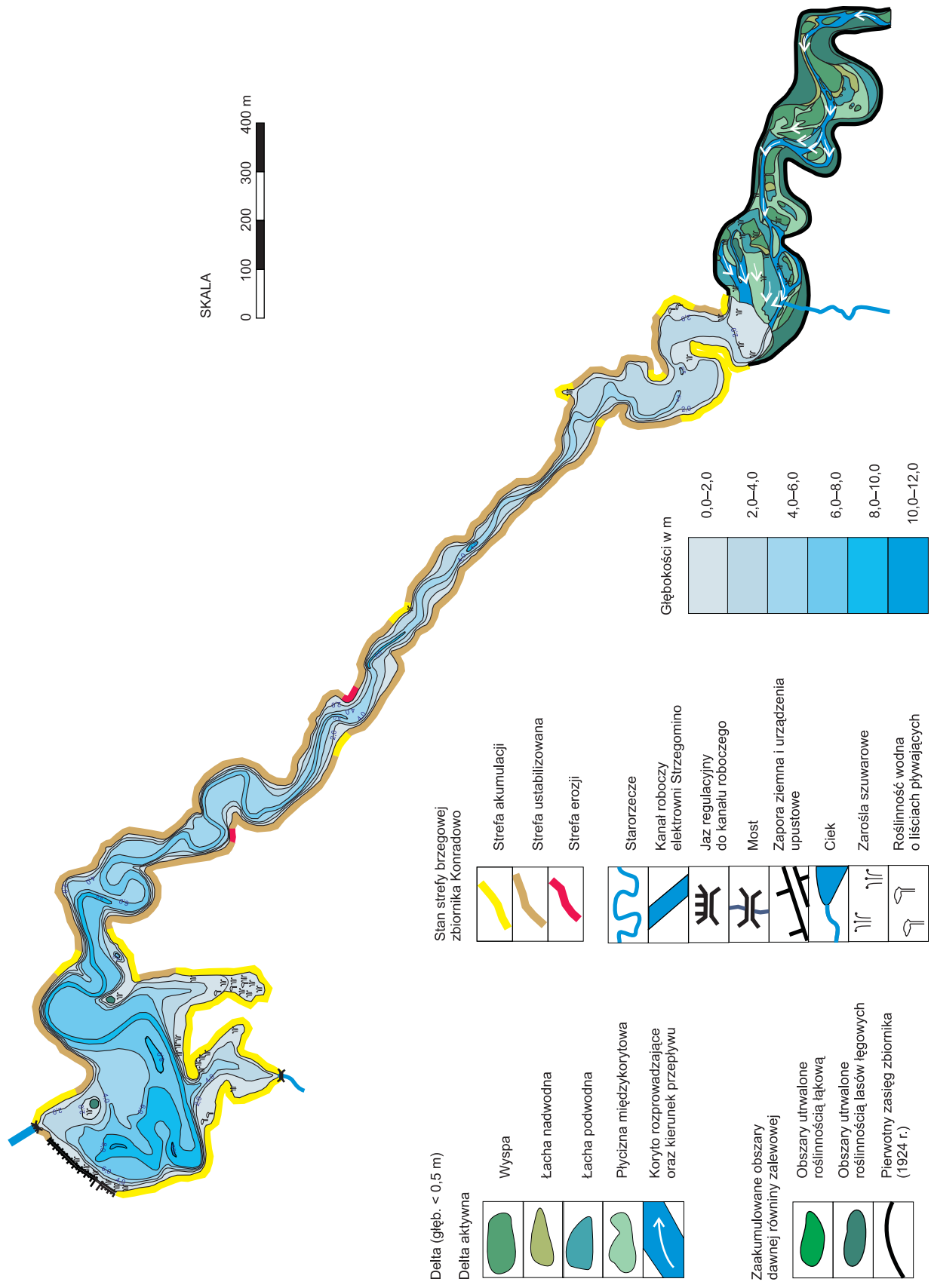
Górny 2-kilometrowy odcinek zbiornika Konradowo charakteryzuje się tym, że koryto rzeki nie zmieniło swojego położenia, natomiast pierwotnie zalana (około 10–30 cm) część równiny zalewowej została całkowicie przykryta osadami (ryc. 3). Zdjęcia lotnicze wyraźnie pokazują, że ta część zbiornika powróciła do stanu pierwotnego, a jedyną pozostałością zbiornika jest nadbudowana równina zalewowa, zarośnięta przez formacje drzewiaste, z bezpośrednio nad korytem trwale ukorzenioną roślinnością szuwarową.

Klasyczna forma delty jeziornej wykształciła się dopiero poniżej tego odcinka, w miejscu, gdzie występuje pierwsze, większe rozszerzenie zbiornika. Długość całego zakumulowanego odcinka, licząc w osi doliny, wynosi ok. 1680 m, a jego powierzchnia 22 ha. Problematyka związana z rozwojem delt w zbiorniku Konradowo i Krzynia została omówiona już wcześniej w pracy Florek (1997).



Ryc. 2. Batymetria, stan brzegów i delty zbiornika Krzynia

Fig. 2. Bathymetry, shoreline and delta morphology in the Krzynia reservoir



Ryc. 3. Batymetria, stan brzegów i delty zbiornika Konradowo
Fig. 3. Bathymetry, shoreline and delta morphology in the Konradowo reservoir

Akumulacja na dnie zbiornika

Oprócz zasypanych górnych, najpłytszych i najwęższych obszarów zbiorników oraz aktywnych delt, rozmiary akumulacji w pozostałych partiach zbiorników nie są duże, jednak większe w zbiorniku Konradowo. Wyraźnie to widać, gdy porówna się akumulację w dolnych, znacznie szerszych partiach obu zbiorników (ryc. 2, 3). W zbiorniku Krzynia przejawy akumulacji występują tylko lokalnie, przy wypłyeniach brzegowych, generalnie nie zmieniając charakteru brzegu. Akumulacji towarzyszy ograniczona sukcesja roślinności. Obszary akumulacji to: niewielki rejon położony wzdłuż obu brzegów tuż poniżej delty, drugi – usytuowany w środkowej partii zbiornika, w głębi zatok, na obu brzegach zbiornika, oraz trzeci – w rozszerzeniu ujściowym, przy lewym brzegu. Na dwóch obszarach obserwuje się zwiększoną akumulację przy znacznym udziale roślinności podwodnej i wynurzonej. Są to: teren wokół wyspy leżącej około 0,5 km w górę zbiornika oraz płycizna położona około 300 m poniżej delty, stanowiąca dawną wewnętrzną część zakola rzeki.

W Konradowie środkowa część zbiornika charakteryzuje się twardym dnem, nawet z występującym brukiem, bez śladów jakiegokolwiek akumulacji, co pokazują charakterystyczne profile echosondaży z niewielką amplitudą zapisu. Brak akumulacji spowodowany jest zwiększoną prędkością przepływu, co wynika ze znacznego przewężenia doliny w tym miejscu. Na odcinku około 1,5 km szerokość zbiornika wynosi od 25 m do 40 m.

Największe obszary akumulacji (ryc. 2, 3) obserwuje się w ujściowej, szerokiej części zbiornika. Są one, podobnie jak na obszarze delty, terenami akumulacji frakcji bardzo drobnoziarnistych, od piasków drobnoziarnistych do mułków. Skutki akumulacji takich osadów zaznaczają się na lewym brzegu zbiornika w postaci półwyspu, stanowiącego wewnętrzną wzniesienie w obrębie dawnego meandra. Tuż za nim, w dwóch dużych, ale stosunkowo wąskich zatokach, rozmiary akumulacji są tak duże, że obecnie około 50% ich powierzchni to obszar o głębokości poniżej 1 m. Akumulację tę wzmaga i utrwała występująca tutaj roślinność podwodna i nadwodna. Tylko w jednej z zatok uchodzący tu niewielki ciek powoduje ciągły ruch wody i zwiększony przepływ. Drugi obszar akumulacji występuje w zatoce przy prawym brzegu zbiornika w cieniu i wokół usytuowanej tam wyspy. Tutaj, w przeciwieństwie do lewego brzegu, udział roślinności w akumulacji osadów jest niewielki i ogranicza się jedynie do partii przybrzeżnych.

Osady denne zbiornika to w przewadze frakcje bardzo drobnoziarniste, od piasków drobnoziarnistych do mułków i frakcji ilastych. Na obszarach delt dominują frakcje 0,1–0,05 mm, natomiast w dolnych najgłębszych partiach zbiorników dominują frakcje 0,05–0,002, co dokumentują badania Banacha i

Chlost (2007). Frakcje ilaste dominują również wszędzie tam, gdzie akumulacja odbywa się przy udziale roślinności, zwłaszcza w lewobrzeżnych zatokach dolnej partii zbiornika Konradowo

Na dnie starego koryta Słupi na całym jego przebiegu w zbiornikach również przeważają osady o frakcji 0,05–0,002 mm (Banach, Chlost 2007), nie maskując jednak jego rzeźby, co pokazują pomiary batymetryczne wykonane echosondą (Florek, Łęczyński 2007, ryc. 2, 3). Nie jest to koryto martwe, a o jego funkcjonowaniu świadczy nieprzerwany jego przebieg na całej długości zbiornika, wyraźnie widoczny na zdjęciach lotniczych, oraz różnice w jego przebiegu w stosunku do okresu sprzed zabudowy (Messtischblatt 1907).

Procesy brzegowe

Brzegi zbiornika Krzynia tworzą strome i wysokie zbocza doliny Słupi. Są one tutaj całkowicie porośnięte dobrze utrzymanym starodrzewem, który schodzi aż do samej linii brzegowej zbiornika. Linie brzegową utrwalają również formacje roślinności trawiastej, dobrze ukorzonej i nie wydeptanej. Dlatego, poza omówionym uprzednio obszarem delty, linia brzegowa zbiornika w widoczny sposób nie ulega zmianie. Brzegi ustabilizowane i nie wykazujące żadnych zmian stanowią 64,4% linii brzegowej zbiornika (ryc. 2, 3). Nigdzie na całej długości linii brzegowej nie zaobserwowano wyraźnych śladów procesu erozji. Na obu brzegach zbiornika nie zaobserwowano również zboczy odsłoniętych, pozabawionych roślinności, a więc podatnych na procesy osuwiskowe. Jedynym świadectwem erozji jest przesunięcie linii brzegowej w głąb dwóch niewielkich zatoczek, co jest przejawem bocznego przesunięcia przebiegających w tych miejscach zakoli koryta Słupi. Nie są to świeże ślady, ale świadczą o funkcjonowaniu meandrującego nurtu rzeki, mimo zalania obszaru wodami zbiornika.

Skutki akumulacji obserwuje się na 32,2% długości linii brzegowej. Pierwszy jej rodzaj występuje na obszarach osadzania się drobnych frakcji mineralnych w przybrzeżnej, najpłytszej partii zbiornika, gdzie akumulacja odbywa się z niewielkim udziałem roślinności i polega na nadbudowie dna i brzegu detrytusem roślinnym. Drugi – to fragmentaryczne ślady starszej akumulacji, występujące w dolnej części lewego brzegu zbiornika, w postaci niewielkich stożków napływowych utworzonych u wylotu kilku dolinek rozcinających zbocza wysoczyzny morenowej. Nadwodne powierzchnie stożków są dzisiaj trwale umocnione roślinnością, a podwodne zostały częściowo rozmyte.

Brzegi zbiornika Konradowo również nawiązują do kształtu doliny – są wysokie i strome. Tylko w rozszerzeniu jego ujściowej części lewy brzeg zachodnich zatok jest płaski i łagodnie wznosi się ponad dno

doliny. Położone tam zatoki charakteryzują się brzegami niskimi, przy których dominują procesy akumulacji (ryc. 3).

Wschodni brzeg zbiornika na całej swojej długości jest wysoki, w niektórych miejscach tworząc wręcz formy krawędziowe. Mimo to brzeg ten jest ustabilizowany, nie występują tutaj osuwiska, nie obserwuje się też skutków abrazji brzegów ani występowania innych procesów erozyjnych. Na kilku niewielkich fragmentach obserwuje się akumulację przybrzeżną, nie ma tu płycizn porośniętych roślinnością. Na jednym, 20-metrowym odcinku widoczne są niewielkie ślady erozji brzegowej.

Lewy brzeg zbiornika, aż do zatok położonych w dolnym rozszerzeniu, to strefa stabilizacji. Strefy akumulacji występują tutaj jedynie w zatoczkach przy trzech niedużych półwyspach, a niewielka strefa erozji obejmuje inny fragment małej zatoczki. Natomiast zatoki usytuowane na lewym brzegu dolnego, przyczaporowego fragmentu zbiornika są obszarem największej akumulacji. Występujące tu rozległe płycizny pokryte są utrwalającą je roślinnością podwodną i szuwarami, wskutek czego oprócz akumulacji najdrobniejszych frakcji mineralnych ma tutaj miejsce wzmoczone osadzanie się materiału organicznego. Strefy akumulacji przy lewym brzegu są charakterystyczne w sumie dla około 28,1% jego długości (ryc. 3).

W sumie strefy akumulacji stanowią 31,5% długości linii brzegowej zbiornika Konradowo, a strefy ustabilizowane obejmują około 66,4% długości linii brzegowej zbiornika, przy czym zdecydowanie przeważają na prawym brzegu, a niewielkie strefy erozji występują na 2,45% brzegu. Tak duża stabilizacja brzegów wynika z wysokiej lesistości obszaru oraz utrudnionej dostępności brzegów. Na stromych zboczach zbiornika Konradowo występuje liściasty starodrzew, w którym dominuje olsza czarna porastająca brzegi aż do linii wody i sięgająca koronami do 3 m ponad taflę wody. Świadectwem erozji jest niewielka zmiana położenia linii brzegowej prawego brzegu zbiornika, co, jak stwierdzono, jest wynikiem bocznego przesunięcia dawnego koryta Słupi biegnącego w tym miejscu. Nie są to świeże ślady, ale świadczą o funkcjonowaniu meandrującego nurtu rzeki mimo zalania obszaru wodami zbiornika.

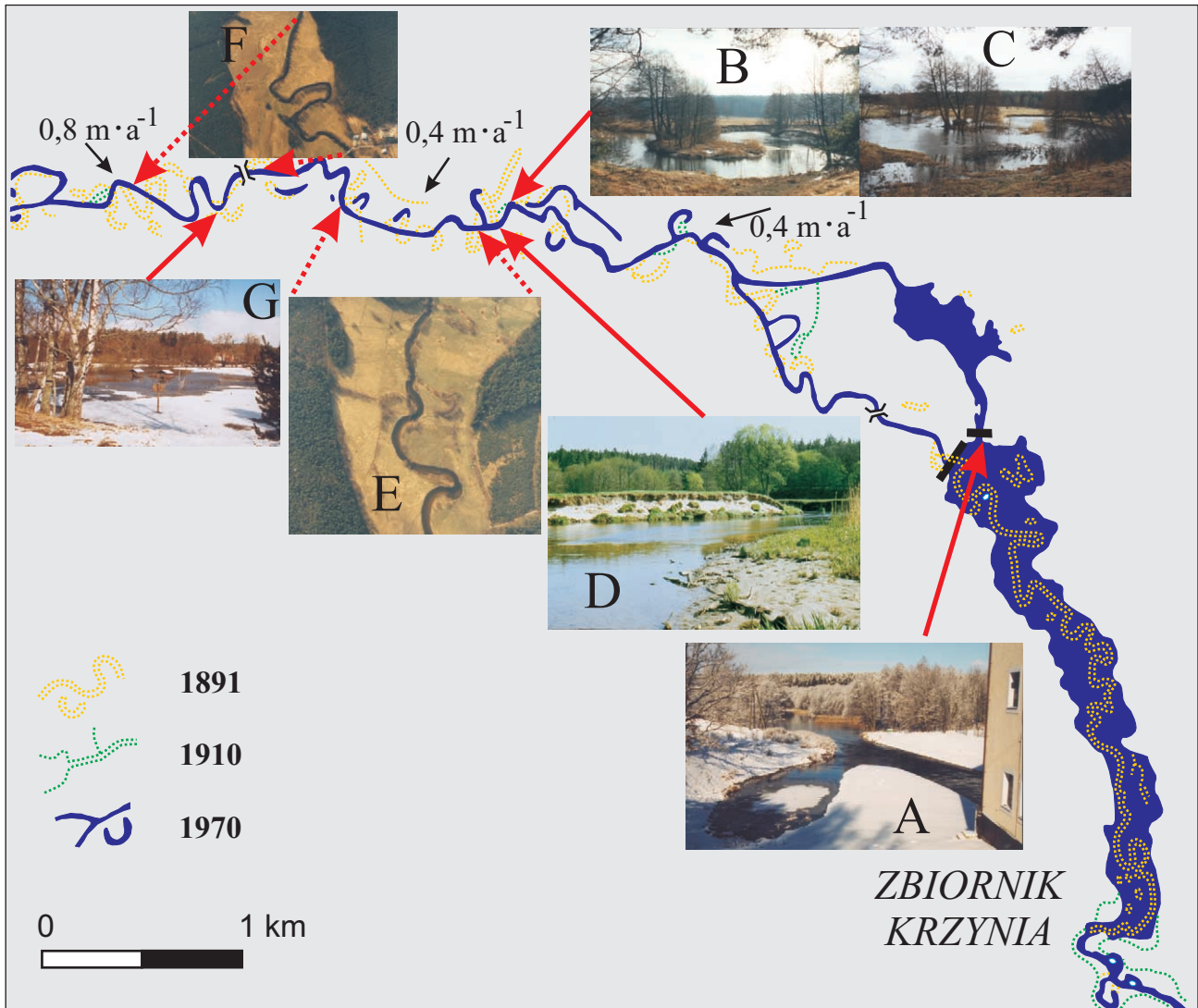
Jednym z elementów monitoringu zbiorników była obserwacja wpływu falowania na procesy brzegowe w czasie zdarzeń ekstremalnych, zwłaszcza w obszarach podatnych na erozję. Okazało się, że ze względu na prawie południkowe usytuowanie zbiorników oraz dominację wiatru z sektora zachodniego, ale głównie ze względu na prawie 100-procentowe zalesienie brzegów zbiorników, falowanie na nich jest niewielkie i nie ma istotnego znaczenia dla procesów brzegowych.

Wpływ pracy elektrowni Strzegomino i Krzynia na przebieg procesów brzegowych

Krzynia i Konradowo są zbiornikami utworzonymi dla elektrowni pracujących w systemie szczytowym z wyrównaniem dobowym, dlatego należy również ten aspekt wziąć pod uwagę przy rozpatrywaniu charakteru i dynamiki procesów brzegowych. Wartość minimalnej rzędnej lustra wody w cofce zbiornika Krzynia jest zgodna z minimalną wartością rzędnej lustra wody w kanale odpływowym elektrowni Strzegomino. Praca obu elektrowni jest tak zsynchronizowana, że podczas pracy w szczycie elektrowni Krzynia i przy równoczesnej pracy elektrowni Strzegomino nie następuje obniżanie, ale wzrost poziomu lustra wody w zbiorniku Krzynia o 11 do 15 cm, przy czym wzrost i spadek poziomu lustra wody w zbiorniku odbywają się na tyle wolno, że nie wpływa to negatywnie na stan jego brzegów (Florek, Łęczyński 2007). Zbiornik Konradowo, oprócz wód Słupi przechodzących przez elektrownię Gałąźnia Mała, jest zasilany wodami „starej Słupi” i jej lewobrzeżnego dopływu – Kamienicy. Dzięki temu podczas pracy elektrowni nie zachodzi konieczność obniżania lustra wody aż do minimalnej rzędnej piętrzenia. Pomierzone wahania poziomu lustra wody w czasie pracy elektrowni Strzegomino, przy szczytowym przepływie, maksymalnie sięgają około 0,2 m w ciągu doby. Spadek lub wzrost poziomu lustra wody nie jest gwałtowny, a brzegi zbiornika utrwalone na samych krawędziach roślinnością trawiastą doskonale znoszą te zmiany.

Zmiany poniżej zbiorników

Poniżej zbiorników i zamykających je zapór obserwuje się zwykle powstanie wyboju miejscowego, przegłębienia w dnie koryta rzeki, co jest efektem nadwyżki potencjału energetycznego rzeki uwolnionej na odcinku zbiornikowym od większości transportowanego rumowiska rzeczno i po uprzednim spiętrzeniu przepływającej przez urządzenia energetyczne. Mimo technicznych prób rozproszenia energii rzeki, wybój miejscowy rozrasta się zwykle stopniowo w dół rzeki, co prowadzi do pogłębienia koryta i jego wcięcia w powierzchnię równiny zalewowej. W środkowym biegu Słupi efekt ten jest szczególnie widoczny poniżej elektrowni Krzynia. Wyżej leżące elektrownie: Gałąźnia Mała i Strzegomino (Konradowo) tworzą system kaskadowy, wskutek czego wybój miejscowy obejmuje tu bardzo krótkie odcinki koryta Słupi. Inaczej jest poniżej Krzyni, mimo iż jej wody po przepłynięciu turbin przepływają jeszcze przez niewielkie jezioro Krzynka. Skutkiem rozwoju wyboju miejscowego jest erozja denną prowadząca do obniżenia dna koryta rzeczno. Jej rozmiary można ocenić poprzez analizę zmian minimalnych stanów rocznych na posterunkach wodo-



Ryc. 4. Zmiany przebiegu koryta Słupi na odcinku Krzynia–Łysomice w latach 1891–1970, podano średnie tempo bocznej erozji na wybranych odcinkach (Florek 1989a, 1991)

A – kanał odprowadzający wodę z elektrowni Krzynia i j. Krzynka pełniące funkcję zbiornika wyrównawczego, B – odcinane zakole Słupi; stan średni 3.02.1997; C – odcinane zakole Słupi; stan z wezbrania 29.01.2002; D – ślady erozji wgłębnej i bocznej; E – koryto i równina zalewowa Słupi; F – koryto i równina zalewowa koło Łysomiczek; G – zimowe wezbranie poniżej wodowskazu w Łysomiczkach; 19.03.2005

Fig. 4. Channel pattern change in the Krzynia–Łysomice reach between 1891–1970, mean rate of lateral erosion in selected reaches is indicated (after Florek 1989a, 1991)

A – discharge canal from the Krzynia power station and Krzynka Lake, which is the equalizing reservoir; B – Słupia meander in the process of cutting off; mean water level 3.02.1997; C – meander in the process of cutting off; flood water level 29.01.2002; D – evidence of scour and lateral erosion; E – channel and floodplain of Słupia river; F – channel and floodplain of Słupia river at Łysomiczki; G – winter flood downstream of Łysomiczki gauging station, 19.03.2005

wskazowych. W przypadku Słupi poniżej Krzyny nie jest to łatwe, ponieważ najbliższy wodowskaz w Łysomiczkach zainstalowano dopiero w latach 60. XX w. Interesujące jest, że na wodowskazie w Lubuniu oddalonym od elektrowni Krzynia o 9 km pogłębienie koryta (o ok. 1 m) dokonało się dopiero w latach 1945–1951. Skutkiem erozji wgłębnej na wielokilometrowym odcinku położonym poniżej elektrowni Krzynia jest też drenaż równiny zalewowej, czego dowodem jest całkowity brak wody w starorzeczach odciętych w wyniku XX-wiecznej regulacji i przesuszenie den basenów powodziowych.

Warto dodać, że podczas znaczących wezbrań równina zalewowa jest zatapiająca dopiero na odcinku położonym koło wodowskazu w Łysomiczkach (fot. G na ryc. 4). Wzrost aktywności fluwialnej Słupi poniżej Krzyny obejmuje również erozję boczną, której tempo sięga tu 0,4–0,8 m/rok (Florek 1991, ryc. 4 i fot. D na ryc. 4).

Zmiany tempa procesów i ich uwarunkowania

Na charakter procesów w zabudowanej hydrotechnicznie dolinie Słupi na odcinku Gałąźnia Ma-

ła–Krzynia największy wpływ ma do dzisiaj sposób zabudowy; zbiorniki powstały przez spiętrzenie i zalanie doliny Słupi bez uprzednich ingerencji w jej ukształtowanie. Istotne jest, że elektrownie od momentu uruchomienia pracują do dzisiaj nieprzerwanie oraz że zbiorniki ani razu nie były przepłukiwane lub bagrowane. Konsekwencje takiego stanu rzeczy są następujące:

- brak uszkodzeń w drzewostanie porastającym zbocza doliny, co uniemożliwiło ich erozję,
- akumulacja osadów jako proces dominujący w przekształceniach części doliny Słupi zalanych przez zbiorniki:
- w górnych, najpłytszych partiach zbiornika (10–30 cm) jako szybkie i całkowite przykrycie powierzchni dawnej równiny zalewowej pokrywą osadów, z prawie natychmiastową sukcesją roślinności,
- na odcinkach środkowych, w rozszerzeniu zbiorników, wykształcenie rozrastającej się do dzisiaj delty,
- akumulacja materiału drobnoziarnistego w zaporowych rozszerzeniach zbiorników lub bocznych zatokach, intensywna wszędzie tam, gdzie głębokość nie była większa niż 1,0 m, najczęściej przy współdziałaniu roślinności wodnej,
- powstanie w dolnych partiach zbiorników wysp w miejscach, gdzie głębokość była mniejsza od 0,5 m,
- niewielka akumulacja w pozostałych obszarach zbiorników, mająca charakter powlekania zastanych form.

Literatura

- Banach M., Chlost I. 2005. Zbiornik Krzynia jako basen sedimentacyjny rzeki Słupi. [W:] A. Kotarba, K. Krzemień, J. Święciechowicz (red.), Współczesna rzeźba Polski. Kraków, s. 27–32.
- Banach M., Chlost I. 2007. Z badań nad strukturą i właściwościami osadów zbiornika Krzynia. *Słupskie Prace Geograficzne*, 3: 107–119.
- Florek E. 1995. Rozwój zabudowy hydrotechnicznej Słupi. *Słupskie Prace Matematyczno-Przyrodnicze*, 10c: 3–22.
- Florek E. 1997. Akumulacja w zbiornikach Krzynia i Konradowo na Słupi w świetle analizy zdjęć lotniczych. [W:] W. Florek (red.), *Geologia i geomorfologia Pobrzeża i południowego Bałtyku*, 3: 49–61.
- Florek E. 2001. System hydroenergetyczny rzeki a przekształcenia doliny Słupi. [W:] E. Gerstmannowa (red.), *Materiały do monografii przyrodniczej regionu gdańskiego. T. 5. Park Krajobrazowy „Dolina Słupi” (przyroda–kultura–krajobraz)*. Wydawnictwo Gdańskie, Gdańsk, s. 51–58.
- Florek E., Łęczyński L. 2007. Akumulacja i procesy brzegowe w zbiornikach energetycznych Konradowo i Krzynia na środkowej Słupi. *Słupskie Prace Geograficzne*, 3: 121–140.
- Florek W. 1989a. Osady dna doliny Słupi i ich wiek radiowęglowy. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia*, 15/1–2: 73–101, 209–211.
- Florek W. 1989b. Późnowistuliańska i holocenińska ewolucja doliny Słupi. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia*, 15/1–2: 158–199, 213–215.
- Florek W. 1991. Postglacialny rozwój dolin rzek środkowej części północnego skłonu Pomorza. *Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Słupsku*, Słupsk, s. 238.
- Hesse T. 1999. Zbiorniki zaporowe Radwi – stan poznania i zagrożenia. [W:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych*, 2: 75–79.
- Orłowski A. 1983. Litostratygrafia i paleogeomorfologia doliny Słupi. Maszynopis pracy doktorskiej w Katedrze Geografii Fizycznej Uniwersytetu Gdańskiego.