

Dr Piotr Gierszewski
A U T O R E F E R A T

Zakład Zasobów Środowiska i Geozagrożeń
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego
Polska Akademia Nauk

1. Imię i Nazwisko

Piotr Gierszewski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 1998, doktor nauk o Ziemi w zakresie geografii, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, praca doktorska: „Charakterystyka środowiska hydrochemicznego wód powierzchniowych zachodniej części Kotliny Płockiej”, promotor: prof. dr hab. Jan Szupryczyński, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN,
- 1985, magister geografii, specjalizacja geomorfologia i paleogeografia czwartorzędu, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Biologii i Nauk o Ziemi, praca magisterska pt.: „Morfogeneza Wzgórz Obkaskich”, promotor: dr M. Pasierbski.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01.01.2008 – nadal	specjalista - Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
01.10.2003 – 31.05.2018	adiunkt – Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Instytut Geografii (od 01.10.2016 do 31.05.2018 – urlop bezpłatny)
01.01.1999 – 31.12.2007	adiunkt - Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
01.07.1995 – 31.12.98	starszy specjalista - Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
15.03.1989 – 30.06.95	starszy asystent - Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
01.11.1987 – 14.03.89	asystent - Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
01.06.1986 – 31.10.87	młodszy dokumentalista - Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
01.07.1985 – 31.05.1986	stażysta – Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego,

Hydromorfologiczne uwarunkowania funkcjonowania geoekosystemu Zbiornika Włocławskiego.

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

Piotr Gierszewski, *Hydromorfologiczne uwarunkowania funkcjonowania geoekosystemu Zbiornika Włocławskiego*, 2018, *Prace Geograficzne nr 268*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk, Warszawa, recenzenci wydawniczy: Prof. dr hab. Ryszard K. Borówka, Dr hab. Paweł Prokop

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzenie.

Spiętrzenie wód rzecznych zaporami jest jednym z najbardziej spektakularnych przykładów przerwania kontinuum rzecznego. Szacuje się, że więcej niż 50% dużych rzek na świecie utraciło w ten sposób ciągłość (Straßkraba i in. 1993, Ward i Stanford 1995), a prawie 60% odpływu rzecznego jest odpływem regulowanym przez człowieka (Nilsson i in. 2005). Fragmentacja systemów rzecznych zaporami modyfikuje reżim przepływu, właściwości chemiczne wody w granicach spiętrzenia i poniżej zapory oraz zmienia warunki transportu klastycznego rumowiska rzecznego (m.in. Babiński 2002, Friedl i Wüest 2002, Vörösmarty i in. 2010; Liermann i in. 2012, Wagner i Zalewski 2000, Wei i in. 2009, Zhang i in. 2010, Syvitsky i in. 2005). Skutki oddziaływania zapór i zbiorników zaporowych na środowisko doliny rzecznej są bardzo zróżnicowane i widoczne zarówno powyżej, jak i poniżej budowli piętrzącej (Petts 1984). Na początku dochodzi do przekształcenia abiotycznych elementów środowiska, których stan i funkcjonowanie zależy bezpośrednio od cech ustroju rzecznego. Ich bezpośrednim następstwem są zmiany produktywności biologicznej ekosystemu oraz ilościowo-jakościowe przekształcenia fauny zasiedlającej doliny rzeczne (Williams, Wolman 1984, Knighton 1988, Ibáñez i in. 1996, Batalla i in. 2004, Renöfält i in. 2010).

Złożoność procesów przyrodniczych i oddziaływań antropogenicznych zachodzących w zlewniach rzecznych, ale także cechy samych zbiorników, uwarunkowane ich położeniem w systemie rzeczonym, funkcjami i warunkami eksploatacji oraz wielkością zapory powodują,

że zbiorniki zaporowe są w dużym stopniu obiektami niepowtarzalnymi. Ta ich cecha oraz zwiększająca się z każdym rokiem ilość nowych zbiorników powoduje, że są one cały czas przedmiotem zainteresowań badawczych.

Największe zmiany w funkcjonowaniu ekosystemów rzecznych widoczne są powyżej zapór, gdzie dochodzi do większego lub mniejszego przekształcenia warunków rzecznych w jeziorne. Decydująca o transporcie rumowiska i aktywności geomorfologicznej moc jednostkowa strumienia rzeczno-traci na znaczeniu ustępując miejsca m. in. falowaniu, prądom wiatrowym, gęstościowym. W efekcie w dolnych częściach zbiorników tworzy się, wewnętrzny, niezależny od przepływu rzeczno-układ cyrkulacji wody (m.in. Denisova i in. 1989, Avakân i in. 1994, Litvinov 2000). Zmieniające się w kierunku zapory właściwości środowiska wodnego pozwalają na wyznaczenie w zbiornikach zaporowych trzech charakterystycznych odcinków: rzeczno-, przejściowego i jeziornego. Przenikanie się cech rzecznych i jeziornych tzw. gradient lotyczno-lenityczny, decyduje o rodzaju i natężeniu przebiegających w zbiornikach procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych (Kimmel i Groeger 1984, Straskraba, Tundisi 1999).

Cel badań

Istnieje przekonanie, że zbiorniki zaporowe o szybkiej wymianie wody i hydroenergetycznej funkcji powodują najmniejsze przekształcenia reżimu hydrologicznego, a tym samym również innych komponentów środowiska rzeczno- (Kimmel i in. 1990, Straskraba i Tundisi 1999, Giziński i Falkowska 2003, Richter i Thomas 2007, Torabi Haghighi i in. 2014). Weryfikacja tej tezy była jednym z celów badań, prowadzonych na Zbiorniku Włocławskim. Uznając czynnik hydrologiczny za determinujący przebieg procesów przyrodniczych w zbiornikach zaporowych założono, że charakter transformacji przepływu Wisły będzie miał zasadniczy wpływ na funkcjonowanie geoekosystemu zbiornika oraz rzeki poniżej zapory. Punktem wyjścia była, więc analiza wpływu spiętrzenia na transformację reżimu hydrologicznego rzeki (przepływów i stanów wody). Najważniejszym czynnikiem hydrologicznym wpływającym na warunki rozwoju i strukturę hydrobiontów jest długość czasu retencji wody w zbiorniku (Straskraba i Tundisi 1999). Dlatego istotne jest określenie czasu trwania okresów o optymalnym dla rozwoju gatunków limnicznych tempie wymiany wody. Wskaźniki tempa wymiany nie odzwierciedlają jednak zróżnicowanej przestrzennie dynamiki wody w zbiorniku i rzeczywistego tempa jej wymiany. Określenie zróżnicowania prędkości przepływu wody oraz charakteru cyrkulacji wody w Zbiorniku Włocławskim było także jednym z celów badań. Skutkiem zmiany warunków przepływu wód

rzecznych przez zbiornik zaporowy oraz zróżnicowania warunków hydrodynamicznych w granicach samego zbiornika jest ilościowe i jakościowe przekształcenie właściwości rumowiska rzeczno. Ocena wielkości tych przekształceń oraz rozpoznanie uwarunkowań i prawidłowości przestrzennego zróżnicowania parametrów fizykochemicznych wody oraz właściwości zawiesiny i osadów dennych umożliwiło określenie wewnętrznej struktury geoekosystemu i mechanizmów funkcjonowania Zbiornika Włocławskiego.

Rozpoznanie hydromorfologicznych uwarunkowań funkcjonowania geoekosystemu Zbiornika Włocławskiego pozwoliło odnieść się do kilku ważnych kwestii związanych z funkcjonowaniem zbiorników podobnego typu. Ich wyjaśnienie zawiera się w odpowiedziach na następujące problemy:

- czy i w jakich warunkach nizinny zbiornik zaporowy o szybkiej wymianie wody wykazuje zróżnicowanie właściwości fizyczno-chemicznych wody oraz cech litologicznych i geochemicznych osadów dennych,
- czy w średniej wielkości nizinnym zbiorniku zaporowym typu dolinnego o szybkiej wymianie wody dochodzi do zróżnicowania właściwości środowiska wodnego w osi zbiornika oraz różnic między dawną częścią nurtową i zalewową,
- w jakim stopniu zatopione koryto rzeczne wpływa na warunki przepływu wody, materiału w formie rozpuszczonej i zawieszonej oraz na jakim odcinku stanowi ono drogę uprzywilejowanego przepływu,
- czy w strefie pozakorytowej zbiornika obejmującej zatopioną równinę zalewową i poziomy tarasowe wykształcił się system funkcjonujący niezależnie od przepływu rzeki oraz jak jest on powiązany z systemem koryta.

Obszar badań

Stopień wodny we Włocławku został oddany do eksploatacji w 1970. W założeniach miał on być pierwszym z ośmiu tworzących kaskadę dolnej Wisły. Obiekt ten o długości 1200 m składa się z pięciu budowli: ziemnej zapory czołowej, jazu, elektrowni wodnej o mocy 160 MW, przepławki dla ryb i śluzy żeglugowej i zapory bocznej na lewym brzegu Wisły. W wyniku spiętrzenia Wisły o 14 m powstał największy pod względem powierzchni (75 km²) zbiornik zaporowy w Polsce. Długość zbiornika wynosi 57 km, średnia szerokość 1,2 km, średnia głębokość 5,5 m, a głębokość maksymalna ok. 15 m. Większe głębokości występują na linii dawnego nurtu rzeki, przebiegającego przeważnie wzdłuż prawego brzegu. Płycizny związane są z zalanymi łąkami i kępami wiślanymi oraz niskim lewym brzegiem. Aktualna pojemność zbiornika szacowana jest na 370 mln m³ (Tersa 2013). Zbiornik Włocławski ma

typowo dolinny charakter, jest wąski i długi o mało urozmaiconych brzegach. Spiętrzenie nieuregulowanej rzeki o roztokowo-anastomozującym układzie koryta jest przyczyną zróżnicowanej morfologii dna zbiornika. Obszar zbiornika obejmuje dawne koryto wielkiej wody wraz z niskimi terasami lewego brzegu. Na część niezwiązaną z dawnym korytem Wisły przypada tylko 14 % powierzchni zbiornika. Strefa ta rozciąga się wzdłuż niskiego, lewego brzegu, w środkowej i dolnej jego części zbiornika. W górnej i środkowej części zbiornika dawne koryto Wisły stanowi drogę uprzywilejowanego przepływu. Znajduje to odzwierciedlenie w przebiegu sedymentacji, zjawisk lodowych i termice zbiornika (Babiński, Grześ 1995).

Zróżnicowanie budowy geologicznej i rzeźby obszarów graniczących ze zbiornikiem wpływa na różny charakter morfologiczny prawego i lewego brzegu zbiornika. Budujące prawy brzeg zbiornika utwory neogeńskie i czwartorzędowe charakteryzują się dużym zróżnicowaniem litologicznym, zarówno lateralnym, jak i w profilu pionowym, co w istotny sposób wpływa na rozwinięcie morfologiczne krawędzi i zbocza wysoczyzny oraz linii brzegowej zbiornika. Brzeg lewy budują w ponad 90% czwartorzędowe osady piaszczyste (Banach 1994). Litologiczne zróżnicowanie brzegów zbiornika jest przyczyną urozmaiconej morfometrii i morfologii strefy brzegowej. Brzeg prawy charakteryzuje się znaczną wysokością 40-50 m, dużym nachyleniem zboczy 10-50°. Jego rzeźba jest kształtowana przez zachodzące na dużą skalę procesy osuwiskowe, a także procesy obrywania i osypywania się materiału. Intensywna abrazja tego brzegu jest istotnym źródłem dostawy materiału klastycznego do zbiornika (Banach 1988). Lewy brzeg zbiornika jest niski (najwyższe klify osiągają wysokość zaledwie 6 m) i płaski.

Ukształtowanie czaszy zbiornika podlega ciągłym zmianom (Bogucka-Szymalska i Magnuszewski 2007). Są one wynikiem sedymentacji materiału piaszczysto-żwirowego, niesionego przez rzekę Wisłę, transformacji brzegów poprzez abrazję, obrywy i obsuwy (szczególnie wysokiego prawego brzegu), oraz prowadzonych prac bagrowniczych (Babiński, Grześ 1995). Do znaczącego przemodelowania dna zbiornika dochodzi również podczas sztormów i przepływów wezbraniowych (Mroziński i Pawula 2018).

Jako pojedynczy obiekt na nieuregulowanej nizinnej rzece, Zbiornik Włocławski jest obecnie wykorzystywany do celów hydroenergetycznych i rekreacyjnych. Funkcjonowanie pojedynczej zapory na nieuregulowanej rzece jest przyczyną wielu problemów eksploatacyjnych. Do najpoważniejszych należą: erozja koryta poniżej zapory, nadmierna akumulacja osadów w zbiorniku oraz zagrożenie powodzią zatorowymi.

Metody badań

Wielowątkowy zakres badań wymagał zastosowania różnorodnych metod badawczych, począwszy od instrumentalnych badań terenowych, poprzez badania laboratoryjne, analizę statystyczną i kartograficzną kończąc na wykorzystaniu metod modelowania matematycznego i symulacji komputerowych.

Zasadniczą część badań terenowych, obejmujących pomiary prędkości i kierunku płynięcia wody akustycznym prądomierzem dopplerowskim, właściwości fizyczno-chemiczne wody, pomiary meteorologiczne, sondowanie miąższości osadów dennych oraz pobór próbek osadów i wody do analiz laboratoryjnych przeprowadzono w latach hydrologicznych 2000-2005. Odcinek zbiornika na którym prowadzono badania terenowe rozciągał się od mostu kolejowo-drogowego w Płocku (km 632,3 biegu Wisły) do zapory we Włocławku (km 674,8 biegu Wisły). Badania laboratoryjne obejmowały analizy: uziarnienia osadów dennych i zawiesiny, gęstości objętościowej osadów dennych, zawartości materii organicznej w osadach dennych i zawiesziny, węglanów w osadach dennych, składu minerałów ilastych w osadach dennych, koncentracji wybranych metali w osadach dennych.

Uziarnienie próbek osadów dennych i zawiesziny mineralnej badano metodą laserową oraz kombinowaną (sitowo-laserową). Zawartość materii organicznej badano metodą prażenia w temperaturze 550°C, a węglanów w temperaturze 925°C. Oznaczany w ten sposób ubytek masy (stratę po prażeniu) utożsamiano z zawartą w osadzie substancją organiczną i węglanami. Analiza gęstości objętościowej wykonana została metodą pierścienia tnącego. W 12 próbkach osadów zbadano skład mineralogiczny frakcji ilastej za pomocą metody dyfraktometrycznej (Kobierski i Długosz 2009). Analizy koncentracji pierwiastków w 49 próbkach osadów dennych wykonano w Pracowni Chemicznych Procesów Proekologicznych Wydziału Chemii UMK metodą Spektrometrii Fluorescencji Rentgenowskiej (XRF). Dodatkowo w sześciu próbkach, które uznano za reprezentatywne dla analizowanego odcinka zbiornika, wykonano analizę specyjną Cd, Cu, Fe, Ni, Pb i Zn. Badania te przeprowadzone zostały według procedury Tessiera i in. (1979) w Katedrze Gleboznawstwa i Ochrony Gleb UTP w Bydgoszczy (Dąbkowska-Naskręt i in. 2008).

Oprócz wyników badań laboratoryjnych i pomiarów terenowych w badaniach wykorzystane zostały wyniki podstawowego i regionalnego monitoringu, jakości wód Wisły realizowanego przez Inspektoraty Ochrony Środowiska w Warszawie i Bydgoszczy. Materiał analityczny obejmował wyniki analiz hydrochemicznych z lat 1990-2009 pochodzące z 5 punktów kontrolnych. Dane hydrologiczne, na które składały się średnie dobowe wartości natężenia przepływu wody z przekrojów wodowskazowych w Kępie Polskiej i Włocławku z

lat hydrologicznych 1971-2015 zostały pozyskane z IMGW. Dane przepływów godzinowych z roku 2013 oraz średnie dobowe wartości stanów wody na zaporze we Włocławku z lat hydrologicznych 1971-2011 pochodzą z RZGW w Warszawie.

Interpretacja analiz uziarnienia osadów oraz zawiesiny mineralnej polegała na wyznaczeniu wartości parametrów statystycznych według wzorów Folka i Warda (1957) i dalszej ich analizie na diagramach zależności parametrów statystycznych uziarnienia. Związek między teksturą osadu, a sposobem transportu materiału ziarnowego przeanalizowano na diagramie C/M (Passega 1964) oraz na podstawie kształtu krzywych kumulacyjnych (Moss 1962, Visher (1965). Prędkości depozycyjne osadów obliczono według wzoru Kostera (1978). Siłę, kształt i kierunki zależności między zmiennymi hydrologicznymi, hydrochemicznymi i sedymentologicznymi zbadano za pomocą analizy korelacji i regresji. Do interpretacji zróżnicowania czasowo-przestrzennego analizowanych zmiennych wykorzystano narzędzia statystyki opisowej zawarte w programie Statistica 12.0.

Do analizy wpływu zapory we Włocławku na transformację reżimu hydrologicznego Wisły wykorzystano aplikację IHA version 7.1., a do symulacji prędkości prądu przepływowego Wisły system obliczeniowy Aquadyn 3.1 firmy „HydroSoft Energie Inc.”

Omówienie najważniejszych wyników badań.

Reżim hydrologiczny dolnej Wisły w okresie funkcjonowania Zbiornika Włocławskiego.

Przebieg procesów hydrochemicznych, biologicznych i sedymentacyjnych w zbiornikach zaporowych w mniejszym lub większym stopniu jest powiązany z reżimem hydrologicznym rzeki. Korytowo-dolinny typ Zbiornika Włocławskiego, jego silnie przepływowy charakter oraz ograniczone możliwości retencji wody powodują, że hydrologiczne uwarunkowania funkcjonowania ekosystemu zbiornika determinowane są przede wszystkim wielkością i zmiennością przepływów Wisły. Do ich scharakteryzowania wykorzystano średnie dobowe wartości natężenia przepływu w przekrojach wodowskazowych IMGW w Kępie Polskiej i Włocławku.

Średnia wielkość dopływu wody do zbiornika w wieloleciu 1971-2015 wynosiła $931,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i była nieznacznie większa od odpływu, który osiągał $905,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W analizowanym wieloleciu było jednak aż 39,2% dni kiedy odpływ ze zbiornika był wyższy od dopływu. Przeważały dni (41,5%) kiedy różnica między przepływami powyżej zbiornika i poniżej zapory mieściła się w zakresie $\pm 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Stosunkowo często, bo przez 9,7% dni wielolecia różnica ta była większa od $\pm 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a w ponad 20 dniach przekraczała $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Duże różnice przepływów między dopływem a odpływem ze zbiornika są związane z

funkcjonowaniem zbiornika w okresach wezbrań lub większymi zrzutami wody przez zaporę w celu usprawnienia żeglugi. Przyczyną mniejszych różnic między dopływem a odpływem wody ze zbiornika był szczytowo-interwencyjny reżim eksploatacji stopnia wodnego.

Zmienność uśrednionych, za lata 1971-2015, dobowych wartości przepływów Wisły w Kępie Polskiej, reprezentujących dopływ wody do zbiornika, wykazuje na względnie stałą tendencję do formowania się przepływów wezbraniowych na przełomie marca i kwietnia. Incydentalnie wezbrania powyżej $3000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pojawiają się jednak w całym roku hydrologicznym, z wyjątkiem grudnia. Po okresie podwyższonych przepływów wiosennych trwających do połowy maja, dopływ wody do zbiornika zmniejsza się. Od końca sierpnia do początku października ma miejsce faza trwale pogłębiającej się niżówki. Po tym okresie, aż do wczesnej wiosny dopływy do zbiornika sukcesywnie wzrastają.

Z punktu widzenia wpływu warunków hydrologicznych na przebieg procesów fizyczno-chemicznych i biologicznych zachodzących w zbiornikach zaporowych szczególnie ważne są okresy, kiedy wartości natężenia przepływu wody różnią się znacząco od przepływu średniego. Do wyznaczenia takich okresów wykorzystano metodę odchyłeń standaryzowanych (Jokiel i Bartnik 2005). Wykazano, że w okresie od 28 stycznia do 2 czerwca średnie przepływy dobowe były większe od średniego przepływu z wielolecia (SSQ). Szczególnie wysokimi wartościami odchyłeń charakteryzował się okres od połowy marca do połowy kwietnia. W pozostałej części roku średnie dobowe dopływy były niższe od SSQ, zwłaszcza w okresie od końca sierpnia do połowy października. Przebieg standaryzowanych odchyłeń dobowych dopływów do zbiornika wskazuje, że maj i czerwiec charakteryzują się zazwyczaj najbardziej stabilnymi dopływami wody do zbiornika, z zaznaczającą się jednak dość wyraźnie tendencją polegającą na stopniowym zmniejszaniu się wielkości dopływów. Spadek ten należy wiązać z sukcesywnym zmniejszaniem się zasobów płytkich wód podziemnych oraz zwiększającą się stopniowo ewapotranspiracją w dorzeczu i parowaniem z powierzchni zwierciadła wody. Przebieg wartości współczynników regresji równania liniowego dla jednoimiennych dni wielolecia wskazuje na słabą tendencję polegającą na pogłębianiu i wydłużaniu się okresu jesiennych niżówek oraz na niewielkim wzroście wielkości wezbrań wiosennych.

Jedną z najważniejszych cech ustroju hydrologicznego jest sezonowa zmienność przepływu rzecznoego. W przypadku dużych i zróżnicowanych pod względem fizjograficznym zlewni jak zlewnia Wisły, obecność wielu różnych form retencji wpływa na zwiększenie bezwładności systemu. Zaznacza się to słabiej wyrażoną sezonowością przepływu rzecznoego, co potwierdzają również wartości wskaźników sezonowych Markhama (Jokiel i Tomalski

2017). Przejawem sezonowości przepływu jest występowanie wezbrań i niżówek. Określony na podstawie wielkości przepływów granicznych (NWQ i WNQ) średni czas trwania przepływów niżówkowych Wisły powyżej zbiornika wynosił 94 dni, a poniżej zapory 80 dni. Średni czas trwania wezbrań był dużo krótszy i trwał 37 dni w Kępie Polskiej i 46 dni poniżej zapory we Włocławku. Mimo dużego zróżnicowania czasów trwania wezbrań i niżówek w kolejnych latach, dość wyraźnie zaznaczył się okres charakteryzujący się długotrwałymi niżówkami. Trwał on, z krótkimi przerwami, od 1983 do 1996 roku oraz od roku 2003 do 2007. Na tle ogólnie maleją, w kolejnych latach, stabilności dobowych przepływów Wisły, którą określono za pomocą współczynnika zaproponowanego przez Corbus i Stanescu (2004), zaznaczyły się dwa okresy o większej ich stabilności. Pierwszy trwał od drugiej dekady marca do drugiej dekady maja, drugi od połowy sierpnia do trzeciej dekady października. Świadczy to o względnie dużej stabilności okresu występowania wezbrań wiosennych oraz niżówek letnio-jesiennych.

Funkcjonowanie zbiorników zaporowych powoduje duże zmiany w przebiegu stanów wody, zarówno powyżej, jak i poniżej zapory. Ich wielkość zależy przede wszystkim od wielkości dopływu wód rzecznych oraz funkcji i sposobu eksploatacji zbiornika (Èdel'stejn 1998, Więjaczka i Wesół 2012). W przypadku zbiorników korytowo-dolnych o funkcji hydroenergetycznej stany wody są zazwyczaj wyrównane. Tak jest też w przypadku Zbiornika Włocławskiego. Roczna amplituda stanów wody w jego dolnej części wynosiła w latach 1971-2011 od 52 cm do 187 cm, średnio 101 cm. O dużej stabilności stanów wody w zbiorniku świadczy również to, że przez ponad 203 dni w roku były one mniejsze od 5 cm.

Należy założyć, że w związku z małą zmiennością stanów wody w zbiorniku wpływ tego czynnika zarówno na parametry jakości wody, jak i przebieg procesów hydrodynamicznych jest niewielki. Okresowy wzrost stanów wody w połączeniu z intensywnym falowaniem może jednak wpływać na zwiększoną dostawę materiału ze strefy brzegowej do zbiornika (Kennedy i Walker 1990). Mała dynamika zmian poziomu wody w Zbiorniku Włocławskim sprzyja szybszemu wykształceniu się strefy litoralnej typu jeziornego.

Reżim wymiany wody

Szybkość wymiany wody jest ważnym czynnikiem oddziałującym na przebieg procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych w zbiornikach zaporowych (Straškraba 1999, Błędzki i Ellison 2000, Grabowska 2005, Cunha-Santino i in. 2016). Krótki czas retencji powoduje, że na prawie całej długości zbiornika panują warunki charakterystyczne

dla strefy rzecznej. Wraz z jego wydłużaniem zwiększają się możliwości przekształcania właściwości fizyczno-chemicznych rumowiska rzecznego (Straskraba 1999, Soares i in. 2008).

W zbiornikach przepływowych na proces wymiany wody składa się wymiana zewnętrzna i wewnętrzna (Znamenskij 1981). Tempo zewnętrznej wymiany wody określają składowe bilansu wodnego zbiornika (Bajkiewicz-Grabowska 2002). Wewnętrzną wymianę wody kształtują procesy hydrodynamiczne w zbiorniku. Wpływ prądu przepływowego na tempo wymiany wody jest szczególnie duży w zbiornikach zaporowych typu dolinnego i korytowego. W związku z najczęściej słabym rozpoznaniem intensywności przebiegu procesów hydrodynamicznych odpowiedzialnych za wewnętrzną wymianę wody ocena tempa wymiany wody w zbiornikach zaporowych określana jest w praktyce, jako zewnętrzna wymiana za pomocą teoretycznego współczynnika poziomej wymiany wody (Štefan 1975, Edelštein 1991). Średnie tempo zewnętrznej wymiany wody w Zbiorniku Włocławskim w latach 1971-2015 według współczynnika poziomej wymiany wody wynosiło 5 dób, zmieniając się w poszczególnych latach od 2,8 do 7,6 doby. W rzeczywistości jednak między teoretycznym, a rzeczywistym czasem retencji wody pojawiają się istotne różnice. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest pominięcie wpływu procesów mieszania wody na szybkość jej wymiany w zbiorniku. Współczynnikiem, który uwzględnia fakt, że dopływająca do zbiornika i przemieszczająca się w kierunku zapory masa wodna miesza się z wodą wypełniającą zbiornik jest tzw. współczynnik odnowienia wody (W_o) (Timčenko 1989). Współczynnik ten nie był do tej pory stosowany do określenia tempa wymiany wody w żadnym z polskich zbiorników zaporowych. Wartości tempa wymiany wody określone za pomocą tego wskaźnika były tylko nieznacznie większe. W zależności od wielkości dopływu wody do zbiornika różnice między wartościami obu współczynników wynosiły od 6 do 27%, średnio 15%.

Znaczący wpływ na średnią długość czasu retencji wody w Zbiorniku Włocławskim mają przepływy maksymalne. W miesiącach wezbrań wiosennych (marzec-kwiecień) średnie tempo wymiany wody wzrasta nawet do 1,3 doby. Od lipca do listopada, czyli w okresie trwania niżówki letnio-jesiennej wymiana wody w zbiorniku jest wolniejsza i wynosi średnio od 6,7 do 8,4 doby. Dłuższa retencja wody w półroczu letnim wpływa na korzystniejsze warunki dla rozwoju fitoplanktonu. Przyjmuje się, że do znaczącego wzrostu koncentracji fitoplanktonu w zbiornikach zaporowych dochodzi w przypadku, gdy długość czasu retencji wody jest większa niż 10-14 dni (Puchalski 1994, Kawara i in. 1998, U.S. EPA 2000). W analizowanym wieloleciu wystąpiło 41 miesięcy (7,6%) charakteryzujących się czasem

wymiany dłuższym od 10 dni. W półroczach letnich było ich aż 37, czyli 13,7% wszystkich miesięcy w tym okresie. W przypadku czasu wymiany wody określonego za pomocą współczynnika odnowienia wody miesięcy takich było odpowiednio 20,9% i 28,9%.

Wyniki przeprowadzonej analizy wykazały dużą zmienność tempa wymiany wody, tak w analizowanym wieloleciu, jak i w poszczególnych miesiącach. Krótki czas retencji wody w Zbiorniku Włocławskim uznać należy niewątpliwie za istotny czynnik ograniczający niekorzystne zmiany związane z pogarszaniem się jakości wody i nadmiernym rozwojem fitoplanktonu. Pojawiające się, głównie w półroczu letnim, okresy o mniejszej intensywności wymiany wody mogą jednak wpływać na okresowe pogorszenie jakości wody i większą produktywność biologiczną zbiornika.

Ocena wpływ stopnia wodnego na transformację reżimu hydrologicznego Wisły

Charakter przekształceń przepływu rzecznego spowodowany funkcjonowaniem zapór zależy od ich wielkości i pełnionej funkcji (Rosenberg i in. 2000, Magilligan i Nislow 2005). W większości przypadków wpływają one na wielkość, częstotliwość i czas trwania przepływów minimalnych oraz maksymalnych a także dynamikę przepływu wody (Magilligan i Nislow, 2001, Batalla i in., 2004, Graf 2006). Przyjmuje się, że zapory o funkcji hydroenergetycznej, tworzące małe, silnie przepływowe zbiorniki, czyli takie jak zaporę we Włocławku, mają najczęściej relatywnie mały wpływ na reżim hydrologiczny rzeki (Richter i Thomas 2007).

Wielkość i charakter transformacji przepływu Wisły przez zaporę we Włocławku został zbadany za pomocą wskaźników IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) (Richter i in. 1996), a stopień zniekształcenia reżimu hydrologicznego metodą Range of Variability Approach (RVA) (Richter i in. 1997). Wskaźniki IHA były w kilku przypadkach stosowane również w Polsce do oceny wpływu zapór, w tym również zapory we Włocławku, na przepływ rzeczny (Piniewski 2016, Sojka i in. 2016). Przedstawione w monografii wyniki oceny są efektem nieco innego podejścia metodycznego. W analizach wykorzystano nie tylko dłuższą serię danych, ale zastosowano również inny sposób oceny zmian reżimu przepływu. Polegał on na porównaniu wartości parametrów IHA z tego samego okresu w profilu hydrometrycznym zlokalizowanym powyżej zbiornika z wartościami parametrów IHA w profilu hydrometrycznym położonym bezpośrednio poniżej zapory. Takie podejście uwzględnia wpływ zmienności klimatycznej na reżim przepływu. Jako dane wejściowe do analiz wykorzystano średnie dobowe wartości przepływów Wisły z wodowskazów we Włocławku i Kępie Polskiej z lat hydrologicznych 1971-2015. W związku z brakiem

znaczących dopływów Wisły między tymi dwoma wodowskazami charakter transformacji przepływów na tym odcinku jest skutkiem oddziaływania stopnia wodnego „Włocławek”.

Analiza przekształcenia reżimu hydrologicznego przeprowadzona metodą IHA wykazała, że zaporą we Włocławku wpływała na pogłębienie się niżówek, co jest widoczne w przebiegu uśrednionych wartości przepływów minimalnych, szczególnie 1; 3 i 7-dniowych. W związku z ograniczonymi możliwościami retencyjnymi Zbiornika Włocławskiego kulminacje największych wezbrań zmniejszały się w niewielkim stopniu. Najbardziej widoczne transformacje reżimu hydrologicznego polegają jednak na zwiększeniu dynamiki i zmienności przepływów Wisły poniżej zapory. Wyrażają się one wzrostem liczby i skróceniem czasu trwania faz przepływów wezbraniowych i niżówkowych oraz zwiększeniem liczby inwersji tendencji przepływu. Większość zaobserwowanych zmian reżimu hydrologicznego Wisły poniżej zapory to efekt sposobu eksploatacji elektrowni wodnej. Jego zmiana w 2002 roku z systemu szczytowo-interwencyjnego na przepływowo-interwencyjny wpłynęła przede wszystkim na zmniejszenie zakresu, częstości i szybkości zmian przepływu. Z tego punktu widzenia reżim przepływów Wisły poniżej zapory stał się bardziej podobny do jej reżimu powyżej Zbiornika Włocławskiego.

Cechy cyrkulacji wody w zbiorniku.

Przemieszczające się w kierunku zapory wody rzeczne podlegają coraz większej transformacji. Dominujący jeszcze w górnej części zbiornika przepływ rzeczny traci stopniowo na znaczeniu ustępując miejsca falowaniu, prądom wiatrowym i gęstościowym. W efekcie tworzy się, niezależny od przepływu rzeczego, układ cyrkulacji wody (m.in. Timčenko 1989, Araujo i in. 2008, Matta i in. 2017).

Wyniki pomiarów terenowych oraz symulacji komputerowych wykazały, że również w dolnej części Zbiornika Włocławskiego formuje się niezależna od przepływu rzeczego cyrkulacja wody.

Prędkość przepływu przez Zbiornik Włocławski jest uwarunkowana wielkością spadku zwierciadła wody. Dla średniego ($930 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) dopływu Wisły do zbiornika przy zachowaniu normalnego poziomu piętrzenia wody na zaporze (57,3 m n.p.m.) nachylenie zwierciadła wody między Płockiem a zaporą we Włocławku wynosi 25 cm (0,006%). Obliczono, że w takich warunkach maksymalne prędkości płynięcia wody w dolnej części zbiornika nie przekraczają $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, a w czasie przepływów niżówkowych ($330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) $6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. W górnej części zbiornika (profil Płock) osiągają one odpowiednio 95 i $26 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. W monografii wykazano również, że prąd przepływowy Wisły zanika w odległości około 21-22

km od zapory. Jego przebieg nawiązuje do układu dawnego nurtu Wisły, który w górnym i przejściowym odcinku zbiornika, a w czasie przepływów niżówkowych także w dolnym, stanowi drogę uprzywilejowanego przepływu wody.

Spadek prędkości przepływu rzecznoego w kierunku zapory powoduje, że w limnicznej części zbiornika dynamika wody zależy od wielkości falowania oraz prądów tworzących się pod wpływem siły wiatru. Oprócz prędkości wiatru istotny wpływ na wielkość falowania ma długość zbiornika, orientacja jego osi względem przeważających kierunków wiatru oraz charakter osłonięcia. Z tego punktu widzenia Zbiornik Włocławski należy zaliczyć do akwenów bardzo podatnych na oddziaływanie wiatru. Parametry falowania zostały obliczone dla limnicznego odcinka zbiornika, gdzie fale osiągają większe rozmiary, a falowanie ma większy wpływ na funkcjonowanie zbiornika. Na odcinku o powierzchni około 45 km² rozciągającym się między zaporą a miejscowością Karolewo (651 km) wyznaczono 426 punktów w węzłach siatki o długości boku 250 metrów. Dla każdego punktu obliczono według wzorów Labzovskiego (1976) wysokość, długość oraz okres fal wiatrowych, a także prędkość przemieszczania się fali płytkowodnej. Fale tworzące się pod wpływem wiatru o prędkości 8 m·s⁻¹ i 15 m·s⁻¹ osiągają maksymalne parametry przy wietrze wiejącym wzdłuż osi zbiornika. Przy prędkości wiatru 8 i 15 m·s⁻¹ maksymalne wysokości fal dochodzą odpowiednio do 0,7 i 1,2 m. Długości fal o największych wysokościach wynoszą 8-9 m przy słabszym wietrze i ponad 13 m przy silniejszym. Średnia długość fal formujących się w takich warunkach wynosi odpowiednio 4 i 6,7 m. Maksymalne prędkości przemieszczenia się fal w płytkowodnych fragmentach zbiornika wynoszą 20-40 cm·s⁻¹ w warunkach wiatru o mniejszej sile i 50-90 cm·s⁻¹ w przypadku wiatru silniejszego.

Bezpośrednie pomiary prędkości przepływu wody wykazały, że w warunkach przepływów niższych od średnich, od kilometra 654-656 do zapory, w pozanurtowych obszarach zbiornika, formuje się niezależna od przepływu Wisły cyrkulacja prądowa. W górnej części zbiornika, niezależnie od kierunku i siły wiatru, kierunek przepływu wody był najczęściej zgodny z przepływem Wisły. Przy wietrze z kierunków zachodnich, w dolnej części zbiornika, wzdłuż jego lewego brzegu, tworzy się prąd dryfowy przeciwny do kierunku przepływu rzeki, a zgodny z kierunkiem wiatru. W płytszych miejscach obejmuje on całą warstwę wody, zaś w głębszych towarzyszy mu przydeny prąd kompensacyjny. W miejscu, w którym zbiornik zmienia przebieg z W-E na NW-SE, (655 km) cyrkulacja wzbudzana przez wiatr zanika po stronie lewego brzegu, a prąd dryfowy przemieszcza się w kierunku brzegu prawego. Dalej już, jako prąd kompensacyjny, łączy się z prądem przepływowym Wisły i kieruje się ku zaporze. W wielu miejscach prędkości prądów generowanych przez wiatr są

porównywalne, a nawet większe od prędkości prądu przepływowego. W sytuacji wiatru wiejącego z sektora wschodniego, czyli zgodnie z kierunkiem przepływu Wisły, w powierzchniowej warstwie wody formuje się prąd dryfowy skierowany ku zaporze. W lewostronnej - limnicznej części zbiornika osiągał on zazwyczaj większe prędkości od prądu przepływowego w nurcie. W czasie wezbrań zmierzone prędkości i kierunki przepływu wody były typowe dla zbiorników o dużej przepływowości. Na całej długości i szerokości zbiornika przepływ odbywał się w kierunku zapory.

Wpływ spiętrzenia na właściwości fizykochemiczne wody

Chociaż główne cechy hydrochemiczne dolnej Wisły wynikają z jakości wody w jej górnym i środkowym biegu, to również w dolnym odcinku rzeki dokonują się istotne przekształcenia składu chemicznego. Są one widoczne przede wszystkim na spiętrzonej odcinku rzeki i poniżej zapory. Transformacji właściwości fizykochemicznych wody sprzyja wydłużenie czasu retencji wody oraz zmniejszenie prędkości jej przepływu (Petts 1986). Na zmianę wielkości koncentracji wpływają również zachodzące w zbiornikach procesy biogeochemiczne (Èdel'stejn 1998). Wyniki analiz składu jonowego wody wskazują na wzrost stężeń większości jonów głównych w dolnej części zbiornika i rzece poniżej zapory. W przypadku niektórych jonów (Cl^- , Na^+ , K^+) jest to wzrost wynoszący kilkadziesiąt procent, a w przypadku innych kilkuprocentowy (Mg^{2+} , SO_4^{2-}). Stężenia jonów chlorkowych, sodowych i ogólna mineralizacja wody wykazują inwersyjny związek z natężeniem przepływu. Duże koncentracje tych substancji w okresie niskich przepływów są związane z większym udziałem w odpływie zasolonych wód ściekowych pochodzących z różnych źródeł. Słaba, w przypadku pozostałych jonów, siła relacji z natężeniem przepływu to najprawdopodobniej efekt dużej retencyjności zlewni nizinnej, co przekłada się na mniejszą zmienność i zróżnicowanie dostawy części substancji jonowych do koryta Wisły.

Szybka wymiana oraz silne mieszanie wód Zbiornika Włocławskiego ogranicza jego niekorzystny wpływ na natlenienie wody. Przeprowadzone badania wykazały iż, średnia koncentracja tlenu poniżej zapory była tylko o 14,7% mniejsza niż w Wiśle powyżej zbiornika. W półroczu letnim ta różnica była jednak większa i wynosiła 29%. W dolnej części zbiornika zdecydowanie częściej występują okresy charakteryzujące się deficytem tlenu w porównaniu z rzeką powyżej zbiornika. W Wyszogrodzie i Płocku, w latach 1990-2009, stwierdzono odpowiednio 2,4% i 0,3% wyników, kiedy koncentracja tlenu była mniejsza od $5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. W punkcie pomiarowym Brwilno reprezentującym przejściową strefę zbiornika wyniki takie stanowiły już 6,4%, a we Włocławku i Nieszawie poniżej zapory odpowiednio

16,2% i 11,6%. Okresowo słabsze natlenienie wody w zbiorniku wynika z przebiegających w nim procesów biodegradacyjnych, szczególnie podczas resuspensji osadów dennych. Skalę wpływu tych procesów wyraża w pośredni sposób spadek wartości wskaźnika BZT₅, który między Wyszogrodem a Włocławkiem, wynosił średnio aż 63%.

Zawarte w wodzie substancje biogeniczne podlegają podczas transportu fluwialnego różnego typu przemianom. Azot uczestniczy m.in. w procesach nityfikacji-denityfikacji, a fosfor sedymentacji. Aktywność tych procesów wzrasta w zbiornikach zaporowych, czemu sprzyjają mniejsza prędkość przepływu wody i gorsze warunki tlenowe (Seitzinger 1988, Jossette i in. 1999, Teodoru i Wehrli 2005, Bartoszek i Koszelnik 2016). Średnia zawartość związków azotu i fosforu w wodzie Wisły między Wyszogrodem a Nieszawą mieściła się w zakresie stężeń dopuszczalnych dla wód o dobrym stanie chemicznym. Z wyjątkiem azotu Kjeldahla pozostałe formy azotu osiągały większe koncentracje w półroczu zimowym. Związane jest to z faktem, że wielkość i zmienność stężeń biogenów uwarunkowana jest przede wszystkim intensywnością przebiegu procesów biogeochemicznych i biologicznych w sezonie wegetacyjnym oraz w mniejszym zakresie zmiennością przepływu Wisły. Wielkość stężeń substancji biogenicznych w wodzie zbiornika nawiązują zasadniczo do ich wielkości w zasilającej zbiornik wodzie Wisły. Na tle słabego ogólnie powiązania stężeń substancji biogenicznych z przepływem wody, nieco silniejszy związek z natężeniem przepływu wykazywały stężenia azotu azotanowego i ogólnego. Jest to związane ze zwiększonym dopływem azotanów ze zlewni w czasie wezbrań wiosennych z jednej strony oraz ich asymilacją w czasie letnio-jesiennych niżówek z drugiej strony. Na ujemny charakter zależności między koncentracją fosforu fosforanowego, a przepływem wody w dolnej części zbiornika wpływa najprawdopodobniej bardziej intensywna migracja fosforanów z osadów dennych do wody oraz większa jego dostawa z rozkładającej się materii organicznej w czasie letnich przepływów niżówkowych (Wiśniewski 1995, Søndergaard i in. 2003).

Zbiorniki zaporowe są miejscem retencji substancji biogenicznych, która prowadzi do akumulacji związków azotu i fosforu w osadach dennych. W efekcie, wody wypływające ze zbiorników zaporowych charakteryzują się często niższymi stężeniami biogenów niż wody zasilające zbiorniki (m.in. Galicka i in. 2007, Cunha i in. 2014, Van Cappellen i Maavara 2016). Rola Zbiornika Włocławskiego jest w tym względzie niejednoznaczna. Różnica wielkości stężeń fosforu i azotu ogólnego w Wyszogrodzie i Włocławku wskazuje, że w przypadku 57% wyników analiz wyższe stężenia fosforu ogólnego występowały w wodzie wypływającej ze zbiornika. W przypadku azotu ogólnego ich liczba wynosiła aż 71%.

Retencja substancji biogenicznych w zbiornikach zaporowych może się jednak zmieniać z roku na rok w zależności od warunków hydrologicznych i wielkości ich dostawy ze źródeł zewnętrznych i wewnętrznych (Friedl i Wüest 2002). Osady denne po latach funkcjonowania zbiorników stają się źródłem wtórnego zanieczyszczenia wody substancjami biogenicznymi (Avakân i in. 1987, Teodoru i Wehrli 2005, Koszelnik i Bartoszek 2010, Lu i in 2016). W pracach tych wskazuje się przy tym na znaczenie czynnika hydrologicznego, który wpływa na remobilizację azotu i fosforu z osadów dennych zbiornika. Z taką sytuacją mamy najprawdopodobniej również do czynienia w przypadku Zbiornika Włocławskiego.

Duża dynamika wody w Zbiorniku Włocławskim jest powodem braku warunków do tworzenia się trwałego uwarstwienia termicznego i chemicznego. Mimo polimiktycznego charakteru zbiornika w niektórych sytuacjach tworzą się charakterystyczne układy przestrzennego zróżnicowania właściwości fizykochemicznych wody, które zidentyfikowano na podstawie wyników kartowania hydrochemicznego. W przypadku zróżnicowania termiki wody przeważają sytuacje charakteryzujące się wyrównaną temperaturą wody w przekroju poprzecznym i stopniowym jej spadkiem, bądź wzrostem w kierunku zapory. Obecność chłodniejszych, bądź cieplejszych wód w dolnej, najgłębszej części zbiornika wynika z ich wolniejszego nagrzewania bądź ochładzania w porównaniu z odcinkiem górnym. Na termikę wody, w górnej i przejściowej części zbiornika wpływa również prąd przepływowy. W zależności od warunków termicznych powietrza wprowadza on w obszar zbiornika wodę o wyższej, bądź niższej temperaturze.

W okresach charakteryzujących się wolniejszą wymianą, słabym falowaniem i wysoką temperaturą wody obserwowano słabo wykształcone uwarstwienie tlenowe. Zmiany koncentracji tlenu w pionie nie przekraczały $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ i miały najczęściej charakter klinogradowy. Dominowały jednak warunki charakteryzujące się wyrównanym w pionie natlenieniem wody. Lepszym natlenieniem charakteryzowała się woda w górnej części zbiornika oraz w odcinku przejściowym w strefie oddziaływania prądu rzecznoego. Gorsze warunki tlenowe panowały w dolnym, limnicznym odcinku zbiornika, gdzie na wielkość koncentracji tlenu wpływała wydajność procesów biogeochemicznych (fotosynteza, tlenowy rozkład materii organicznej) oraz dynamika mas wodnych.

Pomiary przewodnictwa elektrolitycznego wody (SEC) w pionie wykazały, że w głębokowodnej części zbiornika jest ono mniejsze niż w płytkowodnej. Sytuacje o takim charakterze odnotowywano w różnych pod względem hydrodynamicznym warunkach. W większości przypadków zróżnicowanie SEC nie przekraczało $50 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Charakterystyczną cechą zmienności SEC była, pojawiająca się na różnych głębokościach, skokowa zmiana jego

wartości. Może to świadczyć o obecności dwóch różnych mas wody. Zakres zróżnicowania przestrzennego SEC wynosił od kilkudziesięciu do prawie 250 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Najczęściej występującym układem przestrzennym była sytuacja charakteryzująca się względnie dużym zróżnicowaniem SEC w limnicznej części zbiornika (zazwyczaj poniżej 655 km) i małym w górnej części zbiornika. Zróżnicowanie SEC w odcinku limnicznym świadczy o przynajmniej okresowej niezależności masy wodnej występującej w pozanurtowej części zbiornika od masy wodnej przemieszczającej się w dawnym korycie Wisły. Tego typu układ zanikał przy większych przepływach Wisły oraz w czasie intensywnej miksji. W okresach, kiedy przepływ Wisły są większe od średnich na obraz przestrzennego zróżnicowania SEC w zbiorniku wpływa przebieg prądu rzecznoego.

Oddziaływanie zbiornika zaporowego na transport zawiesiny

Zmiana warunków przepływu wody w zbiornikach zaporowych wpływa nie tylko na zmniejszenie ładunku i koncentracji zawiesiny, ale także na jej jakościową transformację. Ten ostatni problem jest jednak rzadko podejmowany w badaniach. Wyniki badań przeprowadzonych w tym zakresie przez autora dostarczyły więc nowych informacji na temat przemian jakościowych jakim podlega zawiesina rzeczna w zbiornikach zaporowych.

Głównym źródłem zawiesiny w Zbiorniku Włocławskim jest materiał tranzytowy dostarczany rzeką. Zawiesina przemieszczająca się w Zbiorniku Włocławskim składa się przede wszystkim z części mineralnych. W górnej części zbiornika jej udział wynosił średnio 79,3%, a w dolnej 71,6%. Są to wartości typowe dla większości zbiorników na świecie (Jones i Knowlton 2005). Wielkość koncentracji zawiesiny mineralnej w górnej części zbiornika była ponad trzykrotnie większa niż w dolnej, a zawiesiny organicznej dwukrotnie mniejsza. Większe zmaczenie występowało tam zazwyczaj na linii nurtu dawnego koryta rzeki. Koncentracja zawiesiny mineralnej w jeziornej części zbiornika była bardziej wyrównana. Większym zróżnicowaniem charakteryzowała się zawiesina organiczna, której koncentracja osiągała większe wartości w pozanurtowych obszarach zbiornika.

Skład mechaniczny zawiesiny wpływa na różne aspekty funkcjonowania zbiorników zaporowych. Od wielkości uziarnienia zależą między innymi zdolności sorpcyjne materiału transportowanego w suspensji. Ma to bezpośredni wpływ na właściwości geochemiczne osadów dennych i jakość wody (Foster i Charlesworth 1996, Walling i in. 2000, Walling i in 2001, Owens i Walling 2002).

Wykonane przez autora badania wykazały iż zawiesina mineralna składała się przede wszystkim z frakcji mułkowej, której średni udział wynosił 65,8%. Na pozostałe frakcje

główne tj. piaszczystą i ilastą przypadało odpowiednio 25,9% i 8,3%. Niewielkie zróżnicowanie uziarnienia materiału w poszczególnych częściach zbiornika spowodowane jest zmianą warunków przepływu wody. W górnym odcinku zbiornika średni udział frakcji mułkowej wynosił 60,3% a w dolnym 71,4 %. Bardziej gruboziarnisty charakter miała zawiesina w dolnej części zbiornika. W przypadku większości próbek stwierdzona została bardzo dodatnia i dodatnia symetria rozkładu uziarnienia zawiesiny. Wzbogacanie zawiesiny w ziarna drobniejsze od przeciętnych związane jest z selektywną depozycją grubszych frakcji w czasie transportu rzeczno-jeziernego. Większość próbek (około 68%), charakteryzowała się słabym wysortowaniem. Mniejsza zmienność wartości wskaźników uziarnienia w limnicznej części zbiornika świadczy o panujących tam bardziej stabilnych warunkach transportu zawiesiny.

W górnym odcinku zbiornika stwierdzono zależność polegającą na wzroście koncentracji zawiesiny mineralnej z natężeniem przepływu wody i jednoczesnym spadku koncentracji zawiesiny organicznej. Nie stwierdzono natomiast znaczącego wpływu zmienności przepływu wody na uziarnienie zawiesiny. Współczynniki korelacji na poziomie 0,48 w górnej części zbiornika i 0,41 w części dolnej świadczą o względnie dużej dostawie frakcji drobnoziarnistej w czasie przepływów wezbraniowych. Zmiana warunków hydrologicznych oraz pojawienie się nowych mechanizmów uruchamiania i przenoszenia materiału klastycznego (falowanie, cyrkulacja prądowa) w limnicznej części zbiornika osłabiły wpływ przepływu rzeczno-jeziernego na uziarnienie zawiesiny. Różnice uziarnienia zawiesiny, w rzecznej i jeziornej części zbiornika, widoczne w okresie przepływów niskich i średnich zanikają w czasie przepływów wezbraniowych.

Warunki transportu i sedymentacji zawiesiny w Zbiorniku Włocławskim opisuje zależność średniej średnicy ziarna i wysortowania oraz położenie próbek zawiesiny na diagramie zależności C/M. Wyniki analiz potwierdziły dużą dynamikę środowiska depozycyjnego w Zbiorniku Włocławskim. W części rzecznej zbiornika łączy się ona z oddziaływaniem prądu przepływowego Wisły, a w części jeziornej z falowaniem i prądami typu wiatrowego. Słabiej reprezentowane jest środowisko niskoenergetyczne, gdzie materiał przemieszcza się w formie zawiesiny, typu jednorodnego i pelagicznego.

Średnia wieloletnia (1990-2006) koncentracja zawiesiny ogólnej w Wiśle między Wyszogrodem a Nieszawą wynosiła od 30 do 15 mg·dm⁻³. W wyniku jej sedymentacji w zbiorniku została ona zredukowana o około 42%. W początkowym okresie funkcjonowania zbiornika spadek koncentracji zawiesiny był mniejszy, głównie za sprawą większej dostawy z brzegów. Zwiększona dostawa materiału z strefy brzegowej zbiornika oraz resuspensja osadów dennych jest przyczyną pojawiającego się w niektórych okresach ujemnego bilansu

koncentracji zawiesiny w Zbiorniku Włocławskim. Sytuacja taka wystąpiła w 24% serii pomiarowych. Ujemne bilanse koncentracji zawiesiny stwierdzano również w zbiornikach: Czchowskim, Goczałkowickim, Sulejowskim, Zegrzyńskim (Łajczak 1989, 1995, 2003).

Zmienność koncentracji i właściwości zawiesiny są odzwierciedleniem złożonego mechanizmu jej dostawy do koryta rzeczno powiązanego ze zmiennością przepływów. Problem relacji wielkości zmacenia i zmienności przepływu rzeczno jest jednym z ważniejszych zagadnień dyskutowanych w literaturze fluwialnej. Związek ten najlepiej opisuje funkcja potęgowa (Gregory i Walling 1973, Syvitski i in. 2000). Podkreśla się przy tym na występującą zazwyczaj asynchroniczność pojawiania się maksimów obu zmiennych w czasie wezbrań (Walling 1974, Froehlich 1982, Williams 1989, Asselman 1999). Podobnie jest w przypadku Zbiornika Włocławskiego gdzie złożona i w dużym stopniu niezależna od warunków hydrologicznych dostawa zawiesiny wpływa na bardzo słabą siłę zależności pomiędzy jej koncentracją a przepływem wody. Taki charakter relacji koncentracji zawiesiny i przepływu potwierdzają również badania Asselman (2000). Wykazały one, że w warunkach dużej dostępności podatnych na erozję aluwii w dolnych biegach rzek zmiany wielkości przepływu w mniejszym stopniu wpływają na wielkość koncentracji zawiesiny.

Na podstawie przeprowadzonych badań w Zbiorniku Włocławskim można wskazać iż przebieg średniorocznej koncentracji zawiesiny ogólnej na tle zmienności przepływu wody uwidacznia cztery charakterystyczne fazy zmacenia. Tak w górnej jak i w dolnej części zbiornika najniższe koncentracje zawiesiny występuje zimą. Jest to również okres, niskich zazwyczaj przepływów Wisły. Mniejsza dostawa zawiesiny w tym czasie jest uwarunkowana przebiegiem zjawisk lodowych. Faza wiosenna kształtowana jest przez wezbranie roztopowe. W tym czasie koncentracja zawiesiny szybko rośnie nie osiągając jednak wartości maksymalnych. Wiosna to również okres intensywnego rozwoju fitoplanktonu okrzemkowego, co dodatkowo wpływa na wzrost wielkości koncentracji zawiesiny ogólnej. W miesiącach letnich i jesiennych wielkość zmacenia nawiązuje przede wszystkim do sezonowej sukcesji fitoplanktonu. Maksima jego rozwoju, w maju i latem, dobrze korelują z wysokimi koncentracjami zawiesiny ogólnej. Ostatnia, jesienna faza, pojawiała się tylko w środkowej i dolnej części zbiornika na początku wielolecia. Wzrost zmacenia, przy mało zmiennym przepływie był wówczas efektem dostawy materiału z brzegów zbiornika podczas jesiennych sztormów.

Charakter przestrzennego zróżnicowania zmacenia w Zbiorniku Włocławskim odzwierciedlają w pośredni sposób pomiary widzialności krążka Secchiego. Wykazały one, że niezależnie od warunków hydrologicznych mała początkowo przeźroczystość wody (0,5 -

0,6 m) wzrasta do około 1 m na granicy przejściowego i limnicznego odcinka zbiornika (km 654). Częściej większą przezroczystość wody stwierdzano w zalewowej – lewostronnej części zbiornika. Przestrzenny obraz zróżnicowania przezroczystości wody odzwierciedla również wpływ zatopionego koryta Wisły na przepływ zawiesiny. Niezależnie od warunków hydrologicznych jest on zasadniczo widoczny do 655-660 km biegu Wisły.

Uwarunkowania sedymentacji i charakterystyka geochemiczna osadów dennych zbiornika.

Ilość wprowadzanej do zbiornika zawiesiny oraz jej właściwości fizykochemiczne mają decydujący wpływ na charakter i wielkość wypełnienia zbiornika osadami dennymi. Wyniki przeprowadzonych analiz sedymentologicznych wykazały, że w profundalu Zbiornika Włocławskiego zalegają osady mineralne zawierające średnio 7% materii organicznej i około 21% węglanów. Większa zawartość materii organicznej w osadach występuje w dolnej, limnicznej części zbiornika, a tam szczególnie w obszarach głębokowodnych. Znaczny udział węglanu wapnia wynika głównie z obecności muszelek mięczaków pogrążonych w półpłynnym mule sapropelowym, które nie są jednak pierwotnym składnikiem osadu. Zalegające na dnie głębokowodnej części Zbiornika Włocławskiego osady mają mułkowy charakter. Przeciętny udział tej frakcji wynosi aż 67%. Zawartość dwóch pozostałych frakcji: piaszczystej i ilastej wynosi odpowiednio 25,9% i 7,1%. Ze względu na cechy uziarnienia osady denne zaliczają się, wg klasyfikacji Udden-Wentwortha, do jednego z dziewięciu typów: mułki (49,4%), mułki piaszczyste (18,9%), piaski mułkowe (11,3%), piaski (11,1%), mułki ilaste (6,9%). Udział pozostałych typów osadów tj. diamikton piaszczysty, ił, mułek piaszczysto-ilasty i mułek ilasto-piaszczysty wynosi łącznie 2,3%.

Przeprowadzone badania składu mineralogicznego frakcji ilastej wykazały, że dominującym rodzajem minerałów ilastych są smektyty. Ich udział w badanych próbkach wynosił 50-60%. Około 20% stanowią minerały mieszano-pakietowe typu smektyt/chloryt i smektyt/wermikulit. Zdecydowanie mniejszy udział mają illit oraz kaolinit. Taki skład świadczy o dużych możliwościach wiązania kationów metali ciężkich przez minerały ilaste zawarte w osadach zbiornika (Helios-Rybicka 1986).

Rozmieszczenie poszczególnych rodzajów osadów odzwierciedla typowy dla zbiorników zaporowych podział na strefę akumulacji rzecznej i jeziornej. W górnej części zbiornika, obejmującej odcinek rzeczny i fragment odcinka przejściowego, dominują osady piaszczyste. W dolnej części widoczne jest zróżnicowanie na strefę akumulacji piaszczystej w litoralu i mułkowej w profundalu. Przestrzenne rozmieszczenie osadów piaszczystych w profundalu zbiornika pokrywa się z lokalnymi wypłyconiami ponad powierzchniami

zatonionych łąch i wysp wiślanych. Zalegające tam na głębokości 4-5 m utwory podlegają erozji i resuspensji wskutek oddziaływania na dno falowania i prądów wiatrowych. Obszary te położone są powyżej tzw. krytycznej głębokości potencjalnej, która określa warunki sprzyjające trwałej akumulacji. Przybliżona wartość tej głębokości obliczona i określona za pomocą diagramu ETA (Håkanson 1982) wynosi dla Zbiornika Włocławskiego 12,4 m, czyli jest zbliżona do maksymalnej głębokości zbiornika. Obliczona tą samą metodą potencjalna głębokość rozmywania (erozji) dna zbiornika wynosi 5,7 m. Również w górnej części zbiornika gdzie dominują piaszczyste osady rzeczne, w obszarach o mniejszej energii wody pojawiają się strefy akumulacji mułkowej. Występowanie osadów ilastych ogranicza się do limnicznego odcinka zbiornika, gdzie ma ono charakter „wyspowy”. Akumulacja osadów ilastych zachodzi tam w przegłębieniach związanych z dawnymi płosami głównego koryta Wisły i koryt bocznych. W przypadku Zbiornika Włocławskiego uziarnienie osadów zależy w większym stopniu od zmian głębokości i odległości od brzegu niż od spadku prędkości przepływu w kierunku zapory zbiornika. Wyniki przeprowadzonej analizy nie dały jednoznacznej odpowiedzi na to, który czynnik determinuje rozkład głównych typów osadów w czaszy zbiornika. Wykazały jednak, że depozycja osadów w większym stopniu zależy od zmian głębokości i odległości od brzegu, niż od spadku prędkości przepływu w kierunku zapory zbiornika.

Zróznicowany przestrzennie obraz rozmieszczenia poszczególnych typów osadów dennych w zbiorniku świadczy o złożonych warunkach ich akumulacji. Duża dynamika wody w zbiorniku uwarunkowana przepływem rzecznym i wiatrową cyrkulacją prądową wpływa na niestabilność warunków sedymentacji. Interpretacja diagramu C/M oraz krzywych kumulacyjnych rozkładu uziarnienia wskazuje, że w odcinku rzecznym zbiornika i górnej części strefy przejściowej przeważa transport trakcyjny i saltacyjny, co odpowiada warunkom środowiska rzeczno-jeziornego. W dolnej i środkowej części akwenu depozycja osadów zachodziła z zawiesiny jednorodnej, co jest charakterystyczne dla warunków środowiska jeziornego. W litoralu jeziornej części zbiornika oraz w płytszych partiach profundalu występują warunki charakterystyczne dla transportu saltacyjnego. Nie stwierdzono związku między rodzajem transportu ziaren a głębokością wody.

Położenie punktów reprezentujących próbki osadów na wykresie zależności między skośnością i kurtozą rozkładu uziarnienia jest pośrednim wskaźnikiem energii środowiska depozycyjnego (Thomas i in. 1972). Na tej podstawie określono, że strefę przejściową (transportu), gdzie w warunkach zmiennej dynamiki środowiska prądowego osad jest okresowo przemieszczany, reprezentuje aż 69% próbek osadów, strefę erozyjną 25%, a

akumulacyjną 6%. Podobne wyniki uzyskano stosując kompleksową ocenę wskaźników uziarnienia opartą na analizie ich anomalii (Racinowski, Baraniecki 1990). Udział wydzielonych w ten sposób stref litodynamicznych oraz ich rozmieszczenie wskazuje na brak warunków do trwałej akumulacji osadów w zbiorniku. Niewielkie powierzchnie, gdzie jest ona możliwa, ograniczone są do izolowanych przegłębień w jeziornej części zbiornika. Poza tym zdecydowanie dominują warunki charakterystyczne dla środowiska transportu – tranzytu osadów. Akumulowane w okresach względnego spokoju hydrodynamicznego, frakcje transportowane w zawieszynie, podlegają częstej resuspensji oraz przemieszczaniu na różne odległości zarówno w zawieszynie, jak i w saltacji. Położenie większych stref erozyjnych ogranicza się do rozległych płycizn przybrzeżnych oraz powierzchni zatopionych łąk i kęp wiślanych zlokalizowanych w centralnej części zbiornika.

Uruchomienie zakumulowanego wcześniej osadu zachodzi, gdy fala głębokowodna przemieści się na obszar o głębokości mniejszej od połowy jej długości, a naprężenie ścinające wywołane ruchem wody przekroczy wartość krytyczną dla danego typu osadu.

Wyniki obliczeń modelowych przeprowadzonych według zmodyfikowanej metody Shenga i Licka (1979) wykazały, że warunkach charakteryzujących się wiatrem wiejącym przez jedną godzinę ze stałą prędkością $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ średnie wartości naprężeń ścinających w jeziornej części Zbiornika Włocławskiego wynoszą, w zależności od kierunku wiatru, od 0,3 do $1,9 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$. Oddziałując na powierzchnię dna takie siły mogą wprowadzić słabo skonsolidowane osady w stan zawieszenia. W symulowanych warunkach redepozycja osadów dennych zachodziłaby na powierzchni 2-5 km^2 . Średnia wielkość powstałego w taki sposób zmacenia wynosiłaby około $4\text{-}9 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w przypadku wiatru wiejącego z kierunków SW i NE oraz $20\text{-}44 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w sytuacji wiatru wiejącego wzdłuż osi zbiornika (E i W). W przypadku wiatru o prędkości $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wielkość zmacenia byłaby większa od $300 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a obszar dna zbiornika podlegający oddziaływaniu sił ścinających wynosił 18 km^2 .

Określenie wielkości wypełnienia zbiornika osadami oraz tempa sedymentacji jest utrudnione ze względu na prowadzone w okresie jego funkcjonowania prace bagrownicze. Obszarem zbiornika gdzie tego typu prac nie wykonywano aż do roku 2006 był odcinek rozciągający się na granicy stref przejściowej i limnicznej. Przeprowadzone przez autora badania wykazały, że maksymalna wielkość wypełnienia zbiornika osadami między 655 a 662 km biegu Wisły wynosi 4,3 m, średnio 1,45 m. Odpowiada to tempu akumulacji ok. 4 cm/rok. Największa akumulacja osadów zachodzi w dawnych, bocznych korytach Wisły oraz w innych zagłębieniach na powierzchni zalewowej części zbiornika. Mniej korzystne warunki do akumulacji panują w strefie nurtowej dawnego koryta Wisły oraz nad powierzchniami

dawnych kęp i łąk wiślanych. Prawidłowości te świadczą o dużym znaczeniu tranzytowego transportu zawiesiny w strefie dawnego koryta Wisły oraz korzystniejszych warunkach do sedymentacji w rozlewiskowej części limnicznego odcinka zbiornika.

Migracja metali śladowych w środowisku rzecznym, jest silnie powiązana z przemieszczaniem się zawiesiny rzecznej (Nocoń i in. 2013). Na wielkość kumulacji metali w osadach dennych zbiorników wodnych wpływają te ich cechy, które decydują o wydajności procesów sorpcyjnych tj. wielkość uziarnienia, skład mineralny, zawartość materii organicznej i węglanów oraz koncentracja związków Al, Fe, Mn, P w osadach (Helios-Rybicka 1986, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Brekhovskikh i in. 2001, Canavan i in. 2007). Stwierdzona w Zbiorniku Włocławskim duża dynamika wody oraz resuspensja osadów dennych powoduje, że na granic faz osad-woda zachodzą zmiany fizyczno-chemiczne umożliwiające przechodzenie metali z osadu do wody i odwrotnie.

Wyniki wykonanych analiz wykazały, że średnia zawartość metali śladowych w osadach dennych Zbiornika Włocławskiego była wyraźnie wyższa od regionalnego tła geochemicznego. Analiza współzależności między metalami wykazała, że układają się one w co najmniej trzy zgrupowania. Pierwsze o najsilniejszych powiązaniach tworzą Pb, Ni i Cr. Silne relacje między tymi metalami uwarunkowane są podobnymi źródłami dostawy, a duża siła powiązań świadczy o względnej bliskości tych źródeł. Są nimi najprawdopodobniej zanieczyszczenia komunikacyjne przedostające się do wód Wisły z sieci drogowej dużych aglomeracji oraz odcieki ze składowisk odpadów przemysłowych. Drugą grupę metali, o wyraźnie już słabszych powiązaniach, tworzą Ba i As oraz skorelowane z nimi Co, V i Cr, a także związki Zn z Pb, Cr, Cu i Ni. Charakter współzależności między tymi metalami wynika ze specyfiki budowy geologicznej śląsko-krakowskiej części zlewni Wisły, gdzie występującym złożom węgla kamiennego i rud cynkowo-ołowiowych towarzyszy anomalia geochemiczna Zn, Pb i Cd. Duża odległość źródła dostawy od miejsca poboru próbek powoduje, że opisywane zależności charakteryzują się mniejszą siłą. Istotnych statystycznie powiązań z żadnym z pozostałych metali nie wykazują Cd i Sr.

W Zbiorniku Włocławskim nie stwierdzono charakterystycznej dla wielu innych akwenów silnej zależności między zawartością frakcji ilastej w osadzie a wielkością koncentracji metalu ciężkiego. Zdecydowanie silniejsze jest powiązanie zawartości metali, a szczególnie Zn, Ni, Pb, Cr, Cu i Sr, w osadach z występującą w nich materią organiczną. Substancjami wiążącymi rozpuszczalne formy Pb, Ni, Zn są także hydroksytenki manganu. Analiza zależności korelacyjnych między sorbentami a metalami śladowymi wykazała, że w ich immobilizacji uczestniczą również związki fosforu. Istotne statystycznie zależności

korelacyjne koncentracji metali od zawartości tlenków fosforu stwierdzone zostały w odniesieniu do Pb, Ni, Cr i Zn. W warunkach dominacji dostawy jednorodnej, pod względem uziarnienia, zawiesiny oraz małej zasadniczo kontrastowości osadów dennych, najważniejszym czynnikiem wpływającym na przestrzenne zróżnicowanie koncentracji metali ciężkich w osadach jest zawarta w nich materia organiczna.

Wyniki analizy specjacyjnej wykazały, że najbardziej mobilne formy jonowymienne metali stanowią niewielki odsetek ich ogólnej zawartości w osadach. Udział jonowymiennych form Zn, Cu, Pb, Cd i Ni nie przekraczał 5%. Do mobilnych, zliczana jest również frakcja metali związanych z węglanami. Jej udział, z wyjątkiem miedzi i niklu, był większy niż frakcji wymiennej i wynosił 17-28%. Duży, z wyjątkiem miedzi, jest udział metali związanych z tlenkami i wodorotlenkami manganu i żelaza. Frakcja czwarta, siarczkowa oraz metali związanych z materią organiczną ma kluczowe znaczenie w wiązaniu miedzi. Metale związane z uwodnionymi tlenkami żelaza i manganu oraz z materią organiczną przechodzą do roztworu trudniej niż metale obecne we frakcjach jonowymiennej i węglanowej, dlatego mogą być one uznawane jedynie za potencjalnie biodostępne. Charakter specjacji analizowanych metali świadczy o dużej biodostępności cynku i miedzi. Jednak w związku z małą toksycznością tych metali ryzyko ekologiczne wynikające ze stosunkowo dużej dostępności ich mobilnych form jest małe. Bardziej niebezpieczny dla organizmów kadm i ołów posiadają nieco więcej nieaktywnych biologicznych form rezydualnych, średnio 35-39%.

Ocena zanieczyszczenia osadów dennych Zbiornika Włocławskiego metalami ciężkimi przeprowadzona za pomocą indeksu geoakumulacyjnego wykazała, że jest ono znaczące. O silnym zanieczyszczeniu osadów decydują przede wszystkim zawarty w nich kadm i chrom. Nieco mniejsze zanieczyszczenie stwierdzono ze względu na obecność w osadach baru, kobaltu, miedzi i cynku, a umiarkowane ze względu na obecność niklu i ołowiu. Średnia wartość wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego (RI) określonego dla As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn odpowiada klasie 4. Oznacza to, że zanieczyszczenie osadów metalami ciężkimi może stanowić bardzo duże zagrożenie dla funkcjonowania ekosystemu. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że o złym stanie ekologicznym osadów decyduje duża zawartość kadmu. W przypadku pozostałych metali wartości czynnika ryzyka nie przekraczają zakresów odpowiadających stanom małego i średniego ryzyka ekologicznego.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że Zbiornik Włocławski ze względu na swoje położenie w granicach koryta wielkiej wody, a także parametry morfometryczne i

hydroenergetyczną funkcję, w małym stopniu wpływa na transformację reżimu hydrologicznego dolnej Wisły. Jego funkcjonowanie prowadzi jednak do pogłębienia się niżówek oraz zwiększenia dynamiki zmienności przepływów poniżej zapory. Małe możliwości retencyjne zbiornika powodują, że kulminacje wezbrań zmniejszyły się w niewielkim stopniu.

Duża dynamika mieszania wody w zbiorniku, szybkość jej wymiany, niewielkie zmiany poziomu wody powodują, że wielkość i charakter zmian właściwości fizyczno-chemicznych wód rzecznych jest relatywnie mniejsza niż w zbiornikach charakteryzujących się długim czasem retencji. Stwierdzona tendencja polegająca na wydłużaniu i pogłębianiu się niżówek wpływa na zmniejszenie intensywności wymiany wody, a przez to na okresowe pogorszenie jej jakości.

Spadek prędkości przepływu skutkuje jednak tym, że dolna część zbiornika przekształca się w środowisko o cechach jeziornych. W warunkach przepływów mniejszych od średnich, w granicach limnicznego odcinka zbiornika, tworzy się pod wpływem oddziaływania wiatru, niezależna od przepływu Wisły, cyrkulacja wody. Taka zmiana warunków hydrologicznych w dużym stopniu decyduje o zróżnicowaniu właściwości fizyczno-chemicznych wody, koncentracji i cechach transportowanej zawiesiny oraz zróżnicowaniu właściwości osadów dennych w zbiorniku.

Widoczne zmiany struktury składu chemicznego i nieco inny przebieg procesów hydrochemicznych upoważniają do wyznaczenia w Zbiorniku Włocławskim dwóch różnych pod względem hydrochemicznym odcinków: reolimnicznego i limnicznego. Odcinek reolimniczny rozciąga się w zależności od wielkości przepływu Wisły do 650-655 km biegu rzeki, czyli obejmuje prawie dwie trzecie długości zbiornika. Właściwości fizyczno-chemiczne wody są tutaj bardzo podobne do właściwości wód Wisły zasilającej zbiornik. W odcinku limnicznym zmniejsza się koncentracja zanieczyszczeń organicznych, wzrastają stężenia związków azotu, a w niektórych latach również fosforu, ogólne zasolenie i stężenia chlorków. Okresowo pogarszają się również warunki tlenowe. Zakumulowane w osadach dennych zasoby fosforu i azotu są obecnie wtórnym źródłem zanieczyszczenia wód zbiornika substancjami biogennymi. Są one uwalniane do wody w wyniku resuspensji osadów dennych. Hydrochemiczna odmienność limnicznego odcinka zbiornika zanika w okresach charakteryzujących się przepływami wezbraniowymi.

Funkcjonowanie zbiornika wpłynęło na zmniejszenie średniej koncentracji zawiesiny o kilkadziesiąt procent oraz zmianę jej właściwości. Większe w niektórych okresach

zmęcenie w limnicznej części zbiornika łączyło się z dostawą produktów erozji dna oraz dostawą materiału z poddawanych abrazji brzegów zbiornika.

Przestrzenne zróżnicowanie właściwości osadów dennych w profundalu zbiornika odzwierciedla w ogólnych zarysach typowy schemat wyrażający się obecnością strefy piaszczysto-mułkowej w jego części reolimnicznej oraz mułkowej w profundalu części limnicznej. Duża dynamika wody w zbiorniku powoduje, że osady mułkowo-ilaste akumulowane w limicznym odcinku zbiornika podlegają resuspensji i redepozycji. Obszary charakteryzujące się niezakłóconą akumulacją ograniczone są do niewielkich izolowanych powierzchni uwarunkowanych morfologią rzeźby dna zbiornika. W efekcie na zróżnicowanie litologiczne osadów w mniejszym stopniu wpływa malejąca w kierunku zapory prędkość przepływu wody, a w większym zróżnicowanie morfometryczne zbiornika.

Mułkowo-ilaste osady są miejscem akumulacji metali ciężkich. Ich koncentracja jest wyraźnie wyższa od regionalnego tła geochemicznego. Czynnikiem różnicującym rozmieszczenie metali w osadach zbiornika jest udział zawartej w nich materii organicznej. Wyniki analizy specjacyjnej wykazały, że duża część najbardziej niebezpiecznych dla środowiska metali występuje we frakcjach rezydualnych, albo trudno dostępnych biologicznie.

Przedstawione uwarunkowania funkcjonowania geoekosystemu Zbiornika Włocławskiego potwierdziły tezę o zróżnicowanym i niejednoznacznym oddziaływaniu inwestycji tego typu na środowisko. Wykazano, że nawet w przypadku silnie przepływowych zbiorników zaporowych, takich jak Zbiornik Włocławski, dochodzi do istotnego przekształcenia właściwości środowiska rzecznego.

Literatura:

- Araujo M., Costa M.F., Aureliano J.T., Silva M.A., 2008, Mathematical modelling of hydrodynamics and water quality in a tropical reservoir, Northeast Brazil, *Brazilian Journal Aquatic Science and Technology*, 12, s. 19-30.
- Asselman N.E.M., 1999, Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine, *Hydrological Processes*, 13, s. 1437-1450.
- Asselman N.E.M., 2000, Fitting and interpretation of sediment rating curves, *Journal of Hydrology*, 234, 3-4, s. 228-248.
- Avakân A.B., Koçarân A.G., Majranovskij F.G., 1994, Vliânîe vodohraniliîs na transformacie himiçeskogo stoka rek, *Vodnye Resursy*, 21, 2, s. 144-153.
- Avakân A.B., Saltankin V.P., Šarapov V.A., 1987, *Vodohraniliîsa, Mysl', Moskva*.
- Babiński Z., 2002, Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych ze szczególnym uwzględnieniem stopnia wodnego „Włocławek”, *Wyd. Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz*.

- Babiński Z., Grześ M., 1995, Monografia hydrologiczna zbiornika Stopnia Wodnego Włocławek, Zeszyty IGiPZ PAN, 30.
- Bajkiewicz-Grabowska E., 2002, Obieg materii w systemach rzeczno-jeziornych, UW, WGiSR, Warszawa.
- Banach M., 1988, Główne procesy a osady w strefie brzegowej zbiornika Włocławek, Przegląd Geograficzny, 60, 3, s. 267-299.
- Bartoszek L., Koszelnik P., 2016, The qualitative and quantitative analysis of the coupled C, N, P and Si retention in complex of water reservoirs, Springer Plus 5, 1157.
- Batalla R.J., Gómez J.C., Kondolf G.M., 2004, Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River Basin (NE Spain), Journal of Hydrology, 290, s. 117-136.
- Batalla R.J., Gómez J.C., Kondolf G.M., 2004, Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River Basin (NE Spain), Journal of Hydrology, 290, s. 117-136.
- Błędzki L.A., Ellison A.M., 2000, Effects of water retention time on zooplankton of shallow rheolimnic reservoirs, Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie, 27, s. 2865-2869.
- Bogucka-Szymalska M., Magnuszewski A., 2007, Zastosowanie modelu NCCHE2D do oceny warunków sedimentacji w Jeziorze Włocławskim, Prace i Studia Geograficzne, 38, s. 105-116.
- Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Kocharyan A.G., 2001, Heavy Metals in the Ivan'kovo Reservoir Bottom Sediments, Water Resources, 28, 3, s. 278-287.
- Canavan R.W., Van Cappellen P., Zwolsman J.J.G., van den Berg G.A., Slomp C.P., 2007, Geochemistry of trace metals in a fresh water sediment: field results and diagenetic modeling, Sci Tot Environ., 381, s. 263-279.
- Corbus C., Stanescu V.A., 2004, The Stability Of The Hydrological Regimes: A Hydroecological Descriptor Of River Life, Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, Ohrid, Macedonia (ffp-50-120.pdf).
- Cunha D.G.F., do Carmo Calijuri M., Dodds W.K., 2014, Trends in nutrient and sediment retention in Great Plains reservoirs (USA), Environmental Monitoring and Assessment, 186, s. 1143-1155.
- Cunha-Santino M.B., Fushitaa A.T., Peret A.C., Bianchini-Juniora I., 2016, Morphometry and retention time as forcing functions to establishment and maintenance of aquatic macrophytes in a tropical reservoir, Braz. J. Biol., 76, 3, s. 673-685.
- Dąbkowska-Naskręt H., Różański S., Malczyk P., Rydlewska M., 2008, Badania zawartości całkowitej i analiza specjacyjna metali w osadach dennych Zbiornika Włocławskiego, Bydgoszcz, 1 strona tekstu, 6 tabel, archiwum Zakładu Zasobów Środowiska i Geozagrożeń IGiPZ PAN.
- Denisova A.I., Timčenko V.M., Nahšina E.P., Novikov B.I., Râbov A.K., Bass Â.I., 1989, Hidrologiâ i gidroimiâ Dnepra i ego vodohraniliš, Naukova Dumka, Kiev.
- Èdel'stejn K.K., 1991, Vodnye massy dolinnyh vodohraniliš, Izd-vo MGU, Moskva.
- Èdel'stejn K.K., 1998, Vodohraniliša Rossii: èkologičeskie problemy, puti ih rešeniâ, Izd-vo GEOS, Moskva.
- Foster I.D.L., Charlesworth S.M., 1996, Heavy metals in the hydrological cycle: trends and explanation, Hydrological Processes, 10, s. 227-261.
- Friedl G., Wüest A., 2002, Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming, Aquatic Sciences, 64, s. 55-65.
- Froehlich W., 1982, Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 143.
- Galicka W., Kruk A., Zięba G., 2007, Bilans azotu i fosforu w zbiorniku Jezioro, Nauka Przyr. Technol., 1, http://www.npt.up-poznan.net/tom1/zeszyt2/art_17.pdf.

- Giziński A., Falkowska E., 2003, *Hydrobiologia stosowana: Ochrona wód powierzchniowych*, Oficyna Wydawnicza Włocławskiego Towarzystwa Naukowego, Włocławek.
- Grabowska M., 2005, Cyanoprokaryota blooms in polyhumic Siemianówka dam reservoir in 1992-2003, *Ocean. Hydrob. Stud.*, 34, 1, s. 73-85.
- Graf W.L., 2006, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers, *Geomorphology*, 79, 336-360.
- Gregory K.J., Walling D.E., 1973, *Drainage Basin Form and Process*, Edward Arnold, London.
- Håkanson L., 1982, Bottom dynamics in lakes, *Hydrobiologia*, 91, s. 9-22.
- Helios-Rybicka E., 1986, Rola minerałów ilastych w wiązaniu metali ciężkich przez osady rzeczne górnej Wisły, *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia*, 32, Kraków.
- Ibáñez C., Prat N., Canicio A., 1996, Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary, *River Research and Applications*, 12, s. 51-62.
- Jokiel P., Bartnik A., 2005, Niektóre problemy zmian i zmienności rocznego hydrogramu przepływu rzeki na podstawie Pilicy w Przedborzu, *Wiadomości IMGW*, 2, s. 5-27.
- Jokiel P., Tomalski P., 2017, Zmiany sezonowości przepływu z biegiem Wisły, [w:] W. Marszelewski (red.), *Zasoby i perspektywy gospodarowania wodą w dorzeczu Wisły*, Monografie Komisji Hydrologicznej PTG tom 4, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, s. 99-116.
- Jones J.R., Knowlton M.F., 2005, Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes, *Water Res.*, 39, s. 3629-3635.
- Jossette G., Leporcq B., Sanchez N., Philippon, 1999, Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France), *Biogeochemistry*, 47, s. 119-146.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999, *Biogeochemia pierwiastków śladowych*, PWN, Warszawa.
- Kawara O., Yura E., Furii S., Matsumoto T., 1998, A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam reservoir, *Water Science & Technology*, 37, 2, s. 245-252.
- Kennedy R.H., Walker W.W., 1990, Reservoir nutrient dynamics, [w:] K.W. Thornton, B.L. Kimmel, F.E. Payne (red.), *Reservoir Limnology*, John Wiley and Sons, New York, s. 109-131.
- Kimmel B.L., Groeger A.W., 1984, Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective, *Lake and Reservoirs Management*, 2, s. 277-281.
- Kimmel B.L., Lind O.T., Paulson L.J., 1990, Reservoir primary production, [w:] K.W. Thornton, B.L. Kimmel, F.E. Payne (red.), *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*, John Wiley & Sons, New York, s. 133-193.
- Knighton A.D., 1988, The Impact of the Parangana Dam on the River Mersey, Tasmania, *Geomorphology*, 1, 3, s. 221-237.
- Kobierski M., Długosz J., 2009, Badania i ocena składu mineralogicznego osadów wodnych Zbiornika Włocławskiego, Bydgoszcz, 3 str., 12 ryc., 2 tab., archiwum Zakładu Zasobów Środowiska i Geozagrożeń IGiPZ PAN.
- Koster E.H., 1978, Transverse ribs, their characteristics origin, and paleohydrologic significance, [w:] A.D. Miall (red.), *Fluvial sedimentology*, Canadian Society of Petroleum Geologists, Mem. 5, s. 161-186.
- Koszelnik P., Bartoszek L., 2010, Retencja związków biogennych w zbiornikach zaporowych Górnego Sanu, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Błękitny San”, 27 - 28.05.2010r., s. 139-147.

- Labzovskij N.A., 1976, Rasčet elementov voln v ozerah i vodohranilišah, Tr. Gos. Gidrol. In-ta, Vyp., 231, s. 126-143.
- Liermann C.R., Nilsson C., Robertson J., Ng R.Y., 2012, Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity, *BioScience*, 62, s. 539-548.
- Litvinov A.S., 2000, Ėnergo- i massoobmen v vodohranilišah Volžskogo kaskada, Izd-vo Āroslav.tehn. un-ta, Āroslavl'.
- Lu T., Chen N., Duan S., Chen Z., Huang B., 2016, Hydrological controls on cascade reservoirs regulating phosphorus retention and downriver fluxes, *Environmental Science and Pollution Research*, 23, s. 24 166-24 177.
- Łajczak A., 1989, Rola zaporowych zbiorników wodnych w procesie transportu zawiesiny przez karpackie dopływy Wisły, *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, 29, s. 93-97.
- Łajczak A., 1995, Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły, *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, 8, Warszawa.
- Łajczak A., 2003, Silting of the Goczałkowice reservoir, [w:] A.T. Jankowski, M. Rzętała (red.), *Mat. Sympozjum Polsko-Czeskiego „Problemy geologiczne górnośląsko ostrawskiego regionu przemysłowego”*, WNoZ UŚ, Sosnowiec, s. 96-101.
- Magilligan F.J., Nislow K.H. 2001, Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed, *Journal of the American Water Resources Association*, 37, 6, 1551–1569.
- Magilligan F.J., Nislow K.H., 2005, Changes in hydrologic regime by dams, *Geomorphology*, 71, s. 61-78.
- Matta E., Selge F., Gunkel G., Hinkelmann R., 2017, Three-Dimensional Modeling of Windand Temperature-Induced Flows in the Icó-Mandantes Bay, Itaparica Reservoir, NE Brazil, *Water* 2017, 9(10), 772; <https://doi.org/10.3390/w9100772>
- Moss A.J., 1962, The physical nature of common sandy and pebble deposits, *American Journal of Science*, Part 1, 260, s. 337-373.
- Mroziński J., Pawula J., 2018, Przebieg procesu sedymentacji w czaszy zbiornika wrocławskiego w latach 1970-2015, *Gospodarka Wodna*, 3, s. 81-86.
- Nilsson C., Reidy C.A., Dynesius M., Revenga C., 2005, Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems, *Science*, 308, s. 405-408.
- Nocoń W., Barbusiński K., Nocoń K., Kernert J., 2013, Analiza zmian ładunku metali śladowych transportowanych wraz z zawieszinami wzdłuż biegu rzeki, *Ochrona Środowiska*, 35, 1, s. 33-38.
- Owens P.N., Walling D.E., 2002, Changes in sediment sources and floodplain deposition rates in the catchment of the River Tweed, Scotland, over the last 100 years: the impact of climate and land use change, *Earth Surface Process and Landforms*, 27, s. 430-23.
- Passega R., 1964, Grain-size representation by CM patterns as a geological tool, *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, s. 830-847.
- Petts G.E., 1984, *Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management*, Wiley, Chichester.
- Piniewski M., 2016, Natural streamflow simulation for two largest river basins in Poland: a baseline for identification of flow alterations, *Proc. IAHS*, 373, 101–107.
- Puchalski W., 1994, Czynniki regulujące zagęszczenie i dynamikę fitoplanktonu w zbiornikach zaporowych, [w:] Zalewski M. (red.), *Zintegrowana strategia ochrony i zagospodarowania ekosystemów wodnych*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź, s. 67-77.
- Racinowski R., Baraniecki J., 1990, Przydatność litologicznych wskaźników dla charakteryzowania wzdłuż brzegowego potoku rumowiska na polskim wybrzeżu Bałtyku, *Rozprawy Hydrotechniczne IBW PAN*, Gdańsk, 51, s. 159-210.

- Renöfält B.M., Jansson R., Nilsson C., 2010, Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystems, *Freshwater Biology*, 55, s. 49–67.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Powell J., Braun D.P., 1996, A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology*, 10, s. 1163–1174.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Wigington R., Braun D.P., 1997, How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, s. 231–249.
- Richter B.D., Thomas G.A., 2007, Restoring environmental flows by modifying dam operations, *Ecology and Society* 12(1), 12. [dostęp] <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art12/>
- Rosenberg D.M., McCully P., Pringle C.M., 2000, Global-scale environmental effects of hydrological alterations: introduction, *Bioscience*, 50, 9, s. 746–751.
- Seitzinger S.P., 1988, Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystem, *Limnol. Oceanogr*, 29, s. 73–83.
- Sheng Y.P., Lick W., 1979, The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, *J. Geophys. Res.*, 84, s. 1809–1826.
- Soares M.C.S., Marinho M.M., Huszar V.L.M., Branco C.W.C., Azevedo S.M.F.O., 2008, The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil, *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 13, s. 257–269.
- Sojka M., Jaskuła J., Wicher-Dysarz J., Dysarz T., 2016, The Impact of the Kowalskie Reservoir on the Hydrological Regime Alteration of the Główna River, *Journal of Ecological Engineering*, 17, 4, 91–98.
- Søndergaard M., Jensen J.P., Jeppesen E., 2003, Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes, *Hydrobiologia*, 506–509, s. 135–145.
- Štefan V.M., 1975, K rasčetu vodoobmena dolinnyh vodohraniliš, *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Un-ta, Ser. Geografiâ*, 5, s. 71–75.
- Straškraba M., 1999, Retention time as a key variable of reservoir limnology, [w:] J. Tundisi, M. Straškraba (red.), *Theoretical reservoir ecology and its applications*, Leiden: Backhuys Publishers, s. 385–410.
- Straškraba M., Blazka P., Brand Z., Hejzlar P., Komlškova J., Kubecka J., Nesmerak I., Prochazkova L., Straškrabova V., Vyhnalek V., 1993a, Framework for investigation and evaluation of reservoir water quality in Czechoslovakia, [w:] M. Straškraba, J.G. Tundisi, A. Duncan (red.), *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, Kluwer Academic Publishers, s. 169–212.
- Straškraba M., Tundisi J.G., 1999, Guidelines of lake management, Vol. 9, *Reservoir water quality management*, ILEC, Kusatsu, Japan.
- Syvitski J.P.M., Morehead M.D., Bahr D.B., Mulder T., 2000, Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters, *Water Resources Research*, 36/9, s. 2747–2760.
- Syvitski J.M.P., Vörösmarty C.J., Kettner A.J., Green P., 2005, Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean, *Science*, 308, s. 376–380.
- Teodoru C., Wehrli B., 2005, Retention of sediments and nutrients in the Iron Gate I Reservoir on the Danube River, *Biogeochemistry*, 76, s. 539–565.
- Tersa A., 2013, Barrage in Włocławek, *Acta Energetica*, 3, 16, s. 79–90.
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Analytical Chemistry*, 51, s. 844–851.
- Thomas R.L., Kemp L.W., Lewis C.F.M., 1972, Distribution, composition and characteristics of the surficial sediments of Lake Ontario, *Journal of Sedimentary Petrology*, 42(1), s. 66–84.

- Timčenko V.M, 1989, Hidrologičeskie processy v vodohranilišah dneprovskogo kaskada, [w:] A.I. Denisova (red.), *Gidrologiâ i gidroхимиâ Dnepra i ego vodohraniliš*, Naukova Dumka, Kiev, s. 19-58.
- Torabi Haghighi A., Marttila H., Kløve B., 2014, Development of a new index to assess river regime impacts after dam construction, *Global Planet. Change*, 122, s. 186-196.
- U.S. EPA. 2000, *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*, EPA-822-B-00-002, Office of Water, Washington, DC.
- Wagner I., Zalewski M., 2000, Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir – consequences for restoration, *Ecol. Eng.*, 16, s. 79-90.
- Walling D.E., 1974, Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization, [w:] K.J. Gregory, D.E. Walling (red.), *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds*. Institute of British Geographers, Spec. Publ. 6, s. 169-192.
- Walling D.E., Owens P.N., Waterfall B.D., Leeks G.J.L., Wass P.D., 2000, The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK, *The Science of the Total Environment*, 251/252, s. 205-222.
- Walling D.E., Russell M.A., Webb B.W., 2001, Controls on the nutrient content of suspended sediment transported by British rivers, *The Science of the Total Environment*, 266, s. 113-123.
- Ward J.V., Stanford J.A., 1995, The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers, *Regulated Rivers – Research and Management*, 10, s. 159-168.
- Wei G.L., Yang Z.F., Cui B.S., Li B., Chen H., Bai J.H., Dong S.K., 2009, Impact of Dam Construction on Water Quality and Water Self-Purification Capacity of the Lancang River, China, *Water Resources Management*, 23, s.1763–1780.
- Wiejaczka Ł., Wesoły K., 2012, Differentiation of temporal water level dynamics in the Besko and Klimkówka Reservoirs (The Low Beskids, Poland), *Geographia Polonica*, 85, 4, 33–43.
- Williams G.P., 1989, Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *Journal of Hydrology*, 111, 1–4, s. 89-106.
- Williams G.P., Wolman M.G., 1984, Downstream effects of dams on alluvial rivers, *Geological Survey Professional Paper*, 1286.
- Wiśniewski R., 1995, Rola resuspensji osadów dennych w funkcjonowaniu ekosystemów wodnych, Wydawnictwo UMK, Toruń.
- Van Cappellen P., Maavara T., 2016, Rivers in the Anthropocene: global scale modifications of riverine nutrient fluxes by damming, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 16, s. 106-111.
- Visher G.S. 1965, Use of vertical profile in environmental reconstruction, *American Association of Petroleum Geologists*, 49, 1, s. 41-61.
- Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C. Reidy, Davies P.M., 2010, Global threats to human water security and river biodiversity, *Nature*, 467, s. 555-561.
- Znamienskij V.A., 1981, *Gidrologičeskie processy i ich rol' v formirovanii kacestva vody*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Zhang Y., Jun X., Tao L., Quanxi S., 2010, Impact of water projects on river flow regimes and water quality in Huai River basin, *Water Resour. Management*, 24, s. 889-908.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

Literatura odnosząca się do części 5. znajduje się w Załączniku 4.

A. Morfogeneza rzeźby obszarów polodowcowych na Pojezierzu Pomorskim.

Badania w zakresie ewolucji form rzeźby młodoglacjalnej prowadziłem przede wszystkim przed uzyskaniem stopnia doktora. Były one naturalną kontynuacją zainteresowań z okresu studiów geograficznych. Ich celem było ustalenie genezy ujściowego odcinka doliny Wierzycy oraz zespołu pagórków i form wałowych pomiędzy Starogardem Gdańskim a Skórczem, a także przebiegu i warunków kształtowania się strefy marginalnej koło Kamienia Krajeńskiego.

Ustalono, że ujściowy odcinek doliny Wierzycy jest formą przetrwałą sprzed ostatniego nasunięcia lądolodu. Istotny wpływ na rozwój jej rzeźby miał martwy lód lodowcowy konserwujący pierwotne założenie formy dolinnej. Pozostałością tej fazy rozwoju doliny są formy szczelinowe w postaci pagórków kemowych, położone na zboczach doliny oraz obszary zasypania kemowego. Po ustąpieniu lądolodu dolina została przemodelowana przez wody odpływu fluwioglacjalnego i fluwialnego (zał. 4, poz. 47).

Przy współdziale martwego lodu powstały również formy wałowe pomiędzy Starogardem Gdańskim a Skórczem, interpretowane dotychczas, jako starogardzki kompleks ozowy. Przedstawiłem inny pogląd na genezę tych form. Tylko północną część zespołu form uznałem za formę ozową „sensu stricte”. Środkowa ma cechy kemowo-wytopiskowe, a południową zinterpretowałem jako formą powstałą w „rozpadlinie lodowej” strefy brzeżnej lądolodu podczas jego recesji (zał. 4, poz. 35, 48). Powszechność występowania form powstałych przy współdziale martwego lodu w obrębie badanej części Pojezierza Starogardzkiego wskazuje na arealny recesji lądolodu na tym obszarze.

Badania geomorfologiczne na Pojezierzu Krajeńskim miały na celu ustalenie genezy, najslabiej do tej pory zbadanej strefy marginalnej na tym obszarze. Na podstawie kartowania geomorfologicznego oraz analizy litofacjalnej osadów budujących ciąg wzgórz na północ od Kamienia Krajeńskiego przedstawiono nowy pogląd na rozwój tzw. moreny obkaskiej. Wykazano, że formy podłużnych wzgórz są elementami proksymalnej części stożka sandrowego. Charakter deformacji osadów budujących wał moreny czołowej wskazuje, że zostały one pchnięte w wyniku gwałtownego nasunięcia lądolodu o cechach serdżu (zał. 4, poz. 8, 51).

Do tej problematyki zaliczam również uczestnictwo w badaniach ewolucji systemu rzeczno-jeziornego środkowego odcinka doliny Wdy. Mój udział w tym projekcie polegał na określeniu parametrów paleohydrologicznych późnoglacjalnej doliny Wdy k. miejscowości Szłaga. Na podstawie obliczonych wartości parametrów paleokoryta i wielkości paleoprzepływów wykazano, że oprócz erozji fluwialnej istotnym czynnikiem kształtującym koryto była termoabrazja (zał. 4, poz. 2, 34).

B. Rola zjawisk lodowych w kształtowaniu brzegów i równiny zalewowej dolnej Wisły.

Charakterystyka skutków oddziaływania pokrywy lodowej na brzegi Zbiornika Włocławskiego była jednym z pierwszych tematów podjętych po zatrudnieniu w Instytucie. Po raz pierwszy w Polsce badania tego typu przeprowadzono na sztucznych zbiornikach wodnych. W oparciu o autorski system pomiarowy została określona wielkość i czas przemieszczeń pokrywy lodowej pod wpływem jej rozszerzalności termicznej. Scharakteryzowano geomorfologiczne efekty termicznego naporu lodu na brzeg oraz skutki oddziaływania na brzeg pól lodowych w czasie rozpadu pokrywy lodowej. Przedstawiono techniczne sposoby zabezpieczenia brzegów zbiorników i rzek przed naporem lodu (zał. 4, poz. 45, 46, 53).

Zatorogennym odcinkom koryt rzecznych towarzyszą czasami specyficzne formy erozyjne (krewasy) i akumulacyjne (glify krewasowe) na równinie zalewowej. Zidentyfikowano je również w okolicach Ciechocinka. Wykazano, że mają one tam postać dwuramiennej rynny erozyjnej, na przedpolu której zalegają piaszczyste osady będące pozostałością zdegradowanego stożka napływowego. Powstanie tych form było skutkiem skoncentrowanego wypływu z koryta Wisły wody o dużej energii w czasie zatoru śryżowo-lodowego w marcu 1924 (zał. 4, poz. 49). Badania geomorfologiczne i sedimentologiczne tego typu form prowadziłem również w dolinie Wisły w okolicach miejscowości Świniary k. Płocka zaraz po przejściu fali powodzi letniej w roku 2010 (zał. 4, poz. 127, 131, 136, 146).

C. Naturalne i antropogeniczne uwarunkowania zmienności odpływu rzecznego (Mongolia, Polska).

Na podstawie danych hydrologicznych oraz obserwacji przeprowadzonych w czasie wypraw naukowych do Mongolii zostały określone przyrodnicze uwarunkowania kształtowania się odpływu rzecznego oraz jego wieloletnia i sezonowa zmienność w endoreicznym obszarze Kotliny Wielkich Jezior w Mongolii oraz w zlewni rzeki Eg, na północy tego kraju. Wykazano, że głównymi czynnikami wpływającymi na wielkość i zmienność odpływu rzecznego są: skrajnie kontynentalny klimat, występowanie wieloletniej zmarzliny, piętrowy układ roślinności oraz różne czynniki o znaczeniu lokalnym. Charakter zasilania badanych rzek określono na podstawie przestrzennego zróżnicowania wielkości przewodnictwa elektrolitycznego wody. Nie stwierdzono trwałej tendencji zmian średnich przepływów rocznych. Reżim hydrologiczny badanych rzek charakteryzuje się występowaniem stabilnej, długotrwałej i głębokiej niżówki zimowej oraz wyraźnym

odpływem letnim. Duże parowanie ze zbiorników położonych w Kotlinie Wielkich Jezior wpływa na zmniejszenie odpływu, a nawet jego zanik w mniejszych ciekach. Jeziora położone na w obszarach o mniejszym parowaniu wyrównują przepływ rzeczny w cyklu rocznym i wieloletnim. (zał. 4, poz. 13, 55, 63, 65).

Badania odpływu rzeczno-jeziornego w Kotlinie Płockiej wykazały, że zmiany jego wielkości w przypadku największych cieków, spływających w obszar doliny Wisły z wysoczyzny, nawiązują do fluktuacji czynników klimatycznych. W przypadku mniejszych cieków, których zlewnie położone są w całości w granicach doliny Wisły, w związku z wyraźną przewagą zasilania podziemnego i retencją jeziorną, odpływ jest bardziej wyrównany. Zwrócono uwagę, że stan zasobów wodnych w zlewniach zachodniej i północnej części Kotliny Płockiej uległ pogorszeniu w wyniku melioracji rolnych oraz prac melioracyjnych związanych z budową zapory we Włocławku, a także wpływem eksploatacji wód podziemnych (zał. 4, poz. 3, 6, 14, 27, 29, 40, 44, 57).

D. Obieg energii i materii w geosystemach zlewni rzecznych i jeziornych.

Ważną częścią badań realizowanych przed doktoratem i kontynuowanych w kolejnych latach, były problematyka dotycząca określenia ilościowego i jakościowego udziału czynnika fluwialnego we współczesnym systemie denudacyjnym. Badania w tym zakresie prowadziłem zarówno w Polsce jak i innych częściach świata.

Najbardziej kompleksowy charakter miały badania zlewni rzeczno-jeziornych położonych w zachodniej części Kotliny Płockiej. Ich głównym celem było określenie uwarunkowań kształtowania się właściwości fizyczno-chemicznych wód powierzchniowych w powiązaniu z charakterem zasilania i mechanizmem krążenia wody w pradolinie Wisły. Wykazano, że właściwości chemiczne badanych wód są wypadkową złożonego systemu zasilania, na które składają się wody opadowe, dopływ powierzchniowy i podziemny z wysoczyzny, dopływy ascensyjne wód wgłębnych oraz wody infiltrujące z koryta Wisły. Skutkiem tego jest charakterystyczne zróżnicowanie przestrzenne właściwości chemicznych wody. Wyraża się ono obecnością trzech stref o przebiegu zgodnym z przebiegiem koryta Wisły i krawędzi wysoczyzny. Woda w strefie przywysoczyznowej i przykorytowej charakteryzuje się wyższą mineralizacją i większym udziałem jonów sodowych i chlorkowych, co świadczy o jej antropogenicznym przekształceniu. Wody powierzchniowe w centralnej części pradoliny są słabiej zmineralizowane, a ich właściwości hydrochemiczne wskazują, że są one zasilane wodami podziemnymi o ograniczonych możliwościach wymiany z wodami atmosferycznymi. W czasie przepływu w kierunku Wisły skład chemiczny wód

zasilających geosystem doliny podlega transformacji. Głównymi czynnikami, które są za to odpowiedzialne, to przede wszystkim antropopresja związana z działalnością rolniczą, retencja hydrochemiczna lasów i jezior, głębokość zalegania i dynamika zmian poziomu wód podziemnych oraz wpływ na skład jonowy osadów biogenicznych. Wykazano, że wielkość mineralizacji oraz zmienność stężeń jonów wykazuje związek z sezonowością zjawisk hydrologicznych i przebiegiem cyklu wegetacyjnego (zał. 4, poz. 3, 5, 12, 43, 50, 59). Szczególną uwagę zwrócono na znaczenie jezior w procesach kształtowania właściwości chemicznych wód odpływających ze zlewni (zał. 4, poz. 56). Poza asymilacją substancji biogenicznych przez hydrobionty polega ona na przemianach związanych z funkcjonowaniem układu węglanowego i reakcjami typu redoks.

Tematyka związana z funkcjonowaniem geosystemów rzeczno-jeziornych w krajobrazach polodowcowych jest również przedmiotem badań prowadzonych aktualnie na Pojezierzu Gostynińsko-Włocławskim i w Borach Tucholskich. W tych badaniach szczególny nacisk został położony na określenie znaczenia osadów węglanowych wypełniających misy zanikłych jezior na jakość wód powierzchniowych i podziemnych w zlewniach obszarów pojeziernych oraz przebieg współczesnej sedymentacji węglanowej w jeziorach (zał. 4, poz. m.in. 36, 78).

Z tą problematyką wiążą się również prowadzone przeze mnie badania limnologiczne. Koncentrowały się one głównie na określeniu naturalnych i antropogenicznych przyczyn zróżnicowania właściwości fizykochemicznych wody w jeziorach wieloakwenowych (zał. 4, poz. 9, 52, 80).

Badania ekspedycyjne przeprowadzone w zlewniach rzecznych Centralnej i Zachodniej Mongolii, zlewni Dades-Drira w Maroku oraz zlewni na wyspie Boa Vista (Republika Zielonego Przylądka) dotyczyły uwarunkowań kształtowania się właściwości fizykochemicznych wody w zlewniach strefy suchej i półsuchej. Szczególną uwagę zwrócono na znaczenie uwarunkowań i przebiegu typowych procesów dla wyżej wymienionych stref klimatycznych. Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że chemizm wód rzecznych i podziemnych w wysokogórskich częściach dorzeczy (Atlas w Maroku oraz Ałtaj, Changaj i Chentej w Mongolii) determinowany był głównie charakterem procesów wietrzeniowych. W zlewniach niżej położonych cechy chemiczne wód uwarunkowane są parowaniem oraz rozpuszczaniem ewaporatów charakterystycznych dla obszarów strefy suchej. Zasadniczy wpływ na wysoką mineralizację wód rzecznych oraz ich typ hydrochemiczny mają nawiązujące do przebiegu opadów atmosferycznych procesy krystalizacji i rozpuszczania soli oraz przenoszony przez wiatr zasolony pył mineralny. Charakterystycznym zjawiskiem dla rzek

o odpływie okresowym, które zostały zaobserwowane i scharakteryzowane są tzw. „powodzie jonowe”. Zdarzenia te charakteryzują się szybkim wzrostem mineralizacji wody do bardzo wysokiego poziomu w początkowej fazie odpływu i wyraźnym spadkiem jeszcze przed kulminacją odpływu. Źródłem łatwo rozpuszczalnych soli są wówczas wykwity solne obecne na powierzchni i w stropowej warstwie aluwii, a w przypadku zlewni na Boa Vista także sole pochodzące z aerozolu oceanicznego (zał. 4, poz. 13, 39, 55, 62, 73, 75).

E. Przyrodnicze skutki funkcjonowania zbiorników zaporowych

Przedstawiona w monografii problematyka badawcza nie uwzględniła całego zakresu badań, jakie prowadziłem na Zbiorniku Włocławskim. Ważną ich częścią była również ocena zróżnicowania warunków troficznych w Zbiorniku Włocławskim. Wykazano, że mimo wysokich stężeń substancji biogenicznych istnieją czynniki ograniczające wielkość produkcji pierwotnej w zbiorniku. Dowiedziono, że potencjalne możliwości rozwoju fitoplanktonu, szczególnie w rzecznej części zbiornika limitowane są dostępnością światła i azotu. Na niską koncentrację chlorofilu-a w limnicznej części zbiornika wpływa sedymentacja planktonu rzecznoego, szybka wymiana i duża dynamika wody. Przeprowadzone badania wykazały, że bardziej produktywny jest górny odcinek zbiornika, gdzie w zależności od wielkości dopływu wody warunki zmieniały się od eutroficznych do hipertroficznych. Odcinek jeziorny zbiornika charakteryzuje się eutrofią, a okresowo w strefie pozakorytowej nawet mezotrofią (zał. 4, poz. 4, 19, 23).

Po raz pierwszy do oceny produktywności biologicznej zbiorników zaporowych w Polsce wykorzystano metodę polegającą na określeniu zawartości pigmentów roślinnych w osadach dennych. Zróżnicowanie zawartości chloropigmentów w profilu pionowym osadów wskazuje, że w początkowym okresie funkcjonowania produktywność zbiornika odpowiadała mezotrofii, następnie warunkom eutroficznym, a obecnie hipertroficznym. Wykazano, że zróżnicowanie zawartości chlorofilu i feopigmentów w osadach zależy bardziej od typu osadu, niż od zmian głębokości czy położenia w określonej strefie ekologicznej zbiornika (zał. 4, poz. 32, 70, 71, 85).

Badania koryta Wisły przeprowadzone poniżej i powyżej Zbiornika Włocławskiego wykazały, że funkcjonowanie zapory było jedną z przyczyn transformacji jego układu. Zarówno powyżej, jak i poniżej zbiornika zaobserwowano spadek liczby form korytowych i międzykorytowych oraz zmniejszenie liczby i powierzchni odsypów piaszczystych. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na podobny kierunek rozwoju systemów korytowych na obydwu odcinkach mimo różnego wpływu czynników antropogenicznych na przebieg

procesów fluwialnych. Wykazano, że oddziaływanie zapory we Włocławku w połączeniu ze skutkami wpływu budowli regulacyjnych spowodowało przekształcenie jednokorytowego systemu piaskodennej rzeki roztokowej w system rzeki rozgałęzionej (anabranching) (zał. 4, poz. 81).

Wpływ Zbiornika Włocławskiego oraz innych elementów zabudowy hydrotechnicznej na stan ekosystemu dolnej Wisły był rozpatrywany również w kontekście zmian jakości wody. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, że oddziaływanie zbiornika na jakość wody dolnej Wisły widoczne jest jeszcze w Nieszawie (23 km poniżej zapory), a zanika całkowicie poniżej Torunia. Zmiany wielkości sumarycznego indeksu jakości wody w profilu podłużnym dolnej Wisły wskazują, że Zbiornik Włocławski wpływa na niewielką poprawę jakości wód Wisły (zał. 4, poz. 10, 15, 16, 30, 58, 64).

Badania sedymentologiczne i geochemiczne prowadziłem również na zbiorniku zaporowym Soczewka, który funkcjonuje od ponad 160 lat na rzece Skrwa Lewa. Określono, że średnie wypełnienie zbiornika osadami wynosi około 1 m, a ich maksymalna miąższość osiąga 3,6 m. Silna przepływowość zbiornika nie pozwalała na wykształcenie osadów o cechach jeziornych. Zawartość metali ciężkich w osadach mieści się w zakresie wartości tła geochemicznego. Tylko w nielicznych przypadkach koncentracja Hg, Cr, Cu, Cd, i Zn nieznacznie przekraczała wartości graniczne dla I klasy czystości wg klasyfikacji PIG. Podwyższoną koncentrację metali stwierdzano próbkach o większej zawartości materii organicznej oraz reprezentujących stropową warstwę osadów. Stopniowy spadek w głąb profilu wykazywała również zawartość związków organicznych z grupy WWA. Wyniki badań geochemicznych nie pozwalają jednak na wyznaczenie granicy pomiędzy współczesną, przebiegającą w warunkach zanieczyszczenia środowiska, sedymentacją osadów a ich akumulacją w okresie przedprzemysłowym. Fakt ten, jak również skład i cechy uziarnienia osadów dennych, świadczą o dużym wpływie procesów redepozycyjnych na przebieg sedymentacji w badanym akwenie (zał. 4, poz. 42, 44).

W ramach współpracy z Instytutem Biologii Wód Śródlądowych Rosyjskiej Akademii Nauk w 2012 roku prowadziłem badania dotyczące transformacji właściwości wody i osadów w profilu podłużnym zbiorników zaporowych Kaskady Górnej. Wykazano, że funkcjonowanie zbiorników w systemie kaskadowym nie wpłynęło na zanik, charakterystycznej dla zbiorników, trójdzielności środowiska wodnego wyrażonego obecnością strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej. Odpowiednikami stref rzecznych w drugim i kolejnym zbiorniku są ich cofki, które rozciągają się do zapory wyższego zbiornika w kaskadzie. Duża energia i siła erozyjna wód poniżej zapór powoduje, że warunki

hydrodynamiczne są tutaj podobne jak w górnych, rzecznych odcinkach zbiorników funkcjonujących samodzielnie. Opisywana trójdzielność widoczna jest w przypadku zróżnicowania właściwości osadów dennych. W mniejszym stopniu zaznacza się w odniesieniu do zróżnicowania cech fizyczno-chemicznych wody. Obecność słabo zmineralizowanych wód w dolnych odcinkach zbiorników i poniżej zapór świadczy o istnieniu ciągłości hydrochemicznej między kolejnymi zbiornikami. Istotny wpływ na zmiany przebiegu wielu analizowanych parametrów mają uwarunkowania lokalne takie jak: zróżnicowanie głębokości zbiorników, dopływy boczne, obecność brzegów abrazyjnych czy intensywna żegluga. Wykazano, że oddziaływanie czynników lokalnych może zakłócać przebieg kontinuum rzeczno-żeglownego w równie dużym stopniu jak funkcjonowanie zapór. (zał. 4, poz. 38, 83, 84).

W tym nurcie moich zainteresowań badawczych mieszczą się również rzadko podejmowane w Polsce badania dotyczące skutków katastrof zapór na rzekach oraz uwarunkowań akumulacji osadów dennych w kanałach żeglownych. W pierwszym przypadku zrekonstruowano przebieg powodzi oraz scharakteryzowano geomorfologiczne skutki i sedimentologiczny zapis przerwania zapory na rzece Młynówka w Górowie Iławeckim. Wykazano, że znaczący wpływ na przebieg procesów erozyjno-depozycyjnych miały cechy morfometryczne oraz sposób zagospodarowania doliny. Dużą dynamiką charakteryzowały się nie tylko procesy erozyjne, ale również akumulacyjne. Świadczy o tym między innymi budowa stożka delty położonej bezpośrednio poniżej uszkodzonej zapory. Budują ją osady typu slurry-flow tworzące się w warunkach zalewu o wysokiej gęstości (hyperconcentrate flow) (zał. 4, poz. 60, 61). Badania osadów dennych Kanału Bydgoskiego wykazały, że tworzy je mało zróżnicowany materiał grubo mułkowy, akumulowany w warunkach niewielkiej dynamiki środowiska prądowego. Okresowy wzrost dynamiki wody, spowodowany pracą śluz, ruchem jednostek pływających oraz wiatrem powoduje resuspensję osadów. Są one wówczas transportowane na niewielkie odległości w postaci przydennej zawiesiny frakcjonalnej i zawiesiny jednorodnej. Efektem wielokrotnej redepozycji osadów jest ich dobre wymieszanie (zał. 4, poz. 76).

Piotr Gierszewski
29.03.2017