

WPLYW OBNIŻENIA NORMALNEGO POZIOMU PIĘTRZENIA ZBIORNIKA JEZIORSKO NA PRZEPLYWY NIŻÓWKOWE NA RZECE WARCIE

Tomasz Kałuża, Zbigniew Sroka, Joanna Lewandowska
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę wpływu powiększenia rezerwy powodziowej zbiornika Jeziorsko na przepływy niżówkowe odcinka Warty poniżej zapory czołowej stopnia piętrzącego. Zwiększenie rezerwy powodziowej o ok. 20 mln m³ uzyskano poprzez zmianę normalnego poziomu piętrzenia (NPP) z rzędnej 120,50 m n.p.m do rzędnej 120,00. Zbiornik Jeziorsko jest zbiornikiem wielofunkcyjnym, który nie tylko stanowi ważny element ochrony przeciwpowodziowej, ale spełnia również funkcje alimentacyjną w okresach występowania niskich i bardzo niskich przepływów na rzece Warcie. Obniżenie NPP zredukowało objętość przeznaczoną na alimentację cieku poniżej zapory czołowej, zmniejszając możliwości wyrównywania przepływów w okresach niżówkowych. Analizę wykonano z wykorzystaniem jednowymiarowego numerycznego modelu przepływów niustalonych odcinka Warty od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do Obornik. Hydrogramy zrzutu ze zbiornika zostały wyznaczone z wykorzystaniem numerycznego modelu optymalizacji pracy zbiornika. Otrzymane wyniki wykazały znaczący wpływ obniżenia NPP na przepływy niżówkowe na odcinku Warty poniżej zbiornika. Zwiększyła się zarówno liczba ze zrzutem zapewniającym przepływ nienaruszalny jak i liczba dni z przepływem niższym niż SNQ w analizowanych przekrojach wodowskazuowych.

Słowa kluczowe: retencyjne zbiorniki wielofunkcyjne, optymalizacyjny model zarządzania retencją, numeryczny model przepływu niustalonego.

WSTĘP

Zbiornik retencyjny znacząco wpływa na reżim hydrologiczny sieci rzecznej. Zmniejsza przepływy maksymalne poprzez redukcję przepływów powodziowych lub wezbrań oraz podwyższa przepływy minimalne alimentując ciek w okresach niżów-

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr hab. inż. Tomasz Kałuża, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 92A, 60-649 Poznań, e-mail: tomasz.kaluzaj99@gmail.com.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

kowych [Byczkowski 1996, Acreman i Dunbar 2004, Romanowicz i Osuch 2011]. Oddziaływanie zbiornika na reżim przepływu może być zarówno pozytywne, jak i negatywne – nawet na tym samym odcinku rzeki. Takie ambiwalentne, niejednoznaczne uwarunkowania mają miejsce np. w sytuacji, kiedy na jednym brzegu występują tereny rolnicze, w tym grunty orne i zbiornik może zapobiec ich zalaniu, a na drugim obszary chronione z siedliskami wymagającymi częstych zalewów i utrzymywania wysokiego stanu wód gruntowych [Laks i Kaluża 2012]. Stąd też w wielu sytuacjach bardzo trudno jest określić, która z głównych funkcji zbiornika winna determinować schemat gospodarki wodnej na obiekcie [Bower i in. 1962, Król i in. 2014, Huang i in. 2016]. Gospodarkę wodną na zbiorniku określają: instrukcja gospodarowania wodą oraz obowiązujące pozwolenie wodnoprawne na piętrzenie, retencjonowanie i gospodarcze wykorzystanie wód [Byczkowski 1996]. Dokumenty te determinują pracę zbiornika w określonych warunkach hydrologicznych. Stąd też wszelkie działania mające na celu optymalizację pracy zbiornika muszą uwzględniać zapisy obydwu dokumentów.

Poprzez analizę różnych wariantów gospodarowania zasobami wodnymi zbiornika oraz wykorzystanie rezerwy powodziowej możliwa jest ocena wpływu tych działań na odcinek rzeki poniżej zapory [Romanowicz i in. 2010, Kiczko i in. 2011, Romanowicz i Osuch 2011, Kasperek i Wiatkowski 2014]. Pozwala to określić wpływ reżimu eksploatacyjnego zbiornika na rzekę i ekosystemy od niej zależne. Powszechnie stosowanym narzędziem umożliwiającym określenie optymalnych schematów pracy zbiornika jest model matematyczny z odpowiednio zdefiniowaną funkcją celu i warunki ograniczające. Różnego typu modele matematyczne optymalizacji pracy zbiornika są szeroko opisywane w literaturze [Labadie 2004, Kaluża i Laks 2012, Piotrowski i in. 2012, Huang i in. 2016]. Natomiast transformację zrzutu ze zbiornika w sieci rzecznej można analizować z wykorzystaniem numerycznych modeli przepływów nieustalonych o różnym stopniu uproszczenia [Cunge i in. 1980, Laks 2008, Kiczko i in. 2011, Laks i Kaluża 2012, Laks i in. 2013, Wosiewicz i in. 2013, Laks i in. 2017]. Numeryczny model optymalizacji pracy zbiornika w połączeniu z modelem hydrodynamicznym bądź modelami statystycznymi odcinka sieci rzecznej poniżej zbiornika umożliwia również elastyczne reagowanie na aktualną sytuację hydrologiczną, środowiskową i funkcjonalną rzeki [Romanowicz i in. 2010, Romanowicz i Osuch 2011, Choi i Mantilla 2015]. Optymalne wykorzystanie zasobów wodnych zbiornika w okresach niżówkowych jest jednym z istotniejszych problemów wymagających zastosowania modeli numerycznych [Shih i ReVelle 1994, Lund i Reed 1995, Cancelliere i in. 1998, Huang i in. 2016]. Należy jednak zauważyć, że funkcja celu może być trudna do zdefiniowania, szczególnie dla systemów rzecznych, w których czynnik środowiskowy, żeglugowy i gospodarczy jest jednakowo istotny. Bardziej zaawansowane analizy powinny bazować na modelach optymalizacji wielokryterialnej [Tarnowski 2011] i w tym kierunku są kontynuowane badania.

Celem pracy było określenie ilościowego wpływu obniżenia normalnego poziomu piętrzenia (NPP) zbiornika Jeziorsko z rzędnej 120,50 m n.p.m do 120,00 m n.p.m na alimentację rzeki Warty w okresach niżówkowych. Obniżenie NPP miało przede wszystkim na celu zwiększenie rezerwy przeciwpowodziowej. Zmniejszono jednocześnie objętość retencjonowanej wody o 19,5 mln m³ co ograniczyło możliwości alimentacyjne

zbiornika. Miarą ilościową wpływu obniżenia NPP jest liczba dni zrzutu przepływu nienaruszalnego ze zbiornika oraz liczba dni występowania przepływu poniżej SNQ w wybranych przekrojach wodowskazowych. Analizę przeprowadzono dla danych hydrologicznych z roku 1995, który charakteryzował się najniższym w okresie eksploatacji zbiornika dopływem oraz średnim odpływem.

CHARAKTERYSTYKA ZBIORNIKA JEZIORSKO

Zbiornik wodny Jeziorsko zlokalizowany jest w środkowym biegu rzeki Warty, na granicy województwa wielkopolskiego i łódzkiego. Rzeka Warta opisywana jest jako rzeka nizinna z przewagą wezbrań roztopowo-zatorowych (zimowo-wiosennych) nad wezbrzeniami opadowymi (letnimi) [Hämmerling i in. 2015]. W obrębie zalewu zbiornika znajduje się odcinek Warty od km 484,3 (zapora czołowa na linii wsi Skęczniew i Łyszkowice) do km 503,7 (most drogowy w miejscowości Warta). Powierzchnia zlewni rzeki Warty w przekroju zapory czołowej wynosi 9012,6 km². Lokalizacja zbiornika jest przedstawiona na ryc. 1. Podstawowe dane o aktualnych poziomach piętrzenia na zbiorniku przedstawiono w tabeli 1.

Obowiązujący aktualnie NPP 120,00 n.p.m. został wprowadzony wraz z nową Instrukcją Gospodarowania Wodą na zbiorniku w roku 2013. Od początku okresu eksploatacji zbiornika do roku 2013 NPP wynosił 120,5 m n.p.m., a objętość retencjonowanej wody to 162,3 mln m³. Zgodnie z obowiązującą aktualnie Instrukcją Gospodarowania Wodą napełnienie zbiornika Jeziorsko poprzez piętrzenie do rzędnej NPP = 120,00 m n.p.m. odbywa się w okresie od 1 lutego do 15 kwietnia, a jego opróżnianie w okresie od 15 września do 31 grudnia.



Ryc. 1. Lokalizacja zbiornika Jeziorsko (na podstawie OpenstreetMap)
Fig.1. The location of the Jeziorsko reservoir (based on OpenstreetMap)

Tabela 1. Zestawienie podstawowych poziomów piętrzenia, pojemności oraz powierzchni zalewu [IMGW 2008]

Table 1. A summary of key levels of damming and the area of the reservoir [IMGW 2008]

Wyszczególnienie Specification	Rzędna piętrzenia Water level	Pojemność całkowita Volume	Powierzchnia zalewu Area of the reservoir
	m. n.p.m.	mln m ³	km ²
Normalny poziom piętrzenia (NPP) Normallevel of damming	120,00	142,80	35,08
Maksymalny poziom piętrzenia (Max PP) Maximum level of damming	121,50	202,04	36,65
Nadzwyczajny poziom piętrzenia (Nad PP) Extraordinarylevel of damming	122,00	222,55	37,73
Minimalny poziom piętrzenia (Min PP) Minimum level of damming	116,00	28,93	16,45

Zbiornik Jeziorsko jest zbiornikiem wielozadaniowym, którego funkcje wg Instrukcji Gospodarowania Wodą [Hydroprojekt Poznań 2014] związane są m.in. z następującymi celami piętrzenia i gromadzenia wody:

1. zmniejszenie zagrożenia powodziowego w dolinie rzeki Warty poniżej zbiornika poprzez redukcję wezbrań powodziowych,
2. kształtowanie zasobów wodnych w dolinie rzeki poprzez uzyskanie znaczącego wpływu na wielkość bieżącego przepływu w rzece Warcie i tym samym umożliwienie sterowania przepływem w zakresie przepływów niskich i wysokich, w ramach kształtowania zasobów wodnych rzeki Warty w dolinie poniżej zbiornika.

W ramach pkt. 2 zbiornik Jeziorsko powinien umożliwić:

- zagwarantowanie w rzece Warcie poniżej zbiornika przepływu nienaruszalnego,
- przerzut wody na szczytowe stanowisko Kanału Ślesińskiego dla uzupełnienia wody w systemie chłodniczym Elektrowni Pątnów i Konin,
- przerzut wody do systemu chłodniczego Elektrowni Adamów,
- wykorzystanie retencjonowanej wody przez przemysł i gospodarkę komunalną w rejonie doliny rzeki Warty,
- wykorzystanie retencjonowanej wody dla nawodnień w rolnictwie,
- wyrównania przepływów rzeki Warty w okresach niżówkowych,
- poprawianie warunków żeglugowych na odcinkach żeglownych rzeki Warty.
- energetyczne wykorzystanie piętrzenia w zbiorniku Jeziorsko poprzez produkcję energii elektrycznej w elektrowni wodnej Jeziorsko zlokalizowanej przy zaporze czołowej,
- prowadzenie gospodarki rybackiej na zbiorniku oraz na kompleksie stawów w Pęczniewie,
- utrzymanie w górnej partii zbiornika warunków siedliskowych dla ptactwa wodnego,
- umożliwienie rozwoju rekreacji i turystyki wokół zbiornika.

Zbiornik Jeziorsko wraz z dwoma polderami (Majdany i Golina) stanowi ważny element ochrony przeciwpowodziowej dużych aglomeracji położonych poniżej [Laks i Kałuża 2012, Walczak i in. 2013, Walczak i in. 2016, Laks 2017]. Właśnie ta funkcja jest często wskazywana jako najbardziej istotna, pomimo że zjawiska powodziowe w okresie eksploatacji zbiornika występowały znacznie rzadziej niż przepływy niżówkowe.

METODY, MATERIAŁY I NARZĘDZIA BADAWCZE

Model optymalizacji pracy zbiornika Jeziorsko

Wielozadaniowy charakter pracy zbiornika Jeziorsko sprawia, że trudno określić funkcję celu gospodarowania wodą na zbiorniku bez wskazania (często arbitralnie) jej priorytetów. Jeśli priorytetem jest zapewnienie komfortu hydrologicznego obszarom chronionym wymagającym częstego zalewania, należy gospodarkę na zbiorniku ukierunkować na maksymalizację liczby dni ze stanami powyżej wody brzegowej. Może to z kolei kłócić się z funkcją zbiornika, która zakłada utrzymanie stałego piętrzenia w określonym przedziale czasowym i ochronę terenów użytkowanych rolniczo przed zalewaniami. Przytoczone tu przykłady pokazują złożoność problematyki optymalizacji pracy zbiorników retencyjnych już na poziomie zdefiniowania funkcji celu. Jedynymi wyjątkami są okresy ekstremalne, które wymuszają na zarządcy zbiornika przeprowadzenie procesu gospodarowania wodą w sposób możliwie optymalny. Zdarzeniami ekstremalnymi będzie przejście fali powodziowej lub długotrwały przepływ niżówkowy, mniejszy od minimalnego dopuszczalnego zrzutu ze zbiornika. Funkcjami celu w tych sytuacjach są:

- maksymalna redukcja przepływu, przy jednoczesnym zachowaniu ograniczeń eksploatacyjnych (np. maksymalnego dobowego przyrostu stanów) zapewniającym bezpieczeństwo zbiornika dla przejścia fali powodziowej,
- maksymalizacja przepływu oraz okresu czasu jego trwania w okresie alimentacji ciek.

W obydwu sytuacjach nie istnieje konflikt celów na odcinku poniżej zbiornika. Każde zdarzenie ekstremalne wpływa negatywnie zarówno na obszary chronione, jak i użytkowane gospodarczo. Proces optymalizacji pracy zbiornika może być, jak wspomniano wcześniej, wspomagany stosownym modelem matematycznym, umożliwiającym sprawne przeprowadzenie symulacji dla wielu wariantów. W dalszych analizach wykorzystano model retencji zbiornika zbudowany na potrzeby opracowania „Analiza wpływu obniżenia, na zbiorniku Jeziorsko, normalnego poziomu piętrzenia (NPP) na kształtowanie zasobów wodnych w zakresie przepływów niskich i wysokich (na podstawie analizy charakterystycznych lat suchych i mokrych)” [Przybyła i in. 2011]. Szerszy opis modelu znajduje się również w pracy Kałuży i Laks [2012]. W omawianym modelu przyrost (w czasie) retencji V w zbiorniku możemy zapisać w postaci równania:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{dop}(t) - Q_{odp}(t) \quad (1)$$

Stąd równanie retencji zbiornika, uwzględniając warunek początkowy $V(t_p)$ przyjmie postać:

$$V(t_k) = \int_{t_p}^{t_k} [Q_{dop}(t) - Q_{odp}(t)] dt + V^k(t_p) \quad (2)$$

gdzie:

- Q_{dop} – dopływ do zbiornika,
- Q_{odp} – odpływ ze zbiornika,
- t_p i t_k – odpowiednio początkowy i końcowy czas symulacji.

W trakcie obliczeń przyjmuje się często, że funkcja podcałkowa jest stała na kroku czasowym, a wartość całki w równaniu (2) jest obliczana numerycznie.

Wyznaczenie rzędnej zwierciadła wody w zbiorniku, wymaga zdefiniowania parametrów krzywej napełnienia $V(H_2)$. Krzywa ta podawana jest w postaci odpowiedniego równania lub (najczęściej) aproksymowana łamaną.

Posiadając informacje o hydrogramie dopływu do zbiornika można wyznaczyć hydrogram odpływu poprzez rozwiązanie odpowiednio sformułowanego zadania optymalizacyjnego. Zadanie to zostało dla zbiornika Jeziorsko przyjęte następująco:

- funkcją celu jest minimalna wartość obszaru pomiędzy hydrogramami dopływu i odpływu, można to także określić jako minimalne działanie zbiornika,
- zbiornik może być wypełniony (opróżniony) do określonych rzędnych determinujących objętość rezerwy powodziowej lub objętość alimentacyjną dla okresów niżówkowych,
- warunkami ograniczającymi są dobowe przyrosty lub spadki zwierciadła wody w zbiorniku, minimalny lub maksymalny dopuszczalny zrzut ze zbiornika.

Przy tak sformułowanej funkcji celu oraz warunkach ograniczających jako rozwiązanie uzyskuje się optymalny z punktu widzenia przyjętych kryteriów hydrogram odpływu. Hydrogramy te stanowią warunki brzegowe dla modelu hydrodynamicznego odcinka rzeki poniżej zapory czołowej. Sformułowanie zadania optymalizacji dynamicznej z uwagi na jego nieliniowość uproszczono przechodząc poprzez dyskretyzację zmiennej niezależnej do zadania statycznego [Bayazit i Ünal 1990, Tarnowski 2011].

Model hydrodynamiczny przepływów rzeki Warty

Do analizy warunków przepływu rzeki Warty na odcinku zbiornik Jeziorsko–Oborniki wykorzystano jednowymiarowy system analizy i prognozowania przepływów nieustalonych SPRuNeR [Wosiewicz i in. 1996, 2013, Laks 2009], który budowany był przede wszystkim pod kątem modelowania przepływów dla długich odcinków rzek nizinnych. Systemem tym wykonano szereg symulacji przepływów różnych odcinków rzeki Warty, Proсны i Noteci dla fal historycznych o różnym prawdopodobieństwie przewyższenia [np. Przybyła i in 2011, Laks i in. 2013]. Do opisu transformacji przepływu na odcinkach bez zabudowy hydrotechnicznej wykorzystano układ równań Saint-Venanta [de Saint-Venant 1871]. Rozwiązanie tych równań jest możliwe pod warunkiem poprawnego sformułowania zagadnienia początkowo-brzegowego. Wymagana jest tu znajomość rozkładu stanów i przepływów w chwili początkowej $t = t_0$ oraz odpowiednio sformułowanych dwóch warunków brzegowych. Z uwagi na nieliniowy charakter równań ich

rozwiązania dla koryt naturalnych poszukiwać można wyłącznie metodami numerycznymi. W systemie SPRuNeR, do dyskretyzacji równań przepływu stosuje się metodę różnic skończonych, wykorzystując niejawne schematy różnicowe [Preissmann 1961]. Najnowsza wersja systemu (z 2015 roku) pracująca pod kontrolą systemu WINDOWS, została rozszerzona o możliwość modelowania pracy układu polderów i przelewów wałowych, stopni wodnych oraz dolin zalewowych.

Model obliczeniowy odcinka rzeki Warty od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do Obornik zawierał 353 przekroje poprzeczne powiązane w 356 odcinki obliczeniowe. W modelu wykorzystano przekroje batymetryczne wykonane w ramach projektu ISOK, a także pomiary własne przekrojów wykonane przez zespół badawczy Instytutu Budownictwa i Geoinżynierii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu w latach 2010–2014. Warunkami brzegowymi były hydrogramy stanów w dolnym przekroju brzegowym (Oborniki) oraz hydrogram przepływów w górnym przekroju brzegowym (zapora czołowa zbiornika Jeziorsko). Na analizowanym odcinku uwzględniono główne dopływy Warty. Rzeki Ner i Rgilewka modelowane były jako gałęzie modelu opisane przekrojami poprzecznymi, a Proсна, Powa, Kielbaska, Czarna Struga, Wrześnica i Kanał Mosiński jako dopływy skupione opisane hydrogramami przepływu.

Tarowanie modelu hydrodynamicznego

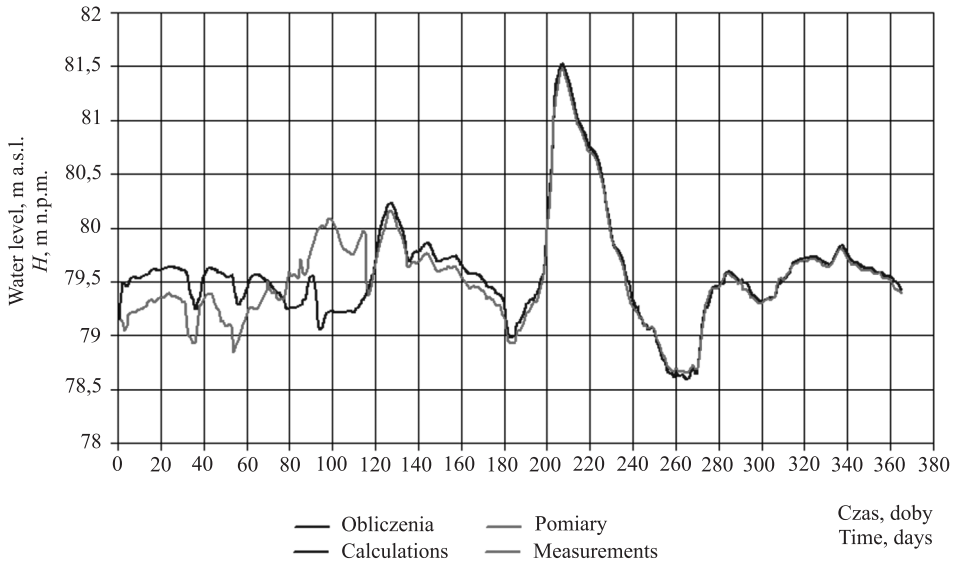
Parametrami podlegającymi tarowaniu w jednowymiarowych modelach przepływu niustalonych są współczynniki szorstkości, których wartości początkowe wyznaczono, wykorzystując zmodyfikowaną metodę Cowena, bazującą na analizie zdjęć lotniczych, numerycznym modelu terenu (NMT) oraz dostępnych pomiarach hydrometrycznych wykonanych w 2013 roku [Mazur i in. 2015]. Wartości współczynników szorstkości, w większości przypadków, zmieniały się w zakresie od 0,025 do 0,037, sporadycznie przekraczając ten przedział i osiągając wartość 0,047. W systemie SPRUNER kalibracji podlegają również wartości współczynnika C_T determinujące zasięg aktywnej strefy przepływu zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Laksa i Kałużę, opisaną w pracy Laksa [2008]. Zakres wartości tych współczynników zmieniał się od 1 do 3.75.

Kalibracja modelu została wykonana dla fali wezbraniowej z 2013 roku a jego weryfikację przeprowadzono dla hydrogramów stanów z 2010 roku w przekrojach wodowskazowych: Uniejów, Koło, Sławsk (ryc. 2), Nowa Wieś Podgórna i Poznań. Model dobrze odwzorował zarówno kształt fali powodziowej, jak i wartości rzędnych, szczególnie w fazie kulminacji. Jako metryki dopasowania przyjęto współczynniki korelacji oraz średni błąd kwadratowy $\overline{\Delta H}$ pomiędzy pomierzonymi i obliczonymi rzędnymi zwierciadła wody wyliczony według wzoru:

$$\overline{\Delta H} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Hp_i - Ho_i)^2}{n}} \quad (3)$$

gdzie:

- Hp_i – pomierzona rzędna zwierciadła wody, m,
- Ho_i – obliczona rzędna zwierciadła wody, m,
- n – liczba pomiarów.



Ryc. 2. Porównanie obliczonych i pomierzonych rzędnych zwierciadła wody w przekroju wodowskazowym Sławsk dla fali powodziowej z 2010 roku.

Fig. 2. Comparison of the calculated and measured water table elevation in Sławsk gauge station for the flood wave from 2010.

Wartości współczynników korelacji, średniego błęd kwadratowego rzędnych, maksymalnych rzędnych pomierzonych i obliczonych dla omawianych przekrojów wodowskazowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry dopasowania rzędnych zwierciadła wody w wybranych przekrojach
Table 2. The fitting parameters of water level in selected gauge stations

Przekrój wodowskazowy Gauge station	$\overline{\Delta H}$ m	Współczynnik korelacji Correlation coefficient –	Maksymalna rzędna pomierzona Maximum measured water level m n.p.m. – m a.s.l.	Maksymalna rzędna obliczona Maximum calculated water level m n.p.m. – m a.s.l.
Uniejów	0,035	0,9989	105,66	105,66
Koło	0,039	0,9972	92,72	92,69
Sławsk	0,045	0,9969	81,49	81,47
Nowa Wieś Podgórna	0,118	0,9937	73,39	73,37
Poznań	0,116	0,9893	56,04	56,05

Wytarowany model poprawnie opisuje zjawisko transformacji na długości modelowanego odcinka Warty. Wyniki dla półrocza zimowego zaburzone są przez warunek początkowy, którego wpływ dla tak długiego odcinka rzeki wygasa dopiero po 30 dobach

symulacji. W trakcie półrocza zimowego 2010 roku wystąpiły intensywne zjawiska lodowe, stąd też stany wodowskazowe nie odpowiadają występującym przepływowi. Na wykresach jest to dobrze widoczne pomiędzy 80 a 120 dobą symulacji, czyli na przełomie lutego i marca. Okres symulacji od 1 do 120 doby należy traktować jako mocno niepewny, stąd też wyniki dla tego okresu zostały odrzucone przy obliczaniu wartości przedstawionych w tabeli 2. Autorzy dysponowali również kilkunastoma pomiarami bezpośrednimi przepływu dla fali z 2010 roku, które wykorzystano do punktowej weryfikacji modelu. Obliczony błąd względny odwzorowania przepływów nie przekraczał 7%. Zbiór pomiarowy przepływów był jednak zbyt mały dla przeprowadzenia analiz statystycznych na przykład z wykorzystaniem współczynnika efektywności Nasha-Sutcliffea [Moriassi i in. 2007].

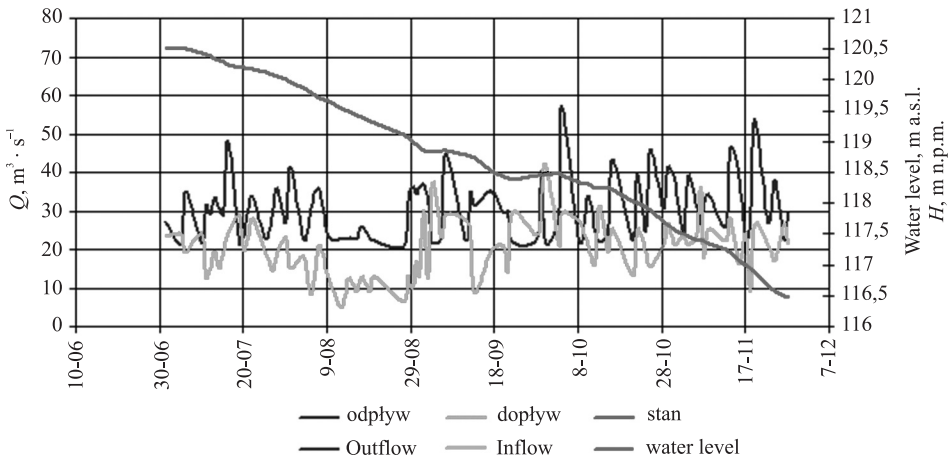
WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Wykorzystując model retencji zbiornika oraz wytarowany model hydrodynamiczny Warty od zapory czołowej do Obornik, przeprowadzono serię symulacji niezbędnych do przeprowadzenia analizy ilościowego wpływu obniżenia NPP. Obliczenia wykonano dla roku suchego 1995, który charakteryzował się najniższymi dopływami do zbiornika w całym okresie jego eksploatacji. Oczywiście jest, że warunki przepływu w korycie Warty uległy zmianie od roku 1995, jednak dane o przepływach z tego okresu odwzorowują realny scenariusz hydrologiczny, który może się powtórzyć i z takim założeniem zostały wykorzystane. Analiza dla pojedynczego roku, z pominięciem charakterystyk statystycznych przepływu, nie daje kompleksowego rozwiązania analizowanego zagadnienia. Niemniej pozwala ona lepiej prześledzić wpływ zmiany określonego parametru dla zaistniałej sytuacji ekstremalnej.

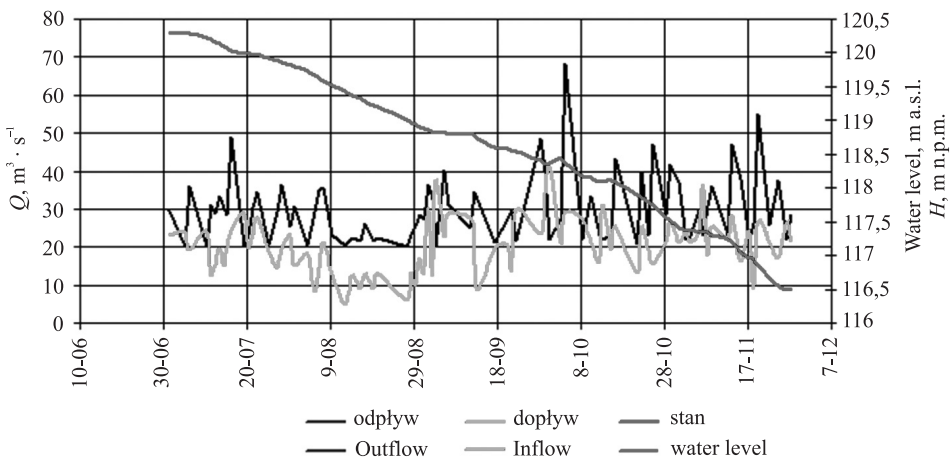
Do analizy przyjęto wariant z aktualną rzędną NPP = 120,00 m n.p.m. oraz rzędną obowiązującą do roku 2013, tj. 120,50 m n.p.m. Dodatkowo wprowadzono warianty pośrednie z rzędnymi 120,20 oraz 120,30 m n.p.m. Jak wspomniano wcześniej, z modelu retencji zbiornika otrzymano hydrogramy zrzutu dla poszczególnych wariantów, które kolejno wprowadzono jako górny warunek brzegowy dla modelu hydrodynamicznego. Hydrogramy dopływu, odpływu i napełnienia zbiornika dla NPP równego 120,50, 120,30 oraz 120,00 m n.p.m. przedstawiono odpowiednio na ryc. 3, 4 oraz 5.

Obliczenia wykonano dla okresu od 01.07.1995 do 27.11.1995, gdzie w trakcie głębokiej niżówki od 09.08 do 29.08 średni dopływ do zbiornika wynosił tylko $11,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co zbliżone jest do wartości przepływu NNQ = $12,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla okresu letniego dla przekroju Sieradz. Wyniki z modelu retencji zbiornika w postaci wartości uśrednionego odpływu i liczby dni zrzutu minimalnego dla przedstawionych wyżej wariantów obliczeń zestawiono w tabeli 3. Przepływ minimalny $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ wynika z potrzeby zapewnienia przepływu nienaruszalnego $14,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz zaspokojenia potrzeb wodnych wynikających z pozwoleń wodnoprawnych w obrębie zbiornika (ok. $3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) i możliwości przerzutu wody na szczytowe stanowisko Kanału Ślesińskiego wody z rzeki Warty w km 406+600 poprzez pompownię Morzysław w ilości $5,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Zrzut minimalny na poziomie $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ gwarantuje również uzupełnienie wody w systemie chłodniczym elektrowni Pątnów i Konin.

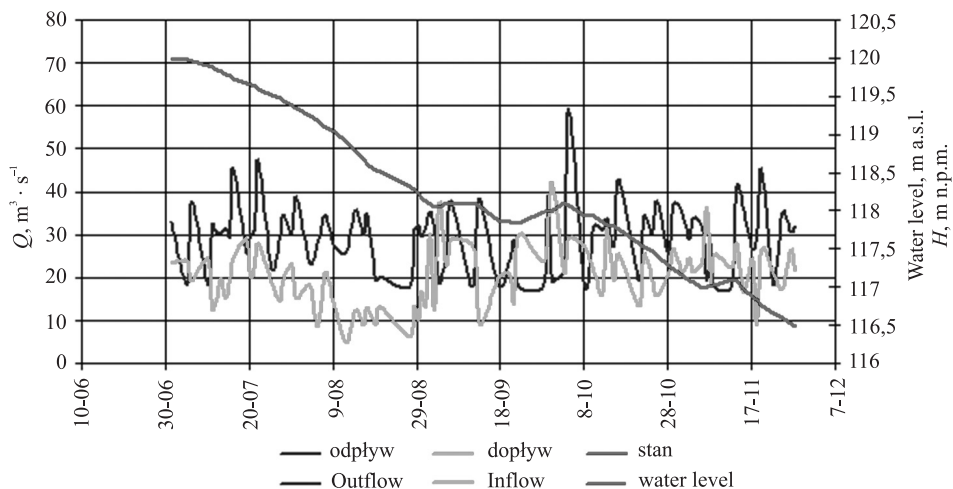
Z analizy wyników symulacji pracy zbiornika przy dopływie minimalnym (tabela 3) wynika, że dla poprzedniej wartości NPP = 120,50 m n.p.m., prowadząc optymalną gospodarkę retencją w zbiorniku, tylko w jednym dniu zrzut ze zbiornika osiągnie minimalną wartość $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast uśredniony odpływ wyniesie $30,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Zmniejszając objętość użytkową zbiornika przy zejściu z wartością NPP do rzędnej 120,00 m n.p.m. dni takich uzyskujemy już 20, a wartość średniego odpływu spadnie do $28,64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Z wariantów pośrednich, nawet podwyższenie pojemności użytkowej przy rzędnej 120,20 m n.p.m. skutkuje minimalnie – uzyskuje się 18 dni zrzutów minimalnych. Natomiast przyjęcie rzędnej 120,30 m n.p.m. pozwala uzyskać tylko 9 takich dni oraz wartość średniego odpływu $29,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Ryc. 3. Hydrogram dopływu, obliczony odpływ wody i napętnienie przy NPP = 120,50 m n.p.m.
Fig. 3. Inflow, outflow and water level timeseries for normal level of damming NPP = 120,50 m a.s.l.



Ryc. 4. Hydrogram dopływu, obliczony odpływ wody i napętnienie przy NPP = 120,30 m n.p.m.
Fig. 4. Inflow, outflow and water level timeseries for normal level of damming NPP = 120,30 a.s.l.



Ryc. 5. Hydrogramy dopływu, obliczonego odpływu i napełnienia przy NPP = 120.00 m n.p.m.
 Fig. 5. Inflow, outflow and water level timeseries for normal level of damming NPP = 120,00 m a.s.l.

Tabela 3. Zestawienie wyników dla przepływów niżówkowych z 1995 roku przy różnych wariantach NPP otrzymanych z matematycznego modelu retencji zbiornika.

Table 3. Summary results for low flows in 1995 for various variants of level of damming received from mathematical model of a reservoir retention.

Pojemność zbiornika Volume	Stan w zbiorniku Water level in the reservoir	Zrzut minimalny Minimum outflow	Uśredniony odpływ Average outflow	Liczba dni zrzutu minimalnego Number of minimum outflow days
V, hm^3	$H, \text{m n.p.m.} - \text{m a.s.l.}$	$Q_{\min}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_s, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	dni - days
142,8	120,00	20,00	28,64	20
150,6	120,20	20,00	29,24	18
154,5	120,30	20,00	29,55	9
162,5	120,50	20,00	30,15	1

Obliczenia modelem hydrodynamicznym umożliwiły wyznaczenie hydrogramów przepływów w poszczególnych przekrojach wodowskazowych na odcinku zbiornik Jeziorsko–Poznań. Analizując hydrogramy wyznaczono liczbę dni występowania przepływu minimalnego w wybranych przekrojach, przy różnych przyjętych rzędnych NPP (tab. 4, 5 i 6).

Z analizy zestawienia przepływów minimalnych wynika, że nawet w warunkach przepływów niżówkowych w żadnym przekroju nie występują przepływy mniejsze od przepływu nienaruszalnego. W przekroju Poznań obliczony przepływ minimalny będzie o ponad $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ większy od przepływu nienaruszalnego. Natomiast różnice w liczbie dni występowania przepływów minimalnych między wariantem NPP = 120,5 m n.p.m. i NPP = 120,00 m n.p.m. są już istotnie wysokie (największa w Poznaniu wynosi 12 dni).

Jeszcze większe różnice występują w przypadku liczby dni poniżej SNQ_L (SNQ z półroczą letniego). Mniejsze różnice występują natomiast dla wariantów przy NPP równym 120,5 oraz 120,3 m n.p.m.

Tabela 4. Przepływy niżówkowe w wybranych przekrojach dla NPP = 120,00 m n.p.m.
Table 4. Low flows in selected gauge stations for level of damming equal to 120,00 a.s.l.

Przekrój wodowskazowy Gauge stations	Przepływ minimalny Minimum flow $Q, m^3 \cdot s^{-1}$	Przepływ nienaruszalny Reserved flow $Q_n, m^3 \cdot s^{-1}$	Liczba dni występowania przepływu minimalnego Days of minimum flow	SNQ_L $m^3 \cdot s^{-1}$	Liczba dni poniżej SNQ_L Days bellow SNQ_L
Uniejów	20,57	12,10	9	24,20	48
Koło	21,45	13,30	2	26,60	42
Sławsk	18,36	13,80	9	27,60	81
Pyzdry	19,14	15,90	9	31,80	124
Poznań	24,96	29,39	14	39,60	148

Tabela 5. Przepływy niżówkowe w wybranych przekrojach dla NPP = 120.30 m n.p.m.
Table 5. Low flows in selected gauge stations for level of damming equal to 120.30 a.s.l.

Przekrój wodowskazowy Gauge stations	Przepływ minimalny Minimum flow $Q, m^3 \cdot s^{-1}$	Przepływ nienaruszalny Reserved flow $Q_n, m^3 \cdot s^{-1}$	Liczba dni występowania przepływu minimalnego Days of minimum flow	SNQ_L $m^3 \cdot s^{-1}$	Liczba dni poniżej SNQ_L Days bellow SNQ_L
Uniejów	20,87	12,10	9	24,20	45
Koło	23,14	13,30	3	26,60	38
Sławsk	18,76	13,80	7	27,60	74
Pyzdry	19,34	15,90	7	31,80	114
Poznań	25,06	29,39	9	39,60	133

Tabela 6. Przepływy niżówkowe w wybranych przekrojach dla NPP = 120.50 m n.p.m.
Table 6. Low flows in selected gauge stations for level of damming equal to 120.50 a.s.l.

Przekrój wodowskazowy Gauge stations	Przepływ minimalny Minimum flow $Q, m^3 \cdot s^{-1}$	Przepływ nienaruszalny Reserved flow $Q_n, m^3 \cdot s^{-1}$	Liczba dni występowania przepływu minimalnego Days of minimum flow	SNQ_L $m^3 \cdot s^{-1}$	Liczba dni poniżej SNQ_L Days bellow SNQ_L
Uniejów	20,50	12,10	4	24,20	23
Koło	22,00	13,30	3	26,60	33
Sławsk	16,91	13,80	5	27,60	73
Pyzdry	20,92	15,90	4	31,80	110
Poznań	24,15	29,39	2	39,60	94

Przeanalizowano również wpływ zmniejszenia objętości użytkowej zbiornika na możliwości alimentowania w warunkach głębokiej niżówki. W obliczeniach utrzymano zrzut na poziomie $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a dopływ do zbiornika przyjęto ok. $11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dopływ taki pojawił się w okresie od 09.08.1995 do 29.08.1995). Oznacza to konieczność uzupełnienia zrztu wielkością ok. $9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W zakresie rzędnych od 120,50 m n.p.m. do 120,00 m n.p.m. zbiornik jest w stanie uzupełnić niedobory wody przez 25 dni. W przypadku rzędnej $NPP = 120,30$ m n.p.m. objętość wody w warstwie 30 cm pozwoli na alimentację rzeki przez 15 dni.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy analizy zmian NPP na zbiorniku Jeziorsko wskazują na ich istotne znaczenie dla okresów niżówkowych. Warto zaznaczyć, że funkcja zbiornika dotycząca alimentowania cieków zawiera kilka ważnych punktów dotyczących utrzymania przepływu minimalnego, który jest niezbędny do prawidłowego funkcjonowania systemu rzeczno-jeziorskiego. Mniejsza alimentacja rzeki poniżej zapory czołowej skutkuje przede wszystkim większą liczbą dni występowania przepływów minimalnych oraz znacząco większą przepływow niższych niż SNQ dla półrocza letniego. Liczby te zwiększają się wraz z odległością przekroju kontrolnego od zbiornika. Dla Poznania okres z przepływami poniżej SNQ wydłuża się o blisko dwa miesiące.

W okresie niżówek istotne jest zagwarantowanie głębokości tranzytowych umożliwiających żeglugę na Warcie (od Konina aż do ujścia do Odry). Warta na odcinku od km 252,00 do km 406,60 zaliczona jest do kl. Ia drogi wodnej. Koryto rzeki jest uregulowane, a szlak żeglowny oznakowany znakami brzegowymi. Głębokość tranzytowa dla wspomnianego odcinka wynosi 0,50 m przy SNW i 1,1 m przy SW , co przekłada się naturalnie na odpowiednie wielkości przepływów. Z analizy tabel 4, 5 i 6 wynika, że w przypadku głębokich niżówek należy liczyć się z problemami żeglugowymi nawet dla NPP na poziomie 120,5 m n.p.m. Obniżenie piętrzenia na zbiorniku Jeziorsko do rzędnej 120,00 m n.p.m. i zmniejszenie pojemności użytkowej zbiornika tę sytuację niestety jeszcze pogorszy.

Ważnym aspektem jest również czynnik środowiskowy, gdyż wydłużony został okres występowania stanów niskich i bardzo niskich, tym samym zwiększając możliwość degradacji terenów wymagających zalewania lub utrzymania wysokiej wilgotności. Nawet grunty użytkowane rolniczo zlokalizowane na terenach zalewowych mogą zostać przesuszone, co wpłynie na ich produktywność. W przypadku zbiornika wielofunkcyjnego, którym jest zbiornik Jeziorsko należy brać pod uwagę wszystkie aspekty jego oddziaływania. Dominująca dla administratora zbiornika wydaje się tutaj funkcja przeciwpowodziowa, jednak utrzymywanie dużej rezerwy przeciwpowodziowej wpływa negatywnie na gospodarowanie zasobami zbiornika w okresach suszy, a te w ostatnich latach występują częściej niż powódzie czy wysokie wezbrania.

PIŚMIENNICTWO

- Acreman, M.C., Dunbar, M.J. (2004). Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8, 861–876.
- Bayazit, M., Ünal, N.E. (1990). Effects of hedging on reservoir performance, *Water Resour. Res.*, 26(4), 713–719.
- Bower, B.T., Hufschmidt, M.M., Reedy, W.W. (1962). Operating procedures: Their role in the design of water-resources systems by simulation analyses. [W:] *Design of water-resource systems*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 443–456.
- Byczkowski, A. (1996). *Hydrologia*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa
- Cancelliere, A., Ancarani, A., Rossi, G. (1998): Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions, *J. Hydrologic Engin.*, 3(2), 140–148.
- Choi, C., Mantilla, R. (2015). Development and Analysis of GIS Tools for the Automatic Implementation of 1D Hydraulic Models Coupled with Distributed Hydrological Models. *J. Hydrol. Engin.*, 20(12), no. 06015005.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman, Boston.
- de Saint-Venant, A. (1871). Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 73, 147–154.
- Hämmerling, M., Walczak, N., Szałkiewicz, E. (2015). Wykorzystanie modelu matematycznego SSIIM do analizy rozkładów prędkości: zbiornik jezioro na rzece Warcie. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14(2), 81–92.
- Huang, C., Zhao, J., Wang, Z., Shang, W. (2016). Optimal Hedging Rules for Two-Objective Reservoir Operation: Balancing Water Supply and Environmental Flow. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 142(12).
- Hydroprojekt Poznań (2014). Zbiornik wodny „Jezioro”. Instrukcja gospodarowania wodą. BSiPBW Hydroprojekt Poznań. Opracowanie na zlecenie RZGW Poznań. Aktualizacja 2014.
- IMGW (2008). *Badania zmian pojemności. Zbiornik Jezioro. Opracowanie na zlecenie RZGW Poznań*. IMGW, Warszawa.
- Kaluża, T., Laks, I. (2012). The Jezioro Reservoir and its Operation under Flood Conditions in 2010. *Technische Universität Dresden. Wasser Bauliche Mitteilungen*, 47, 23–36.
- Kasperek, R., Wiatkowski, M. (2014). Hydropower Generation on the Nysa Klodzka River. *Ecol. Chemis. Engin.*, 21(2), 327–336.
- Kiczko, A., Romanowicz, J.R., Osuch, M. (2011). Impact of water management policy on flow conditions in wetland areas. *Phys. Chemis. Earth, Parts A/B/C*, 36(13), 638–645.
- Król, K., Bedla, D., Stachura, T. (2014). Zastosowanie aplikacji internetowej do prezentacji charakterystyki wybranych zbiorników wodnych i ich zlewni. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 13(4), 315–326.
- Labadie, J.W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 130(2), 93–111.
- Laks, I. (2008). Modelling of River Network with Widespread Floodplain Valleys. *Puls. Inst. Geophys. Pol.-Acad. S.C.*, E-10 (406), s. 83-89.
- Laks, I. (2017). Wpływ retencji polderu Golina na transformację fali powodziowej z 2010 r. *Gosp. Wodna*, 2.
- Laks, I. (2009). Wybrane aspekty numerycznego modelowania długich odcinków rzek nizinnych. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, 59, t. 2, Lublin, 81–90.
- Laks, I., Kaluża, T., Sojka, M., Wróżyński, R. (2013). Problems with Modelling Water Distribution in Open Channels with Hydraulic Engineering Structures. *Rocz. Ochrona Środ.*, 15, Part 1, 245–257

- Laks, I., Kałuża, T. (2012). Modelowanie nieustalonych przepływów w rzekach nizinnych na przykładzie Warty. Monografia Uniwersytetu Przyrodniczego, Poznań.
- Laks, I., Sojka, M., Walczak, Z., Wróżyński, R. (2017). Possibilities of Using Low Quality Digital Elevation Models of Floodplains in Hydraulic Numerical Models. *Water*, 9(4), 283.
- Lund, J.R., Reed, R. (1995). Drought water rationing and transferable rations. *J. Water Resour. Plann. Manag.* 121(6), 429–437.
- Mazur, R., Kałuża, T., Chmista, J., Walczak, N., Laks, I., Strzebiński, P. (2015). Influence of deposition of fine plant debris in river floodplain shrubs on flood flow conditions – The Warta River case study. *Phys. Chemist. Earth*, 94, 106–113.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Piotrowski, A., Napiórkowski, J., Kiczko, A. (2012). Differential evolution algorithm with separated groups for multi-dimensional optimization problems. *Europ. J. Operat. Res.*, 216, 33–46.
- Preissmann, A. (1961): Propagation of translatory waves in channels and rivers. *Proc. 1st Congress of French Association for Computation, AFCAL*, Grenoble, France, 433–442.
- Przybyła, Cz., Kałuża, T., Laks, I., Wierzbicki, M., Kuźniar, P. (2011). Ekspertyza: Analiza wpływu obniżenia, na zbiorniku Jeziorsko, normalnego poziomu piętrzenia (NPP) na kształtowanie zasobów wodnych w zakresie przepływów niskich i wysokich (na podstawie analizy charakterystycznych lat suchych i mokrych). Opracowanie na zlecenie RZGW Poznań. Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań.
- Romanowicz, J.R., Kiczko, A., Napiórkowski, J. (2010). Stochastic transfer function model applied to combined reservoir management and flow routing. *Hydrol. Sci. J.*, 55, 27–40.
- Romanowicz, J.R., Osuch, M. (2011). Assessment of land use and water management induced changes in flow regime of the Upper Narew. *Phys. Chemist. Earth, Parts A/B/C*, 36(13), 662–672.
- Shih, J.S., ReVelle, C. (1994). Water supply operations during drought: Continuous hedging rule. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 120(5), 613–629.
- Tarnowski, W. (2011): Optymalizacja i polioptymalizacja w technice. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Walczak, Z., Sojka, M., Wróżyński, R., Laks, I. (2013). Assessment of Mapping of Embankments and Control Structure on Digital Elevation Model Based upon Majdany Polder. *Rocz. Ochrona Środ.*, 15, Part 3, 2711–2724.
- Walczak, Z., Sojka, M., Wróżyński, R., Laks, I. (2016). Estimation of Polder Retention Capacity Based on ASTER, SRTM and LIDAR DEMs: The Case of Majdany Polder (West Poland). *Water*, 8(6), 230.
- Wosiewicz, B.J., Laks, I., Sroka, Z. (1996). Computer system of flow simulation for the Warta river. *Proc. 6th Int. Conf. „Problems of Hydroengineering”*, Wrocław – Szklarska Poręba. *Prace Nauk. Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, Konf. 38, 143–156.
- Wosiewicz, B.J., Laks, I., Sroka, Z. (2013). Dwadzieścia lat systemu analizy i prognozowania nieustalonych przepływów w rzekach nizinnych SPRuNeR. *Gosp. Wodna*, 10, 373–385.

IMPACT OF DECREASING THE NORMAL DAMMING LEVEL OF THE JEZIORSKO RESERVOIR ON LOW FLOWS IN THE WARTA RIVER

Abstract. An analysis of the impact of increasing the flood retention of the Jeziorsko reservoir on the low flows in the Warta section below the reservoir has been presented in the paper. Increase in the flood retention approx. 20 million m³ was achieved by changing the normal damming level (NPP) with the elevation of 120.50 m a.s.l. to the elevation of 120.00 m a.s.l. Multi-functional Jeziorsko reservoir, which is not only an important

part of flood protection system but also performs the functions of supplementation in periods of low and very low flows in the Warta river. Lowering the NPP reduced the volume dedicated to supply the Warta river below the dam leading undermining the ability of increasing the flows in a low flow periods. The analysis was performed using one-dimensional numerical model of unsteady flow for the section of the Warta from the Jeziorsko reservoir to Oborniki. Hydrographs of discharge from the the Jeziorsko reservoir were determined using a numerical optimization model. The obtained results showed a significant effect of the reduction of NPP on the low flows in the Warta section below the reservoir. Both the number of days with outflow rate equal to reserved flow and number of days with flow lower than medium low flow (*SNQ*) were increased.

Key words: multi-functional reservoir, optimization model of retention management, numerical unsteady flow model

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 2.06.2017

Do cytowań – For citation: Kaluża, T., Sroka, Z., Lewandowska, J. (2017). Wpływ obniżenia normalnego poziomu piętrzenia zbiornika Jeziorsko na przepływy niżówkowe na rzece Warcie. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(2), 107–122.