



Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej

mgr inż. Błażej Waligórski

**Ocena funkcjonowania zbiornika zaporowego w pierwszych latach eksploatacji
na przykładzie obiektu Przebędowo**

Assessment of the functioning of the dam reservoir in the first years of operation
on the example of the Przebędowo facility

Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych
w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Doctoral thesis in engineering and technology sciences
in the environmental engineering, mining and energy discipline

Promotor:

dr hab. inż. Mariusz Korytowski

Katedra Melioracji, Kształtowania Środowiska
i Gospodarki Przestrzennej

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Poznań, 2024 rok

Podziękowania

Prezentowana rozprawa doktorska została przygotowana pod opieką Pana dr hab. inż. Mariusza Korytowskiego, któremu dziękuję za okazaną pomoc, wskazywanie fachowej literatury, cenne uwagi i sugestie, które wpłynęły na ostateczny kształt tej pracy, dziękuję za życzliwość, cierpliwość i zaangażowanie okazane mi podczas kilkuletniej opieki naukowej.

Pragnę też podziękować wszystkim Pracownikom Katedry Melioracji, Kształtowania Środowiska i Gospodarki Przestrzennej za okazaną życzliwość.

Dziękuję Dyrektorowi Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Poznaniu za wielkie wsparcie w prowadzeniu badań oraz liczne merytoryczne rozmowy i okazane mi zaufanie.

W szczególny sposób pragnę podziękować mojej Żonie Natalii za cierpliwość, wyrozumiałość oraz wspieranie mnie w trudnych chwilach.

Dziękuję również moim Rodzicom za to, że zawsze we mnie wierzyli.

Wykaz prac naukowych wchodzących w skład cyklu

Na podstawie art. 186, ust. 1 pkt 5 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z póź. zm.), § 6 pkt. 2 załącznika do Uchwały nr 365/2019 Senatu Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu z dnia 18 września 2019 r. w sprawie zasad postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu oraz zgodnie z Uchwałą nr 3/21/2021 z dnia 16 grudnia 2021 roku Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu w sprawie szczegółowych kryteriów przygotowania rozprawy doktorskiej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka w Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu, niniejszą rozprawę doktorską stanowi zbiór trzech artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych powiązanych tematycznie:

P1. Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. 2019. Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 21, s.: 767-788.

40 pkt; IF=0,899

P2. Waligórski B., Korytowski M., Zydrón A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. 2020. The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, s.: 324-346.

40 pkt; IF=0,804

P3. Waligórski B., Janicka E., 2021. The Influence of the Przebędowo Reservoir on the Water Quality of the Trojanka River in the First Years of its Functioning. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 23, s.:151-167. <http://dx.doi.org/10.54740/ros.2021.010>

40 pkt; IF=0,734

Łączna liczba **IF** wynosi **2,437**, a suma punktów wg listy MEiN wynosi **120 pkt**.

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract.....	8
1. Wprowadzenie	9
1.1. Problematyka poruszana w ramach pracy doktorskiej	9
1.2. Innowacyjność pracy.....	14
1.3. Znaczenie pracy dla rozwoju dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz możliwość zastosowania uzyskanych rezultatów w sferze gospodarczej	15
2. Cel nadrzędny pracy, cele szczegółowe, zakres pracy oraz hipotezy badawcze	17
3. Obszar badań	19
4. Metody badań.....	23
5. Wyniki oraz dyskusja.....	31
5.1. Ocena wzajemnych powiązań pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiorniku, a wodami gruntowymi w terenach przyległych.....	31
5.2. Charakterystyka czynników determinujących bilans wodny zbiornika.	37
5.3. Wpływ funkcjonowania zbiornika na jakość wody w rzece Trojanka.	42
6. Wnioski oraz podsumowanie	49
7. Literatura	51
8. Kopie opublikowanych prac wchodzących w skład rozprawy	64
8.1. Publikacja #1	64
8.2. Publikacja #2	86
8.3. Publikacja #3	109
9. Oświadczenia kandydata oraz współautorów.....	126

Streszczenie

Niekorzystne, na najbliższe dekady, prognozy dotyczące zmian klimatu determinują, zarówno w sektorze przemysłu jak i rolnictwa, realizację szeregu działań mających na celu łagodzenie skutków, coraz częściej obserwowanych, zjawisk ekstremalnych takich jak powódzie i susze. Jedną z metod przeciwdziałania tym niekorzystnym zjawiskom jest budowa zbiorników retencyjnych, w tym również zaporowych, w dużej mierze stanowiących o dyspozycyjnych zasobach wód powierzchniowych i przyczyniających się do poprawy bilansu wodnego określonego regionu. Dlatego też problematyka związana z realizacją i funkcjonowaniem tego typu obiektów jest zagadnieniem niezwykle istotnym.

Celem niniejszej pracy była ocena funkcjonowania zbiornika zaporowego Przebędowo, w pierwszych latach eksploatacji, w zróżnicowanych warunkach meteorologicznych. Badania terenowe obejmujące pomiary stanów wód w zbiorniku, stanów wód gruntowych w terenach przyległych, pomiary przepływów na dopływie oraz odpływie ze zbiornika oraz pobór próbek wody w kontekście określenia parametrów determinujących jakość, zrealizowano w latach 2015 - 2018.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki potwierdziły, że poza czynnikami meteorologicznymi duży wpływ na kształtowanie się stanów wody w zbiorniku miał również, związany ze sposobem eksploatacji zbiornika, czynnik antropogeniczny. Badania wykazały także, że pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiorniku a wodami gruntowymi w terenach przyległych istnieją silne powiązania.

Analiza składowych determinujących bilans wodny zbiornika Przebędowo pozwoliła wykazać, że największy udział w bilansie miały parametry związane z poziomą wymianą wody takie jak dopływ do zbiornika oraz odpływ. Natomiast nie stwierdzono w bilansie wodnym znacznego udziału czynników związanych z wymianą pionową wody, charakterystycznego dla zbiorników bezodpływowych (opady atmosferyczne, parowanie z powierzchni zbiornika).

Przeprowadzone badania dotyczące parametrów charakteryzujących jakość wody, szczególnie w odniesieniu do średnich wartości parametrów fizykochemicznych wykazały, że wody rzeki Trojanki zarówno na dopływie do zbiornika jak i na odpływie sklasyfikowano do stanu ekologicznego poniżej dobrego. Należy jednak podkreślić, że uzyskane wyniki badań wykazały pozytywny wpływ zbiornika Przebędowo w odniesieniu do kształtowania się warunków tlenowych oraz zmniejszenia stężenia azotanów na odpływie.

Słowa kluczowe:

Zbiorniki zaporowe, wody gruntowe, bilans wodny, jakość wody

Abstract

Unfavourable forecasts of climate changes for the coming decades determine, both in the industrial and agricultural sectors, the implementation of a number of measures aimed at mitigating the effects of increasingly observed extreme phenomena such as flood and drought. One of the methods of counteracting these adverse phenomena is the construction of retention reservoirs, including dam reservoirs, which to a large extent constitute the available water resources and contribute to the improvement of the water balance of a specified region. Therefore, the issues related to the implementation and operation of this type of facilities are an extremely important issue.

The aim of this study was to assess the functioning of the Przebędowo reservoir in the early years of operation, in various meteorological conditions. Field surveys including measurements of water levels in the reservoir, groundwater levels in adjacent areas, water discharge measurements of reservoir inflow and outflow and water sampling in the context of parameters determining quality, were carried out in 2015-2018.

The conducted research and the obtained results confirmed that, in addition to meteorological factors, the anthropogenic factor related to the reservoir operation also had a large impact on water levels in the reservoir. The research also showed that there is a relationship between water retained in the reservoir and groundwater in the adjacent areas.

The analysis of the components determining the water balance of the Przebędowo reservoir allowed to show that parameters related to horizontal water exchange, such as the reservoir inflow and outflow had the largest share in the water balance. On the other hand, any significant input of factors related to vertical water exchange, characteristic for septic tanks (precipitation, evaporation from the surface of the reservoir), wasn't found in the water balance.

The conducted research of the parameters characterizing the quality of water, especially in relation to the average values of physicochemical parameters, showed that the waters of the Trojanka River, both at the reservoir inflow and outflow, were classified under good ecological status. It should be emphasized, however, that the results of the research showed a positive impact of the Przebędowo reservoir in relation to the formation of aerobic conditions and the reduction of nitrate concentration at the outflow.

Keywords:

dammed reservoirs, groundwater, water balances, water quality

1. Wprowadzenie

1.1. Problematyka poruszana w ramach pracy doktorskiej

Polska pod względem zasobów wodnych należy do krajów najuboższych w Europie (Mioduszewski, Pierzgański 2009), dlatego też racjonalne gospodarowanie tymi zasobami, zwłaszcza w kontekście występowania okresów z niedoborami opadów, jest w ostatnich dekadach na obszarze naszego kraju priorytetem.

Występujące zjawiska ekstremalne, zwłaszcza susze, bardzo często są przyczyną zakłócenia naturalnego bilansu wodnego (Charakterystyka...2017). Współczesny problem globalny jakim jest ocieplenie klimatu, które w Polsce w drugiej połowie XX wieku wyrażało się wzrostem temperatury o blisko 1 °C, zwiększa zagrożenie związane z częstotliwością występowania deficytów wody (Kundzewicz i in. 2010, Wibig 2012, Jasińska 2021). Postępujące zmiany klimatyczne, a także niekorzystne, na najbliższe dekady prognozy, w znacznym stopniu mogą determinować dalsze pogłębianie się tych deficytów. Zmiany klimatu, coraz częściej uznawane są za poważny problem, mają znaczący wpływ na jakość i ilość zasobów wodnych (Shukla i in. 2020; Tran i in. 2021a; 2021b; Hussain i in. 2022). Globalny wzrost temperatury powietrza w ogólnym ujęciu często przyczynia się do występowania z coraz większym nasileniem zjawisk ekstremalnych jakimi są długotrwałe okresy bezopadowe lub krótkotrwałe deszcze nawalne, często przyczyniające się do wywołania powodzi. Niezwykle istotną rolę w kształtowaniu gospodarki wodnej, szczególnie w kontekście łagodzenia negatywnych skutków wynikających z niedoborów lub nadmiarów wody, zarówno w sektorze rolnictwa, leśnictwa, czy energetyki odgrywają zbiorniki zaporowe. Jak podaje Świątek (2022) budowa zbiorników retencyjnych, w szczególności zaporowych oraz budowli hydrotechnicznych umożliwia między innymi regulację przepływów rzecznych. Tego typu obiekty również poprzez pozytywne oddziaływanie na wody gruntowe terenów przyległych, przyczyniają się do poprawy bilansu wodnego i jednocześnie mogą minimalizować skutki powodzi. Zjawisko powodzi powoduje zamulanie, niszczenie infrastruktury oraz roślinności, a także powoduje pośrednio skażenia wód powierzchniowych i gleby bakteriami chorobotwórczymi i pasożytami. Powyższe niekorzystne aspekty tych zjawisk w dużej mierze implikują konieczność realizacji nowych zbiorników retencyjnych i odpowiedniej eksploatacji już istniejących.

Jak podaje Sala (2017) duże zbiorniki retencyjne mają również znaczenie społeczne, polegające między innymi na produkcji energii elektrycznej bez konieczności spalania

kopalnych nośników energetycznych takich jak węgiel, gaz czy ropa, które są znacznym obciążeniem dla atmosfery. Zdaniem tego Autora proekologicznym więc rozwiązaniem, gdzie nie ma tego rodzaju dylematów dla środowiska jest wykorzystywanie wody do produkcji energii elektrycznej.

Według Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie (2022) całkowita ilość zmagazynowanej wody w istniejących zbiornikach retencyjnych w Polsce wynosi 4 mld m³, co stanowi nieco ponad 6,5% objętości średniorocznego odpływu rzeczno-egzogenicznego. Większość wód jest retencjonowana w zbiornikach o pojemności powyżej 3 mln m³.

Jak podają Małecki i Pokładek (2010), mając na uwadze charakter zbiorników retencyjnych, można wyróżnić trzy typy:

- zbiorniki zaporowe, których zadaniem jest magazynowanie nadmiaru wody w kontekście późniejszego wykorzystania w okresach posusznych (Solina, Rożnów, Jeziersko, Goczałkowice). Umożliwiają one służbom gospodarki wodnej wpływać na wyrównywanie losowych rozkładów i stanów wód w rzekach. Specyficznym rodzajem tego typu obiektów są zbiorniki wyrównawcze. Funkcjonują one jako zbiorniki pomocnicze przy dużych zbiornikach retencyjnych, a ich rolą jest między innymi produkcja energii w szczycie zapotrzebowania,
- zbiorniki przepływowe, które powstają w wyniku przegrodzenia rzek jazami. Ich zadaniem jest utrzymanie stałego poziomu piętrzenia wody, nie mają one zdolności retencyjnych (objętości użytkowej),
- zbiorniki suche, określane są mianem jednozadaniowych, to inaczej zbiorniki przeciwpowodziowe, których zadaniem jest okresowe magazynowanie wód podczas przechodzenia fal powodziowych.

Natomiast ze względu na lokalizację zbiorników retencyjnych względem cieku można wyróżnić zbiorniki zaporowe, które są usytuowane w kontinuum rzeczno-egzogenicznym i powstają zazwyczaj poprzez spiętrzenie wód budowlą hydrotechniczną oraz zbiorniki lateralne zlokalizowane poza ciekami, ale w bezpośrednim jego sąsiedztwie (Król i in. 2010; Przybyła i Kozdrój 2013).

Zbiorniki zaporowe są wpisane w środowisko geograficzne i często w znacznym stopniu podnoszą również atrakcyjność turystyczną danego obszaru. Tego typu obiekty odgrywają również niezwykle istotną rolę w aspekcie ekonomicznym, gdyż są ważnym elementem infrastruktury przemysłowej i niezbędnym źródłem wody dla miast oraz osiedli (Wicher 2004). Według Moniewskiego (2015) w ogólnym ujęciu zbiorniki wodne bez względu na charakter w odmienny sposób regulują obieg wody w zlewni, niemniej dzięki ich obecności zwiększa się jej zdolność retencyjna, maleje zaś dynamika przepływów i skutki występowania dużych

wezbrań. Zretencjonowana w tego typu zbiornikach woda często bywa również wykorzystywana do nawodnień na obszarach użytkowanych rolniczo.

Niezwykle ważną rolą zbiorników retencyjnych, w tym również zaporowych, jest oddziaływanie wód retencjonowanych w takich zbiornikach na wody gruntowe terenów przyległych. Jak podają Bajkiewicz-Grabowska (2007) oraz Michalska i in. (2009) stabilizują one położenie zwierciadła wód gruntowych, zwiększając drenaż poziomów wodonośnych lub podnosząc zwierciadło wód podziemnych w dolinie ciekłu. Należy jednak podkreślić, że funkcjonowanie zbiorników zaporowych wiąże się często z ich zarówno drenującym, jak i alimentacyjnym charakterem. Jak podają Głowski i Parzonka (2007) oraz Gurwin (2010) tego typu zbiorniki w swojej początkowej części zazwyczaj oddziałują drenująco na wody gruntowe terenów przyległych, a im bliżej zapory kierunek przepływu wód ulega zmianie i wody retencjonowane w danym zbiorniku zasilają wody gruntowe. W szczegółowej ocenie oddziaływania zbiorników zaporowych na reżim wód gruntowych terenów przyległych niezwykle ważna jest również charakterystyka zmian stanów wody w samym zbiorniku oraz czynniki związane z tak zwaną poziomą wymianą wody (dopływ i odpływ). Analiza zmian stanów wody w zbiornikach będących wyznacznikiem zmian retencji oraz badania dotyczące dopływów i odpływów często stanowią podstawę do kompleksowej charakterystyki funkcjonowania danego obiektu również w kontekście oceny jego bilansu wodnego. Według Baścika (2006), Radzkiej (2014) oraz Dembka i in. (2016) charakterystyka bilansu wodnego, z wyszczególnieniem przychodów oraz rozchodów, bezpośrednio w odniesieniu do zbiornika lub jego zlewni, w dużej mierze może stanowić podstawę optymalnego gospodarowania zasobami wodnymi w danym regionie. Jak podaje Mikulski (1970) najkorzystniejszym rozwiązaniem przy obliczeniach bilansu wodnego jezior i zbiorników wodnych jest stosowanie równań bilansowych, których poszczególne składowe obliczane są niezależnie. Jednak zdaniem wielu Autorów duża ilość elementów bilansowych oraz trudność ich praktycznego wyznaczenia w terenie, a także ograniczony zakres danych pochodzących z istniejącej sieci posterunków osłony hydrologiczno-meteorologicznej jezior i zbiorników, skłania do odstąpienia od zasady niezależnego określania poszczególnych elementów bilansu wodnego i pośredniego oszacowania najtrudniejszego do oceny (np. dopływ podziemny lub odpływ) jako dopełnienie do równania bilansowego. Pozostałe składowe bilansu wodnego takie jak: dopływ i odpływ powierzchniowy, parowanie, opady, retencja zbiornikowa (początkowa i końcowa) są możliwe do określenia na podstawie bezpośrednich pomiarów hydrologicznych, meteorologicznych i limnometrycznych, bądź z zastosowaniem wielu ogólnych lub regionalnych wzorów empirycznych (Gutry-Korycka i Bajkiewicz-Grabowska 1981; Okulanis

1993, Rzętała 2008). Jednak, jak podaje Choiński (1995) pod koniec ubiegłego wieku, w związku z trudnościami bilansowania wód jeziornych, niewiele było opracowań szczegółowo charakteryzujących tego typu zagadnienia.

W charakterystyce zbiorników zaporowych i ocenie ich funkcjonowania ważnym zagadnieniem jest również rola, jaką dany obiekt odgrywa w kształtowaniu się parametrów decydujących o jakości wody w rzece poniżej budowli piętrzącej. Często parametry decydujące o jakości wody ulegają na odpływie ze zbiornika znacznym zmianom, nie zawsze jednak stanowią one o poprawie jakości wody w danym cieku (Friedl i Wuest 2002; Kunz i in. 2011). Wpływ określonego zbiornika na parametry decydujące o jakości wody, zależy od wielu czynników, z których przede wszystkim wymienić należy: objętość magazynowanej wody, czas jej retencjonowania, głębokość zbiornika, a także strukturę użytkowania terenów w jego zlewni bezpośredniej (Pawełek i Grenda 2011). Skład chemiczny wody retencjonowanej w danym zbiorniku i jej parametry fizykochemiczne są jednym z głównych wyznaczników wskazujących na optymalne funkcjonowanie ekosystemów rzecznych lub sygnalizują na potrzebę wprowadzenia działań związanych z przywróceniem równowagi takich ekosystemów. Jak podają Hem (1985) oraz Wiejaczka i in. (2017) skład chemiczny wody jest efektem naturalnych procesów rozpuszczania związków pochodzących z różnych źródeł m.in. gazów i aerozoli z atmosfery, wietrzenia i erozji, ale również w dużej mierze związany jest działalnością antropogeniczną. Według Galickiej i in. (2007) oraz Wiatkowskiego (2010) po spiętrzeniu wody w zbiorniku dochodzi do sedymentacji i zatrzymania nawet do 90% mineralnych i organicznych cząstek, które występują w wodzie dopływającej do akwenu. Zdaniem tych Autorów są to zagadnienia bardzo złożone i nie można bezwzględnie określić, czy zbiorniki poprawiają, czy niestety pogarszają jakość wody. Wiatkowski (2008, 2010) w badaniach przeprowadzonych w latach 2006-2008 na zbiorniku Psurów podkreślał znaczną redukcję fosforanów, azotanów (V), azotanów (III) i amoniaku w wodach rzeki Proсны, poniżej budowli piętrzącej.

W ocenie funkcjonowania zbiorników zaporowych oraz ich wpływu na jakość wody w cieku, poniżej piętrzenia, niezwykle istotną rolę odgrywa również termika obiektu. Błachuta i in. (2011) podają, że zależnie od głębokości i lokalizacji wypływu wody, zbiorniki mogą latem obniżać temperaturę wody w odniesieniu do zbiorników głębokich o długim czasie retencji, w których to występuje stratyfikacja a wypływ wody jest poniżej termokliny, lub ją podwyższać i to dotyczy zbiorników płytkich o krótkim czasie retencji. Woda, która opuszcza głębokie zbiorniki z wypływem poniżej termokliny, na krótkim odcinku poniżej zapory ma małe stężenie tlenu. Według tych Autorów, niektóre zbiorniki zaporowe, które retencjonują wodę o złej

jakości, w szczególności zawierające duże ilości biogenów (azot, fosfor), wprowadzają do rzeki poniżej zbiornika zanieczyszczenia biologiczne w postaci fitoplanktonu często powodując jej zakwity, a także nadając wodzie charakterystyczne zabarwienie i powodując silne jej zmętnienie.

Według Kaszy (2009) oraz Szczykowskiej i in. (2013) lokalizacja zbiorników retencyjnych w zlewniach charakteryzujących się rolniczym sposobem użytkowania, często skutkuje procesem wzbogacania w pierwiastki biofilne, co w kontekście ich prawidłowego funkcjonowania i eksploatacji jest zjawiskiem niepożądanym, a im mniejszy zbiornik, tym większe jest obciążenie substancjami pochodzącymi ze zlewni. Nawet przy gospodarce prowadzonej zgodnie z dobrą praktyką rolniczą, część związków wprowadzanych do gleby jest wymywana przez wody opadowe i przedostaje się do wód powierzchniowych. Według Szczykowskiej i Siemieniuk (2011) pewnym rozwiązaniem łagodzącym te niekorzystne procesy jest lokalizacja przed głównym zbiornikiem, płytkich zbiorników tak zwanych wstępnych, porośniętych roślinnością, pełniących rolę swoistych biofiltrów.

Jak podają Traczewska (2012) oraz Majewski (2022) eksploatacja zbiorników zaporowych w pierwszych latach niesie za sobą również wiele problemów związanych z procesami erozyjnymi. Według tych Autorów, wybudowanie zapory na cieku powoduje wzmocnienie erozji liniowej oraz eworsji poniżej obiektu piętrzącego, co skutkuje podmywaniem fundamentów i zagrożeniem jej stateczności. Silny spływ wody poniżej budowli powoduje erozję boczną niszczącą brzegi doliny, co w konsekwencji prowadzi do obrywów, osuwisk i innych zjawisk geodynamicznych.

Według Kanownika i in. (2011) w warunkach gromadzenia wód powierzchniowych w zbiornikach retencyjnych w celu gospodarczego lub rekreacyjnego wykorzystania, konieczne są badania monitoringowe zarówno w aspekcie hydrologicznym jak i ekologicznym. Prowadzenie i kontynuacja badań dotyczących funkcjonowania istniejących już zbiorników zaporowych w naszym kraju jest niezwykle ważnym zagadnieniem w kontekście oceny oddziaływania danego obiektu na reżim rzeczny, a także na gospodarkę wodną terenów przyległych. Działania takie są również bardzo istotne w aspekcie projektowania i realizacji nowych obiektów, które w sposób optymalny mogłyby kształtować gospodarkę wodną określonego obszaru. Nie bez znaczenia, w kontekście prowadzenia tego typu badań, pozostaje także fakt, iż w zatwierdzonym na lata 2021-2027 Programie przeciwdziałania niedoborowi wody (PPNW, nazywanym też Programem rozwoju retencji) z perspektywą do roku 2030, w latach od 2027 do 2030 przewidziano do realizacji największe inwestycje hydrotechniczne na obszarze naszego kraju.

1.2. Innowacyjność pracy

W opublikowanych do tej pory pracach związanych z funkcjonowaniem zbiorników zaporowych, których wody zgodnie z Ramową Dyrektywą Wodną (RDW, Dyrektywa 2000/60/WE) należy traktować jako wody odcinków silnie przekształconych rzek, uwaga naukowców koncentrowała się w większym stopniu na problematyce dotyczącej wpływu danego obiektu na parametry związane z chemizmem wód, a także z jego potencjałem ekologicznym (Żelaziński i Wawręty 2007, Jöhnk i in. 2008, Mazurek i in. 2022, Kuczyński i in. 2022). Podejmowano również szereg badań dotyczących stanu technicznego zbiorników, o dłuższym czasie funkcjonowania, w kontekście postępujących z mniejszym lub większym nasileniem procesów erozyjnych, abrazyjnych czy eworsyjnych (Filipowicz i Sobkowiak 2007, Wiatkowski i in., 2007, Małecki, 2008). Natomiast w niewielkim stopniu, szczególnie w rejonie Polski centralnej, można spotkać się z opracowaniami, które w sposób szczegółowy charakteryzowałyby wpływ zbiornika zaporowego na kształtowanie się reżimu hydrologicznego w jego zlewni bezpośrednio.

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto próbę przeanalizowania funkcjonowania zbiornika zaporowego w szerszym kontekście uwzględniając między innymi wzajemne relacje pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiorniku a wodami gruntowymi terenów przyległych. Wykorzystanie sondy hydrostatycznej, z której zapisy kierowane były do modułu telemetrycznego zainstalowanego na wieży przelewowej, a następnie przekazywane do programu „Hydromonitor”, pozwoliły na bardzo precyzyjną rejestrację stanów wody w zbiorniku. Program ten jest elementem Zintegrowanego Systemu Monitorowania i Sterowania Urządzeniami Przeciwpowodziowymi Województwa Wielkopolskiego, a jego wykorzystanie pozwala na skrócenie czasu reakcji odpowiednich służb, w kontekście podejmowania działań związanych między innymi z tak zwaną prewencją przeciwpowodziową.

W pracy przeanalizowano również w sposób szczegółowy, w latach hydrologicznych 2017 i 2018, bilans wodny zbiornika, charakteryzując czynniki wiodące. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury wykazano, że do chwili obecnej istnieje wiele pozycji dotyczących charakterystyki bilansów zbiorników wodnych, ale najczęściej w ujęciu jakościowym w odniesieniu do retencjonowanych w nich wód oraz osadów zalegających w dnach (Szymczyk i Świtajska, 2013; Karasiewicz i in., 2014; Major i in., 2021). Natomiast bardzo niewiele jest pozycji, które w sposób szczegółowy charakteryzowałyby bilanse wodne zarówno mniejszych zbiorników jak i zbiorników zaporowych. Można stwierdzić, że

podejmowane w tym zakresie dotychczas badania i charakterystyka bilansów wodnych były w dużej mierze fragmentaryczne, co wynikało najczęściej z braku kompleksowych badań, a wyniki dotyczyły często tylko wybranych składowych bilansu wodnego.

Biorąc pod uwagę fakt, iż cały czas aktualnym problemem gospodarki wodnej jest obniżanie się potencjału ekologicznego i funkcjonalnego jezior, rzek, zbiorników wodnych oraz presji wynikających z zagospodarowania przestrzennego obszaru zlewni i skutków z tego wynikających (Ruman i in., 2013), w pracy podjęto również próbę oceny wpływu zbiornika Przebędowo na parametry determinujące jakość wody, w szczególności poniżej urządzenia piętrzącego.

Pomimo, iż przeprowadzone badania i uzyskane wyniki mają wymiar lokalny (dotyczyły jednego zbiornika zaporowego), to mogą mieć szersze zastosowanie w kierunku realizacji tego typu badań na nowo powstałych obiektach. Natomiast kontynuacja badań w kolejnych latach funkcjonowania danego zbiornika, w kontekście wieloaspektowego monitoringu, może przyczynić się do opracowania scenariuszy i modeli cyfrowych, charakteryzujących zjawiska zarówno w samym zbiorniku jak i w jego zlewni bezpośrednio.

Opracowane dla tak zwanego zbiornika testowego modele mogłyby być wykorzystane w ocenie funkcjonowania zbiorników zaporowych o zbliżonych parametrach morfometrycznych i warunkach zlewniowych.

1.3. Znaczenie pracy dla rozwoju dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz możliwość zastosowania uzyskanych rezultatów w sferze gospodarczej

Realizacja niniejszej pracy doktorskiej oddziałuje na rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka poprzez poszerzenie stanu wiedzy na temat funkcjonowania zbiorników zaporowych w pierwszych latach ich eksploatacji. W szczególności wiąże się to z oceną oddziaływania wód retencjonowanych w danym zbiorniku na wody gruntowe terenów przyległych, co pozwala w dużej mierze określić w jakim zakresie (obszarze) dany obiekt pełni funkcję alimentacyjną, przyczyniając się jednocześnie do poprawy bilansu wodnego jego zlewni bezpośrednio. Tego typu obiekty odgrywają niezwykle istotną rolę w kształtowaniu gospodarki wodnej, szczególnie w kontekście łagodzenia negatywnych skutków wynikających z pogłębiających się niedoborów wody, zarówno w sektorze rolnictwa, leśnictwa, czy energetyki.

Podjęta w pracy tematyka jest szczególnie istotna w obliczu niekorzystnych prognoz dotyczących zmian klimatu (IPCC 2014), które powodują, że zarówno w sektorze przemysłu jak i rolnictwa prowadzi się szereg działań mających na celu zwiększenie efektywności i racjonalnego korzystania z zasobów wodnych.

Występujące z coraz większym nasileniem niedobory opadów, które utrzymują się w Polsce od kilku lat na znacznym obszarze kraju, szczególnie dotkliwie odczuwają rolnicy. Skumulowany deficyt opadów jest wysoki, w wielu rejonach dochodzi do 250 mm i utrzymuje się na tym poziomie od stycznia 2019 r. W związku z tym systematycznie zmniejszają się zasoby wód powierzchniowych oraz pogarsza się sytuacja hydrologiczna kraju (Biedrzycka 2021). Dlatego też problematyka związana z realizacją i funkcjonowaniem budowli hydrotechnicznych, w tym również zbiorników zaporowych, jest aktualnie jednym z ważnych zagadnień nad którym skupiają się naukowcy i znajduje się w zakresie dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

W odniesieniu do możliwości zastosowania uzyskanych rezultatów z pracy doktorskiej w sferze gospodarczej należy zwrócić uwagę, że przedstawione wyniki badań dotyczą między innymi zagadnień związanych z monitoringiem dyspozycyjnych zasobów wód powierzchniowych. W szczególności w sektorze rolnictwa mogą one być praktyczną wskazówką dotyczącą wykorzystania retencji użytecznej tego typu obiektów w kontekście realizacji nawodnień.

Przedstawione w pracy wyniki mogą również stanowić pewnego rodzaju wytyczne dotyczące perspektywy prowadzenia badań na nowo powstałych zbiornikach zaporowych na obszarze naszego kraju. W dużej mierze mogłyby być one pomocne w realizacji przedsięwzięć zmierzających do optymalnego funkcjonowania nowych obiektów, które objęte szczegółowym monitoringiem hydrologicznym jak i ekologicznym, szczególnie w pierwszych latach eksploatacji, przyczyniłyby się do poprawy bilansu wodnego Polski, jednocześnie istotnie wpływając na stopniowy wzrost krajowego wskaźnika retencji.

2. Cel nadrzędny pracy, cele szczegółowe, zakres pracy oraz hipotezy badawcze

Celem nadrzędnym pracy doktorskiej była ocena funkcjonowania zbiornika zaporowego Przebędowo, w pierwszych latach eksploatacji, w zróżnicowanych warunkach meteorologicznych.

Cele szczegółowe rozprawy obejmowały:

- C1) Określenie wpływu wód retencjonowanych w zbiorniku na wody gruntowe w terenach przyległych.
- C2) Charakterystykę składowych bilansu wodnego zbiornika w kontekście oceny czynników wiodących.
- C3) Określenie wpływu zbiornika na jakość wody w rzece Trojanka poniżej budowli upustowej w okresach wegetacyjnych analizowanych lat hydrologicznych.

Zakres pracy obejmował:

- Z1) Przedstawienie dotychczasowego stanu wiedzy na temat funkcjonowania zbiorników retencyjnych, w tym zaporowych, w aspekcie zarówno hydrologicznym jak i ekologicznym.
- Z2) Przeprowadzenie czteroletnich badań w zlewni bezpośredniej zbiornika obejmujących między innymi charakterystykę podstawowych warunków meteorologicznych (opady atmosferyczne i temperatury powietrza), pomiary stanów wód w zbiorniku oraz wód gruntowych w terenach przyległych, pomiary przepływów w cieku Trojanka (dopływ i odpływ ze zbiornika) oraz pobór próbek wody w kontekście charakterystyki parametrów decydujących o jej jakości.

Ponadto w ramach pracy doktorskiej zweryfikowano następujące hipotezy badawcze:

- H1) Wody retencjonowane w zbiorniku Przebędowo istotnie oddziałują na wody gruntowe w terenach bezpośrednio przyległych.
- H2) W bilansie wodnym zbiornika, decydującą rolę odgrywają czynniki poziomej wymiany (dopływ i odpływ), natomiast czynniki wymiany pionowej (opady atmosferyczne i parowanie z powierzchni zbiornika) mają znaczenie marginalne.
- H3) Zbiornik Przebędowo pozytywnie wpływa na jakość wody w rzece Trojanka poniżej budowli upustowej.

3. Obszar badań

Zbiornik Przebędowo zlokalizowany jest w województwie wielkopolskim około 25 km na północ od Poznania, w gminie Murowana Goślina (ryc. 1). Głównym zadaniem zbiornika jest retencjonowanie wody dla celów rolniczych oraz poprawa warunków klimatycznych w jego zlewni bezpośredniej. Zbiornik pełni również funkcję ochrony przeciwpowodziowej oraz przeciwpożarowej na terenie gminy.

Według regionalizacji fizycznogeograficznej Polski (Kondracki 2000), obszar objęty badaniami, o krajobrazie młodoglacjalnym, usytuowany jest na Pojezierzu Wielkopolskim w rejonie Poznańskiego Przełomu Warty (315.52). W badanej zlewni o powierzchni około 100 km² przeważają lasy, a w mniejszym stopniu w terenie przyległym do zbiornika występują grunty orne zbudowane z osadów czwartorzędowych (plejstocen) fluwialnych. Obszar bezpośredniej alimentacji jeziora zajmuje powierzchnię 1,31 km². Analiza warstw objętych piezometrami, wykazała przewagę piasków średnich zalegających do głębokości około 3 m, o średniej porowatości wynoszącej 36% w których to wody gruntowe (freatyczne) tworzą ciągły poziom wodonośny.



Ryc. 1. Lokalizacja zbiornika Przebędowo
(źródło: opracowanie własne)

Analizowany zbiornik (ryc. 2), został wykonany w dolinie rzeki Trojanki (od km 6+915 do km 8+371 jej biegu), stanowiącej trasę akumulacyjną z nachyleniem w kierunku brzegów akwenu, przez Wielkopolski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Poznaniu i został oddany do eksploatacji w listopadzie 2014 roku. Zbiornik znajduje się w Jednolitej Części Wód Powierzchniowych (JCWP) o nazwie: Trojanka (struga Goślińska) i krajowym kodzie: RW600010185969. Należy zaznaczyć, że rzeka Trojanka pełni funkcję lokalnego korytarza ekologicznego sieci hydrograficznej. Jest ona bardzo istotna w aspekcie powiązań obszaru Parku Krajobrazowego Puszcza Zielonka (utworzonego w 1993 r.), projektowanego obszaru specjalnej ochrony siedlisk Natura 2000 „Uroczyska Puszczy Zielonka” oraz rzeki Warty do której uchodzi.



Ryc. 2. Zbiornik Przebędowo - widok od strony północnej (źródło: opracowanie własne)

Ziemna zaporą czołowa na zbiorniku (ryc. 3) jest klasy IV, jej długość wynosi 334 m przy wysokości 3,30 m. Zbiornik o długości 1450 m i szerokości maksymalnej 120 m przy normalnym poziomie piętrzenia (NPP) wynoszącym 72,50 m n.p.m. ma średnią głębokość 0,94 m i powierzchnię zalewu 12,03 ha (tab. 1).



Ryc.3. Ziemna zapora czołowa wraz z budowlą upustowo-przelewową na zbiorniku Przebędowo (źródło: opracowanie własne)

Tabela 1. Podstawowe parametry morfometryczne zbiornika Przebędowo (źródło: opracowanie własne na podstawie Projektu wykonawczego 2011)

L.p.	Wyszczególnienie	Jednostka	Ilość
1	Powierzchnia	ha	12,03
2	Długość	m	1450
3	Szerokość maksymalna	m	120
4	Głębokość średnia	m	0,94
5	Długość linii brzegowej	m	2980
6	Rozwinięcie linii brzegowej	m/ha	248
7	Wskaźnik wydłużenia	-	12
8	Normalny poziom piętrzenia - NPP	m n.p.m.	72,50
9	Maksymalny poziom piętrzenia - MaxPP	m n.p.m.	73,00
10	Pojemność całkowita przy NPP	m ³	162 350
11	Pojemność całkowita przy MaxPP	m ³	229 450
12	Rezerwa powodziowa pomiędzy NPP, a Max. PP	m ³	67 100

Długość linii brzegowej analizowanego zbiornika wynosi 2980 m, natomiast jej rozwinięcie kształtuje się na poziomie 248 m/ha, a wskaźnik wydłużenia wynosi 12. Rezerwa powodziowa, która stanowi różnicę pomiędzy pojemnością zbiornika przy maksymalnym poziomie piętrzenia (Max PP), a pojemnością przy normalnym poziomie piętrzenia (NPP) osiąga wartość na poziomie 67 100 m³.

4. Metody badań

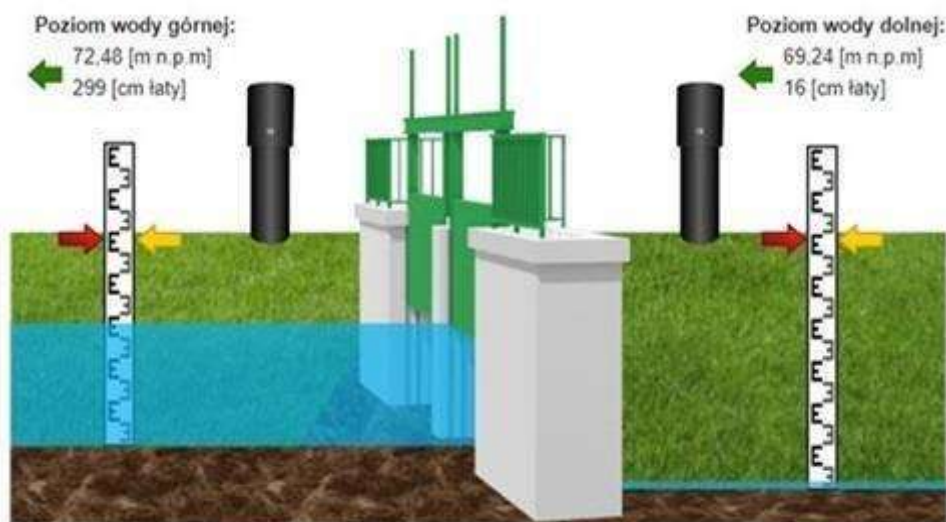
W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki badań i analiz dotyczących funkcjonowania zbiornika w latach hydrologicznych 2015 - 2018 oraz dokumentację fotograficzną obiektu wykonaną podczas pomiarów terenowych.

Stany wody w zbiorniku Przebędowo mierzono, z częstotliwością raz na dwa tygodnie, na łacie wodowskazowej usytuowanej na urządzeniu piętrzącym zlokalizowanym na odpływie ze zbiornika (ryc. 4).



Ryc.4. Łata wodowskazowa wraz z sondą hydrostatyczną usytuowana na urządzeniu piętrzącym zlokalizowanym na odpływie ze zbiornika (źródło: opracowanie własne)

Dodatkowo stany wody w zbiorniku rejestrowane były w sposób ciągły za pomocą sondy hydrostatycznej, z której zapisy kierowane były do modułu telemetrycznego zainstalowanego na wieży przelewowej, a następnie dane były przekazywane do programu „Hydromonitor” (ryc. 5). Program ten jest elementem Zintegrowanego Systemu Monitorowania i Sterowania Urządzeniami Przeciwpowodziowymi Województwa Wielkopolskiego, którego zadaniem jest stały monitoring sieci urządzeń przeciwpowodziowych. System ten umożliwia nadzorowanie poszczególnych obiektów o znaczeniu przeciwpowodziowym, tj.: przepompowni, zbiorników retencyjnych, samodzielnych budowli piętrzących oraz wybranych odcinków obwałowań, które są oddalone od siebie o kilka, kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt kilometrów. Skraca również czas reakcji odpowiednich służb w sytuacjach awaryjnych oraz pozwala na stały dostęp do informacji o sytuacji panującej wokół poszczególnych urządzeń.



Ryc.5. Schemat budowy upustowej na cieku Trojanka (PO054JZ – jaz zbiornik Przebędowo) w programie „Hydromonitor”

(źródło: Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie
Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu)

Natomiast stany wód gruntowych mierzono w 21 studzienkach zainstalowanych w siedmiu przekrojach w bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika. Do wstępnej analizy przyjęto wyniki pomiarów uzyskanych z siedmiu wybranych studzienek: P-2 i P-3 zlokalizowanych w terenie przyległym do zbiornika od strony zachodniej oraz od P-16 do P-18 a także P-20 i P-21 zainstalowanych od strony wschodniej. Pozostałych studzienek zainstalowanych podczas budowy zbiornika nie uwzględniono w pracy z uwagi na usytuowanie ich w koronie zapory. W roku hydrologicznym 2015 od połowy stycznia został rozpoczęty monitoring na omawianym obiekcie, dlatego też charakterystykę stanów wody rozpoczęto od tego okresu. Dalszą analizę poszerzono o wyniki badań z sześciu dodatkowo zainstalowanych w kwietniu 2016 roku studzienek od 1' do 6', dowiązanych pod względem wysokościowym do sieci państwowej i zlokalizowanych w terenie przyległym do zbiornika w odległości około 10 m od jego brzegów w trzech reprezentatywnych przekrojach (ryc. 6).



Ryc.6. Lokalizacja studzienek do pomiaru stanów wód gruntowych w terenie przyległym do zbiornika (źródło: Waligórski i in. 2020)

Pomiarów stanów wód gruntowych w analizowanych latach, podobnie jak stanów wody w zbiorniku, dokonywano z częstotliwością raz na dwa tygodnie, natomiast cotygodniowe stany wód gruntowych w analizowanych studzienkach odtworzono obliczając wartości średnie z pomiarów dwutygodniowych. W charakterystyce związanej z oddziaływaniem wód retencjonowanych w zbiorniku na wody gruntowe terenów przyległych (publikacja P1) liczbę dni z zasileniem wód gruntowych przez wody retencjonowane w zbiorniku określono w analizowanym okresie na podstawie różnicy pomiędzy rzędnymi stanów wód w zbiorniku i wód gruntowych w przyjętych do analizy studzienkach.

Podstawowe warunki meteorologiczne (opady atmosferyczne i temperatury powietrza), na tle danych z wielolecia 2000-2015, scharakteryzowano w omawianych latach hydrologicznych 2015-2018 na podstawie wyników pomiarów uzyskanych ze stacji meteorologicznej Zakładu Doświadczalno – Dydaktycznego Arboretum Leśnego w Zielonce, który jest zlokalizowany około 8 km na południowy wschód od analizowanego zbiornika. Stacja meteorologiczna położona jest w centralnej części Puszczy Zielonka na wysokości 91,00 m n.p.m., na 52°33'00" szerokości geograficznej północnej i 17°06'33" długości geograficznej

wschodniej. Pomiary prowadzone są tu nieprzerwanie od 1986 roku, przy czym odczytów dokonuje się trzy razy na dobę (Grajewski i Pacholczyk 2011).

Charakterystykę wilgotnościową dla analizowanych lat hydrologicznych przeprowadzono, wykorzystując wskaźnik względnego opadu RPI, według Kędziory (1995 za Kaczorowską 1962) z uwzględnieniem kryteriów zawartych w tabeli nr 2.

Tabela 2. Charakterystyka wilgotnościowa roku hydrologicznego
(źródło: Kędziora 1995)

Typ roku	% opadu normalnego
Skrajnie suchy	Poniżej 50
Bardzo suchy	50-74
Suchy	75-89
Przeciętny	90-110
Wilgotny	111-125
Bardzo wilgotny	126-150
Skrajnie wilgotny	Powyżej 150

W ocenie bilansu wodnego omawianego zbiornika scharakteryzowanego dla lat hydrologicznych 2017 i 2018 (publikacja P2) z uwagi na znaczne roczne i półroczne wartości składowych bilansu biorących udział w wymianie rzecznej to znaczy dopływ do zbiornika ciekami Trojanka i odpływ, bilans wodny wyrażono w hm^3 i obliczono na podstawie równania:

$$P + Hd + Hp + Hpp + \Delta R_1 = E + \Delta R_2 + Ho + Hopp + Hw \quad (1)$$

gdzie:

P – opad atmosferyczny na powierzchnię zbiornika (hm^3)

Hd – dopływ do zbiornika ciekami Trojanka (hm^3)

Hp – dopływ powierzchniowy do zbiornika z terenów przyległych (hm^3)

Hpp – dopływ podpowierzchniowy do zbiornika z terenów przyległych (hm^3)

ΔR_1 – przyrost retencji (hm^3)

E – parowanie z powierzchni zbiornika (hm^3)

ΔR_2 – ubytek retencji (hm^3)

Ho – odpływ ze zbiornika ciekami Trojanka (hm^3)

$Hopp$ – odpływ podpowierzchniowy ze zbiornika do terenów przyległych (hm^3)

Hw – niekontrolowany odpływ wstępny (hm^3)

Według Rzętały (2008), analizując bilans wodny zbiorników antropogenicznych, w tym zaporowych, z uwagi na sposób zasilania oraz sztuczne sterowanie obiegiem wody, wyniki obliczeń korzystniej jest wyrażać w hm^3 , a nie w milimetrach jak to zazwyczaj jest przyjęte w pracach geograficznych.

Jednocześnie, ze względu na stosunkowo nieduże wahania stanów wody w zbiorniku, oceny jego bilansu wodnego dokonano odnosząc się do jego powierzchni przy normalnym poziomie piętrzenia (NPP). W obliczeniach bilansu wodnego analizowanego zbiornika wartości opadu atmosferycznego skorygowano wprowadzając poprawkę wynikającą ze wzoru Jaworskiego, zalecanego dla warunków Wielkopolski przez Kędziorę (1995):

$$P_s = 1,034 \cdot P_z + 0,484 \cdot N + 4,0 \quad (2)$$

gdzie:

P_s – opad skorygowany (mm)

P_z – opad zmierzony (mm)

N – liczba dni z opadem w miesiącu

Natomiast zasilanie zbiornika opadem atmosferycznym obliczono z zależności:

$$P = P_s \cdot A_{zb} \quad (3)$$

gdzie:

P_s – opad skorygowany (m)

A_{zb} – powierzchnia zbiornika (m^2)

Wartości dopływów do zbiornika ciekami Trojanka (H_d) i odpływów (H_o) oraz dopływów powierzchniowych (H_p) dwoma rowami melioracyjnymi (A i B, ryc.6) dochodzącymi do zbiornika od strony północno zachodniej (A) oraz wschodniej (B), wyznaczono na podstawie obliczeń natężeń przepływów, do określenia których wykorzystano pomiary prędkości przepływu wody młynkiem hydrometrycznym (Sonda elektromagnetyczna Valeport – FLAT Model 801), z częstotliwością raz na miesiąc. Przepływy obliczono w oparciu o krzywe tarowania wyznaczone na podstawie pomiarów terenowych.

Wielkości dopływu podpowierzchniowego do zbiornika z terenów przyległych (Hpp) oraz odpływu podpowierzchniowego ze zbiornika do przyległych terenów (Hopp), określono wykorzystując wzór Darcy (Rushton 2003):

$$Q = k \cdot I \cdot O \cdot \Delta h \quad (4)$$

gdzie:

k - współczynnik filtracji (m/d)

I - spadek hydrauliczny

O - długość linii brzegowej (m)

Δh - miąższość warstwy wodonośnej (m)

Wartość współczynnika filtracji przyjęto na poziomie $k=24,704$ m/d, określonego jako średnią dla wielkości uzyskanych podczas realizacji odwiertów geologicznych wykonanych podczas instalacji piezometrów, wyznaczonych metodą Hazena i zawartych w dokumentacji z wykonania robót geologicznych związanych z montażem otworów obserwacyjnych zbiornika małej retencji "Przebędowo" (2014) sporządzoną przez firmę Geoprogram z Bydgoszczy.

Miąższość warstwy wodonośnej (Δh) biorącej udział w prowadzeniu wody do zbiornika z terenów przyległych i odwrotnie, określono na podstawie różnicy pomiędzy poziomem wody w zbiorniku a poziomami wody w analizowanych studzienkach (wartość średnia).

Miesięczne wartości parowania z powierzchni zbiornika obliczono wzorem Tichomirowa (Kędziora 1995):

$$E_1 = d \cdot (15 + 3 \cdot v) \quad (5)$$

gdzie:

E - parowanie miesięczne z powierzchni wody (mm)

d - średni miesięczny niedosyt wilgotności powietrza (mmHg)

v - średnia miesięczna prędkość wiatru na wysokości wiatromierza (m/s)

Natomiast półroczne i roczne wartości parowania określono ze wzoru:

$$E = E_1 \cdot A_z b \quad (6)$$

gdzie:

*E*₁ - parowanie z powierzchni zbiornika (m)

A_zb - powierzchnia zbiornika (m²)

Przyrosty (ΔR_1) lub ubytki retencji (ΔR_2) wody w omawianym zbiorniku określono na podstawie zmian stanów wody rejestrowanych na łacie wodowskazowej usytuowanej na

urządzeniu piętrzącym. Natomiast wartość niekontrolowanego odpływu wgłębnego (Hw) została określona jako dopełnienie do równania bilansowego.

W badaniach dotyczących oceny wpływu zbiornika Przebędowo na jakość wody w rzece Trojanka (publikacja P3), analizą zostały objęte okresy wegetacyjne lat od 2016 do 2018, a pomiarów dokonywano w 3 punktach kontrolnych: na dopływie do zbiornika, w zbiorniku oraz na odpływie ze zbiornika (ryc. 7). W analizowanych okresach wegetacyjnych próbki wody pobierano z częstotliwością jeden raz na miesiąc.



Ryc. 7. Punkty poboru próbek wody: P1 – dopływ, P2 – zbiornik, P3 – odpływ
(źródło: opracowanie własne)

Analizy laboratoryjne próbek wody zostały wykonane w laboratorium Katedry Melioracji, Kształtowania Środowiska i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Obejmowały one oznaczenia 4 grup wskaźników fizyczno-chemicznych wspierających elementy biologiczne, w tym wskaźniki charakteryzujące warunki tlenowe (zawartość tlenu rozpuszczalnego oraz BZT₅), wskaźniki zasolenia (wapń, magnez, chlorki, siarczany i przewodność elektrolityczna), zakwaszenie (pH) oraz wskaźniki charakteryzujące warunki biogenne (azot amonowy, azot azotanowy (V), azot azotanowy (III) i fosfor fosforanowy (V)).

Obliczenia statystyczne dotyczące istotności różnic w wartościach wskaźników pomiędzy punktami pomiarowo-kontrolnymi (dopływ i odpływ), przeprowadzono za pomocą nieparametrycznego testu U Manna-Whitneya przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Test ten wybrano ze względu na brak rozkładu normalnego większości analizowanych wskaźników.

Analizy próbek wody wykonane zostały zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 roku (zwanym dalej „Rozporządzeniem”) w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych, na ich podstawie określono stan ekologiczny cieku Trojanka.

W badaniach oraz analizie wyników wykorzystano również operat wodnoprawny (2009) i Instrukcję gospodarowania wodą (2009) a także „Projekt wykonawczy zbiornika Przebędowo” (2011) opracowane przez Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska BIOPROWODMEL z Poznania.

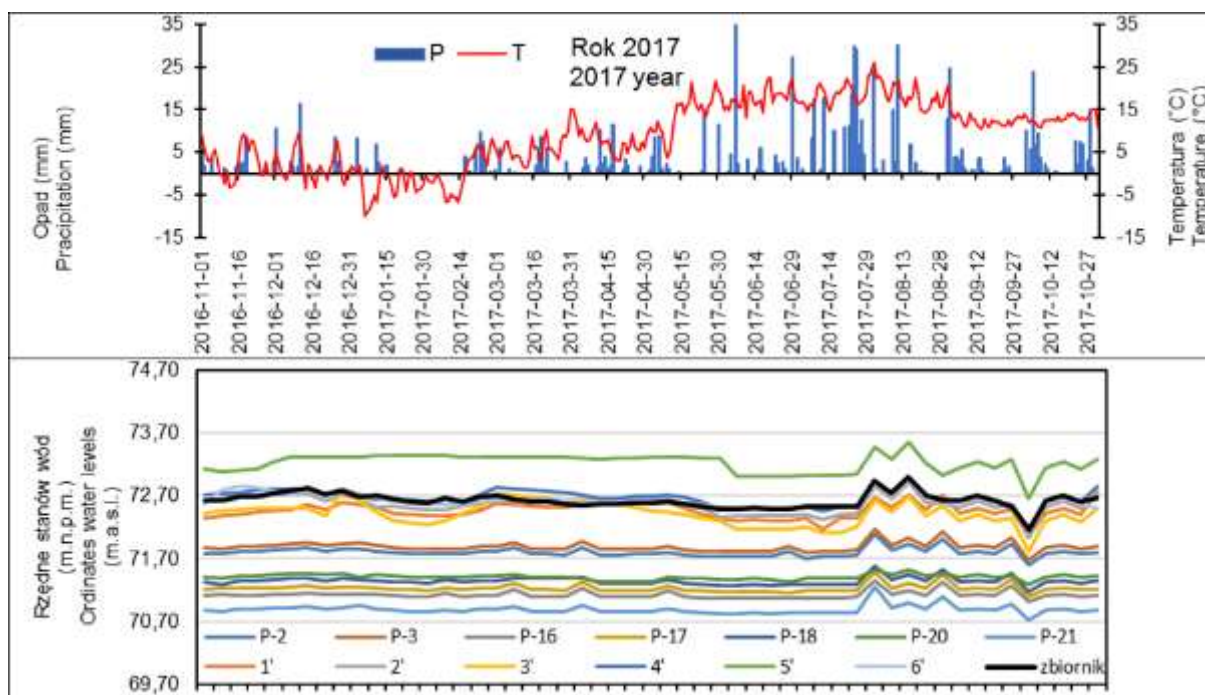
Wyniki obserwacji stanów wód na rozpatrywanym obiekcie wykorzystano za zgodą Dyrektora ówczesnego Wielkopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Poznaniu (obecne Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu).

5. Wyniki oraz dyskusja

5.1. Ocena wzajemnych powiązań pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiorniku, a wodami gruntowymi w terenach przyległych.

Ważnym elementem w ocenie funkcjonowania zbiorników zaporowych jest określenie wzajemnego oddziaływania wód retencjonowanych w danym zbiorniku i wód gruntowych terenów przyległych. Wyniki badań przeprowadzone na obszarze naszego kraju, jak i poza nim potwierdziły, że pomiędzy stanami wody w zbiornikach retencyjnych, a stanami wód gruntowych w terenach przyległych istnieją silne powiązania, często determinowane warunkami fizjograficznymi, geologicznymi i hydrogeologicznymi (Philips i Shedlock 1993, Kosturkiewicz i in. 1996, Kosturkiewicz i in. 2001, Maślanka i in. 2003, Major 2003, van der Kamp i Hayashi 2009, Major 2012, Przybyła i in. 2017). Pomiedzy stanami wody w zbiornikach, a wodami gruntowymi w terenach przyległych często występuje więź hydrauliczna, przy czym w glebach lekkich zasięg oddziaływania danego zbiornika na otaczający teren jest większy niż w przypadku gleb ciężkich (Ryszkowski i Kędziora 1996, Błażejewska i in. 2005, Grzywna i in. 2017).

Uzyskane w omawianych latach hydrologicznych 2015-2017 wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że zarówno stany wody w zbiorniku, jak i wody gruntowe w analizowanych studzienkach charakteryzowały się niewielką zmiennością. Najwyższe położenie zwierciadła wody w analizowanym zbiorniku oraz wód gruntowych w terenie przyległym stwierdzono w mokrym pod względem opadów roku hydrologicznym 2017 (ryc.8). Zwierciadło wody w zbiorniku utrzymywało się w tym roku na średnim poziomie wynoszącym 72,99 m n.p.m.. Natomiast rzędne stanów wód gruntowych kształtowały się w omawianym roku na średnim poziomie wynoszącym od 70,87 m n.p.m. (studzienka nr 21) do 73,12 m n.p.m. (studzienka 5'). Funkcjonowanie zbiorników zaporowych poza wpływem czynników meteorologicznych oraz hydrologicznych, często uwarunkowane jest też tzw. czynnikiem antropogenicznym związanym z eksploatacją danego obiektu. W omawianym roku hydrologicznym w wyniku wysokich sum opadów, które wystąpiły na przełomie lipca i sierpnia oraz powstałego na urządzeniu piętrzącym zatoru z roślinności, konieczne było otwarcie upustów dennych, gdyż bardzo wysoki poziom wody w zbiorniku groził przelaniem się wód przez koronę zapory i podtopieniem zlokalizowanych w sąsiedztwie zabudowań. Na skutek podjęcia tego typu czynności, na przełomie drugiej i trzeciej dekady sierpnia stwierdzono intensywne opadanie stanów wód w zbiorniku oraz stanów wód gruntowych w terenie przyległym.



Ryc. 8. Rzędne zwierciadła wody w zbiorniku i wód gruntowych w badanych studzienkach (m n.p.m.) na tle dobowych sum opadów i średnich dobowych temperatur powietrza w roku hydrologicznym 2017 (źródło: Waligórski i in. 2019)

Jak podaje Mioduszeński i Okruszko (2016) na funkcje hydrologiczne danego zbiornika może mieć duży wpływ również sposób jego eksploatacji. Eksploatacja zbiorników zaporowych często związana jest z podejmowaniem działań, które według Nachlik (2006) można zaliczyć do tak zwanej prewencji przeciwpowodziowej, która sprzyja przywracaniu lub zachowywaniu naturalnych warunków odpływu ze zlewni. Są to działania, które umożliwiają ograniczenie szkód powodziowych na danym obszarze i są często stosowane na obiektach retencji sterowalnej. Wiatkowski (2015) w swoich badaniach dotyczących eksploatacji zbiornika wodnego Młyny, podkreślał również istotną rolę działań wpisujących się w prewencję przeciwpowodziową. Według tego Autora, działania takie wiążą się w okresach wezbrań powodziowych, po przekroczeniu maksymalnego poziomu piętrzenia, z koniecznością obniżenia wysokości przelewu.

W ocenie wzajemnych relacji pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiornikach, a wodami gruntowymi w terenach bezpośrednio do nich przyległych, istotne jest między innymi określenie czasu zasilania wód gruntowych przez dany zbiornik i wód zbiornika przez wody gruntowe. Przeprowadzone analizy i obliczenia pozwoliły stwierdzić, że przez większą część analizowanych lat hydrologicznych wody retencjonowane w zbiorniku Przebudowo

zasilają wody gruntowe terenów przyległych (tab. 3). Najdłuższy czas zasilania stwierdzono w omawianych latach od strony studzienek od P-2 do P-21 zlokalizowanych w niedalekiej odległości od zapory.

Tabela 3. Ilość dni z zasilaniem wód zbiornika przez wody gruntowe i wód gruntowych przez wody zbiornika w latach hydrologicznych 2015, 2016 i 2017
(źródło: Waligórski i in. 2019)

Nr studzienki	Ilość dni					
	Wody gruntowe zasilają wody zbiornika			Wody zbiornika zasilają wody gruntowe		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
P-2	7	0	0	282	366	365
P-3	7	0	0	282	366	365
P-16	7	0	0	282	366	365
P-17	7	0	0	282	366	365
P-18	7	0	0	282	366	365
P-20	7	0	0	282	366	365
P-21	0	0	0	289	366	365
1'	-	0	42	-	366	323
2'	-	7	105	-	359	260
3'	-	0	56	-	366	309
4'	-	70	259	-	296	106
5'	-	184	365	-	182	0
6'	-	35	147	-	331	218

Natomiast w przypadku studzienek od 1' do 6' zlokalizowanych w okolicach środkowej części zbiornika stwierdzono dwukierunkowy przepływ wód, przy czym najdłuższe zasilanie wód zbiornika wodami gruntowymi miało miejsce od usytuowanej od wschodniej strony zbiornika studzienki nr 5'. Stosunkowo długi czas zasilania wód zbiornika wodami gruntowymi stwierdzono także od strony studzienek 4' i 6', również zlokalizowanych po stronie wschodniej zbiornika. Dłuższy czas zasilania wód zbiornika wodami gruntowymi od strony tych studzienek można wytłumaczyć większym obszarem zasilania i napływem wód spoza zlewni bezpośredniej. Według Radeckiego-Pawlika i Kapusty (2006), zasilanie retencji powierzchniowej może następować nie tylko z opadów, ale również z samego gruntu, jeśli w ośrodku porowatym powstaną takie gradienty hydrauliczne, które mogą przeciwstawić się gradientowi potencjału grawitacyjnego skierowanego w dół. W analizowanych latach wody gruntowe zasilają wody zbiornika przez okres od 7 dni (st.2') do 365 dni (st.5'). Przeprowadzone w omawianych latach badania pozwoliły stwierdzić, że zbiornik wykazuje typowo alimentacyjny charakter dla terenów przyległych znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu zapory. Natomiast drenującą również rolę stwierdzono w środkowej jego części. Uzyskane wyniki badań potwierdziły między innymi badania Bem oraz Kacy (2003)

przeprowadzone na terenie Rezerwatu Przyrody „Stawy Raszyńskie”, w których Autorzy podkreślali możliwość wystąpienia drenującego lub alimentacyjnego, w kontekście wód gruntowych, wpływu zbiorników na tereny przyległe. Natomiast w badaniach Gurwina (2020) dotyczących zbiornika retencyjnego Jezioro Turawskie, Autor wykazał typowo drenujący jego charakter w stosunku do wód podziemnych terenów przyległych. Według tego Autora tylko w strefie zapory czołowej stwierdzono wyraźnie duży odpływ wód z czaszy do wód podziemnych przedpola zapory.

Uzyskane obliczenia związków pomiędzy rzędnymi stanów wody w zbiorniku Przebędowo, a rzędnymi zwierciadła wód gruntowych w badanych studzienkach w półroczach zimowych i letnich omawianych lat hydrologicznych, wykazały w większości silne zależności (tab. 4). W półroczach zimowych obliczone współczynniki korelacji wahały się od 0,1 w studzienkach nr: 1', 3' i 5' (2017 r.) do 0,96 w studzienkach P-2 i P-18 (2016 i 2015 r.). Najślabsze powiązania pomiędzy omawianymi wielkościami wystąpiły w półroczu zimowym 2017 roku, co w dużej mierze mogło być wywołane ujemnymi temperaturami powietrza w okresie od grudnia do lutego tego roku. Natomiast w półroczach letnich obliczone współczynniki korelacji wahały się od 0,34 w studziencie 3' (2016 r.) do 0,99 w studzienkach P-2 i P-3 (2016 r.). Uzyskane dla omawianych półroczy zależności były w większości istotne na poziomie $\alpha = 0,01$. Jak podaje Kala (2002) dla zjawisk analizowanych w naukach przyrodniczych obiektywne wnioskowanie o silnych zależnościach wystarczające jest już przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Można stwierdzić, że poza przebiegiem warunków meteorologicznych, a także ukształtowaniem terenu w najbliższym otoczeniu analizowanego zbiornika o stwierdzonych w większości silnych zależnościach, mogły decydować również właściwości utworów leżących w terenie do niego bezpośrednio przyległym. Według Chalfena i Czamary (2007), Michalaka i Nowickiego (2009) oraz Korytowskiego i in. (2023) parametry hydrogeologiczne utworów występujących w skarpach i dnie danego zbiornika wodnego oraz jego najbliższym otoczeniu, szczególnie porowatość, w dużej mierze decydują o wzajemnych zależnościach pomiędzy wodami w zbiorniku, a wodami gruntowymi.

Tabela 4. Współczynniki korelacji (r) oraz poziomy istotności (α) dla związków rzędnych stanów wody w zbiorniku z rzędnymi zwierciadła wód gruntowych, w analizowanych studzienkach usytuowanych w terenie przyległym w półroczach zimowych i letnich lat hydrologicznych 2015, 2016 i 2017 (źródło: Waligórski i inni 2018)

Studzienka nr	P-2	P-3	P-16	P-17	P-18	P-20	P-21	1'	2'	3'	4'	5'	6'
Półrocze zimowe 2015													
Współczynnik korelacji	0,94	0,94	0,88	0,91	0,96	0,93	0,91	-	-	-	-	-	-
Poziom istotności α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-
Półrocze letnie 2015													
Współczynnik korelacji	0,9	0,9	0,89	0,89	0,95	0,92	0,92	-	-	-	-	-	-
Poziom istotności α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-
Półrocze zimowe 2016													
Współczynnik korelacji	0,96	0,95	0,58	0,75	0,75	0,62	0,88	-	-	-	-	-	-
Poziom istotności α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-
Półrocze letnie 2016													
Współczynnik korelacji	0,99	0,99	0,75	0,89	0,97	0,78	0,97	0,79	0,8	0,34	0,75	0,62	0,85
Poziom istotności α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01	0,01
Półrocze zimowe 2017													
Współczynnik korelacji	0,6	0,6	0,24	0,33	0,34	0,85	0,61	0,1	0,48	0,1	0,45	0,1	0,62
Poziom istotności α	0,01	0,01	-	-	-	0,01	0,01	-	0,01	-	-	-	0,01
Półrocze letnie 2017													
Współczynnik korelacji	0,74	0,74	0,61	0,64	0,73	0,9	0,74	0,79	0,94	0,89	0,94	0,81	0,97
Poziom istotności α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Silne zależności pomiędzy omawianymi wielkościami akcentowali również między innymi Zubala (2005) w badaniach przeprowadzonych na zbiorniku położonym we wsi Wstawka Aleksandrowska oraz Przybyła i Kozdrój (2013) na zbiorniku Pakosław w zlewni rzeki Orli. Istotne zależności pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiornikach, a wodami gruntowymi w terenach przyległych mogą między innymi świadczyć o pozytywnym oddziaływaniu zbiorników na wody gruntowe, szczególnie w kontekście ich zasilania w okresach posusznych. Ten aspekt potwierdziły między innymi badania Maślanki i Kostucha (2014) przeprowadzone na zbiorniku zaporowym Domaniów oraz Sojki i in. (2010) w zlewni Strugi Dormowskiej.

Jak podają Radczuk i Olearczyk (2002), Operacz i in. (2012) oraz Rodrigues i in. (2012) sztuczne wymuszenie podniesienia zwierciadła wody poprzez zlokalizowanie urządzenia

regulującego wysokość piętrzenia, w odniesieniu między innymi do zbiorników zaporowych, znacząco wpływa również na zwiększenie przyrostu retencji w zlewni i w dużej mierze może zapobiegać stepowaniu danego obszaru. Według tych Autorów z punktu widzenia gospodarki wodnej zwiększona retencja podziemna, często zbliżona do całkowitej zdolności retencyjnej zlewni, ma ogromne znaczenie w obiegu wody w systemie.

Analizy dotyczące wzajemnych powiązań pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiornikach wodnych, a wodami gruntowymi w przyległych do nich obszarach były przedmiotem badań nie tylko na obszarze naszego kraju ale również w wielu innych regionach. Silne powiązania pomiędzy wyżej wymienionymi wielkościami podkreślali między innymi Seeboonruang (2012) na podstawie badań przeprowadzonych w północno-wschodniej Tajlandii (prowincja Nakhon Panom) oraz Song i in. (2015) w badaniach przeprowadzonych w Chinach na zbiornikach dorzecza Sanchahe.

Pełny opis wyników przedstawiono w publikacji P1:

Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. 2019. Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. *Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, s.: 767-788.

W publikacji P1 zrealizowano cel szczegółowy rozprawy doktorskiej:

C1) Określenie wpływu wód retencjonowanych w zbiorniku na wody gruntowe w terenach przyległych.

Ponadto w publikacji P1 zweryfikowano hipotezę badawczą:

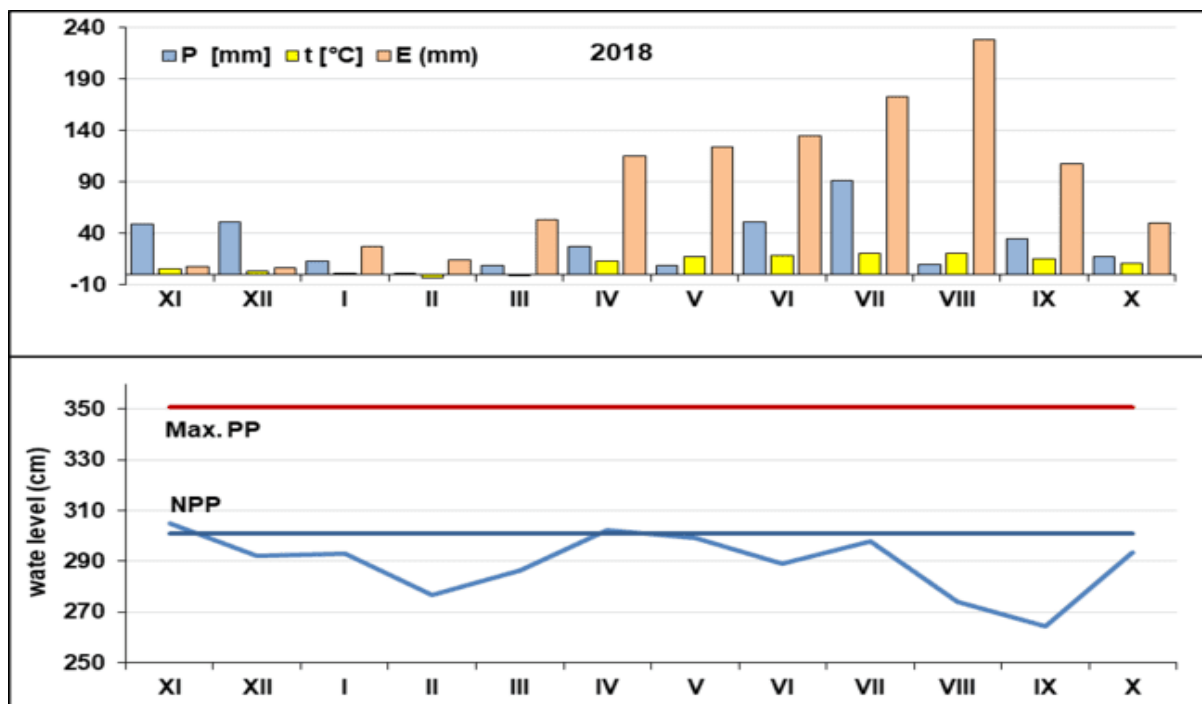
H1) Wody retencjonowane w zbiorniku Przebędowo istotnie oddziałują na wody gruntowe w terenach bezpośrednio przyległych.

5.2. Charakterystyka czynników determinujących bilans wodny zbiornika.

W charakterystyce funkcjonowania zbiorników retencyjnych ważnym elementem jest ocena składowych ich bilansu wodnego. Według Fowe i in. (2015) oraz Bashara i Mustafy (2009) precyzyjne oszacowanie tych wielkości pozwala często poznać charakter danego zbiornika, co między innymi w odniesieniu do zadań związanych z jego eksploatacją może przyczynić się do optymalnego działania takiego obiektu. Ma to znaczenie szczególnie w kontekście zbiorników zaporowych, gdzie często podejmowane są decyzje dotyczące na przykład utrzymania określonego poziomu piętrzenia lub w sytuacjach kryzysowych obejmujące działania związane między innymi z otwarciem upustów dennych, w kontekście szybkiego odprowadzenia nadmiaru wód.

Przedstawiona w poprzednim podrozdziale analiza wzajemnych powiązań pomiędzy stanami wody w badanym zbiorniku, a stanami wód gruntowych w terenie przyległym jest jednym z istotnych aspektów dotyczących oceny jego bilansu wodnego, szczególnie w kontekście dopływów i odpływów podpowierzchniowych. Zwłaszcza, że jak podaje Kampf i Burges (2010) filtracja wody ze zbiornika do gruntu jest składową bilansu stosunkowo trudną do precyzyjnego scharakteryzowania nawet w skali lokalnej.

W równaniach bilansowych zbiorników wodnych jednym z elementów, który można określić najbardziej precyzyjnie są, bezpośrednio wynikające ze zmian stanów wody, zmiany retencji. W publikacji numer 2 scharakteryzowano średnie miesięczne stany wód w analizowanym zbiorniku w latach hydrologicznych 2017 i 2018. W suchym pod względem opadów roku hydrologicznym 2018 zdolności zbiornika w kontekście retencji użytecznej były znikome. Średnie miesięczne stany wody w zbiorniku utrzymywały się w większości poniżej normalnego poziomu piętrzenia (NPP). Najniższy stan średni, niższy od NPP o 36 cm, który wyniósł 265 cm, stwierdzono we wrześniu tego roku (ryc. 9). Duży wpływ na taką sytuację mogły mieć niskie sumy opadów w sierpniu i wrześniu, wyższe w tych miesiącach temperatury powietrza i wysokie parowanie z powierzchni zbiornika, które łącznie w omawianym okresie wyniosło 336 mm.



Ryc. 9. Średnie miesięczne stany wody (cm) w zbiorniku Przebędowo oraz stany odpowiadające normalnemu (NPP) i maksymalnemu (Max PP) poziomowi piętrzenia, na tle miesięcznych sum opadów (P) i średnich miesięcznych temperatur powietrza (t) oraz miesięcznych wartości parowania z powierzchni zbiornika (E) w roku hydrologicznym 2018 (źródło: Waligórski i in. 2020)

Przeprowadzona charakterystyka składowych bilansu wodnego zbiornika Przebędowo w poszczególnych półroczach hydrologicznych analizowanych lat, pozwoliła stwierdzić, że w półroczach zimowych w największym stopniu o przychodach decydował dopływ do zbiornika ciekami Trojanka. W półroczu zimowym pierwszego roku badań (2017) wyniósł on $12,9 \text{ hm}^3$ a w tym samym okresie roku 2018 kształtował się na poziomie $5,16 \text{ hm}^3$ (tab. 5). W znacznie mniejszym stopniu o przychodach wody decydowały w półroczach zimowych analizowanych lat takie składowe jak opad atmosferyczny na powierzchnię zbiornika oraz dopływ powierzchniowy z terenów przyległych. Wielkości te wyniosły odpowiednio $0,03 \text{ hm}^3$ i $0,165 \text{ hm}^3$ (2017) oraz $0,027 \text{ hm}^3$ i $0,0025 \text{ hm}^3$ (2018). Natomiast po stronie ubytków wody największy udział w równaniu bilansowym zbiornika miał odpływ ciekami Trojanka. W półroczu zimowym pierwszego analizowanego roku badań (2017) kształtował się on na poziomie 10 hm^3 , a w drugim omawianym półroczu zimowym (2018) osiągnął wartość $3,75 \text{ hm}^3$. W mniejszym stopniu o ubytkach decydowały, w omawianych półroczach, takie składowe jak odpływ ze zbiornika do przyległych terenów oraz przyjęty jako dopełnienie do równania bilansowego niekontrolowany odpływ wgłębny. W badaniach Grześkowiaka i in. (2010) na obiekcie Jezioro Ostrowiec, Autorzy również wykazali że składowa bilansu związana z odpływem wgłębnym nie decydowała w sposób znaczny o bilansie analizowanego zbiornika.

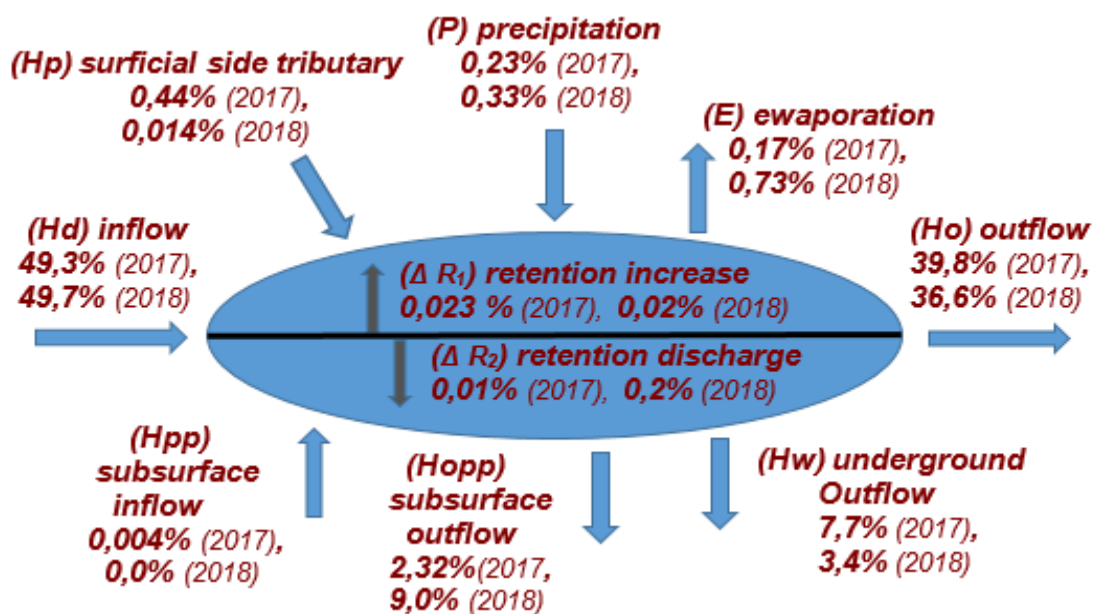
Tabela 5. Składowe bilansu wodnego zbiornika Przebędowo (hm^3) w zimowych (XI-IV) i letnich (V-X) półroczach hydrologicznych 2017 i 2018 (źródło: Waligórski i in. 2020)

Przychody (+) i ubytki wody (-)	Składowe bilansu	Półrocza hydrologiczne			
		2017		2018	
		XI-IV	V-X	XI-IV	V-X
(+)	P	0,03	0,08	0,027	0,032
	Hd	12,9	10,7	5,16	3,59
	Hp	0,165	0,047	0,0025	-
	Hpp	0,0015	0,0002	-	-
	ΔR_1	-	0,011	-	0,004
(-)	E	0,02	0,06	0,03	0,098
	ΔR_2	0,0048	-	0,036	-
	Ho	10,0	9,06	3,75	2,70
	Hopp	0,56	0,55	0,81	0,78
	Hw	2,51	1,16	0,55	0,046

W pierwszym analizowanym półroczu zimowym (2017), odpływ podpowierzchniowy ze zbiornika do przyległych terenów wyniósł $0,56 \text{ hm}^3$, a w drugim osiągnął wartość $0,81 \text{ hm}^3$. Natomiast odpływ wgłębny kształtował się w charakteryzowanych półroczach na poziomie odpowiednio $2,51 \text{ hm}^3$ i $0,55 \text{ hm}^3$. W najmniejszym stopniu o bilansie decydowały w analizowanych półroczach takie składowe jak parowanie z powierzchni zbiornika oraz ubytki retencji. Natomiast w półroczach letnich analizowanych lat, czynnikiem wiodącym po stronie przychodów podobnie jak w półroczach zimowych był dopływ do zbiornika ciekami. W półroczu letnim 2017 wyniósł on $10,7 \text{ hm}^3$, a w półroczu letnim 2018 kształtował się na poziomie $3,59 \text{ hm}^3$. Należy jednak podkreślić, że zasilanie zbiornika ciekami Trojanka było w półroczach letnich mniejsze od tej składowej z półroczu zimowych odpowiednio o $2,2 \text{ hm}^3$ (2017) i $1,57 \text{ hm}^3$ (2018). W znacznie mniejszym stopniu w analizowanych półroczach o bilansie wodnym zbiornika decydowało zasilanie opadem atmosferycznym, które wyniosło odpowiednio $0,08 \text{ hm}^3$ (2017) oraz $0,032 \text{ hm}^3$ (2018). Znikomy wpływ na kształtowanie się bilansu miały również przyrosty retencji, które w omawianych półroczach wyniosły odpowiednio $0,011 \text{ hm}^3$ i $0,04 \text{ hm}^3$. Dopływ powierzchniowy do zbiornika dwoma rowami melioracyjnymi (A i B, ryc. 6) stwierdzono tylko w pierwszym analizowanym półroczu letnim, w którym jego wartość wyniosła $0,047 \text{ hm}^3$. Po stronie ubytków w omawianych półroczach, podobnie jak w półroczach zimowych, największą rolę odgrywał odpływ ze zbiornika ciekami. W półroczu letnim 2017 był on jednak mniejszy od tej wartości z półroczu zimowego tego roku o $0,94 \text{ hm}^3$, a w drugim omawianym półroczu (2018) był mniejszy o $1,05 \text{ hm}^3$ i wyniósł $2,7 \text{ hm}^3$. W mniejszym stopniu o ubytkach w omawianych półroczach letnich decydowały takie składowe bilansu jak odpływ podpowierzchniowy do przyległych terenów oraz odpływ

wgłębny. Warto podkreślić, że zasilanie wodami retencjonowanymi w zbiorniku wód gruntowych terenów przyległych było w półroczu letnim 2018 większe niż w pierwszym omawianym półroczu o 0,23 hm³. Większy charakter alimentacyjny zbiornika w tym półroczu potwierdził jedną z istotnych funkcji zbiorników retencyjnych (w tym zaporowych), jaką jest zasilanie wód gruntowych terenów przyległych szczególnie w okresach posusznych. Uzyskane w odniesieniu do zasilania wodami zbiornika wód gruntowych terenów przyległych, w omawianych półroczach letnich, wyniki były zbieżne między innymi z wynikami badań Humnickiego (2010) oraz Jaguś i in. (2010) przeprowadzonych na obiektach Zbiornik Czorsztyński oraz zbiornikach na rzece Angarze, w których Autorzy podkreślali również pozytywne oddziaływanie analizowanych zbiorników w aspekcie zasilania wód gruntowych. Natomiast w najmniejszym stopniu o ubytkach w równaniu bilansowym zbiornika decydowało w tych półroczach parowanie z jego powierzchni, które wyniosło 0,06 hm³ (2017) i 0,098 hm³ (2018).

W skali całych analizowanych lat hydrologicznych, podobnie jak w ich poszczególnych półroczach, o bilansie wodnym zbiornika decydowały czynniki poziomej wymiany wody, takie jak dopływ do zbiornika i odpływ. W analizowanych latach wielkości te stanowiły odpowiednio 49,3% i 39,8% oraz 49,7% i 36,6% bilansu (ryc. 10).



Ryc. 10. Graficzne przedstawienie składowych bilansu wodnego (%) zbiornika Przebędowo w latach hydrologicznych 2017 i 2018 (źródło: Waligórski i in. 2020)

Otrzymane w omawianych latach wyniki potwierdziły między innymi wyniki badań Rzętały (2000) przeprowadzone na zbiorniku Dzierżno Duże, Gierszewskiego (2006)

i Grześkowiaka i in. (2010) w analizie bilansów wodnych zbiorników Włocławskiego i Ostrowiec oraz Machowskiego i Rzętały (2020) na zbiorniku Dzieńkowice. Uzyskane przez tych Autorów wyniki badań wykazały również, że czynnikami wiodącymi w kształtowaniu się bilansów wodnych analizowanych zbiorników były dopływ i odpływ. Mniejszą rolę w równaniach bilansowych odgrywały natomiast według tych Autorów takie czynniki jak opad atmosferyczny na powierzchnię zbiornika, parowanie czy zmiany retencji.

Pełny opis wyników przedstawiono w publikacji P2:

Waligórski B., Korytowski M., Zydrón A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. 2020. The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, s.: 324-346

W publikacji P2 zrealizowano cel szczegółowy rozprawy doktorskiej:

C2) Charakterystykę poszczególnych składowych bilansu wodnego zbiornika w kontekście oceny czynników wiodących.

Ponadto w publikacji P2 zweryfikowano hipotezę badawczą:

H2) W bilansie wodnym zbiornika, decydującą rolę odgrywają czynniki poziomej wymiany (dopływ i odpływ), natomiast czynniki wymiany pionowej (opady atmosferyczne i parowanie z powierzchni zbiornika) mają znaczenie marginalne.

5.3. Wpływ funkcjonowania zbiornika na jakość wody w rzece Trojanka.

Zbiorniki zaporowe odgrywają ważną rolę w kształtowaniu parametrów fizykochemicznych oraz składu chemicznego systemów rzecznych. Skład chemiczny dopływającej do zbiorników wody ulega zmianie podczas piętrzenia, a zmiany te można zaobserwować również poniżej zbiornika (Fairchild i Velinsky 2006, Gao i in. 2013 oraz Soja i Wiejaczka 2014). Jak podaje Palmer i O’Keeffe (1990) mniejsze zbiorniki powodują zazwyczaj niewielkie zmiany chemizmu wód. Równocześnie zmiany chemiczne wody spowodowane przez zbiorniki z górnym przelewem są mniejsze od zmian spowodowanych przez zbiorniki z odpływem dolnym (Wiejaczka i in. 2017).

Analiza parametrów decydujących o jakości wody może w dużej mierze przyczynić się do działań pozwalających na ograniczenie procesów eutrofizacji, które zachodzą bezpośrednio w samych zbiornikach, jak i poniżej ich lokalizacji, szczególnie na obszarach użytkowanych rolniczo. Według Matsona i in. (1997) oraz Górniak (2006), w odniesieniu do tego typu zbiorników ryzyko zwiększonej dostawy związków biogennych do wód powierzchniowych jest wyjątkowo duże, a w przypadku zbiornika zagrożonego szybką eutrofizacją już w drugim lub trzecim roku od jego powstania może dojść do pogorszenia się jakości wody. Dlatego w kontekście optymalnego funkcjonowania danego obiektu zachodzi konieczność prowadzenia ciągłego monitoringu retencjonowanych zasobów wodnych zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym.

W ocenie wpływu zbiorników zaporowych na jakość wód w cieku szczególnie poniżej piętrzenia niezwykle istotna jest charakterystyka wskaźników decydujących o warunkach tlenowych. Analizując parametry charakteryzujące warunki tlenowe, a konkretnie stężenie tlenu rozpuszczonego można stwierdzić, że średnie wartości tego wskaźnika w omawianych okresach wegetacyjnych analizowanych lat, na dopływie do zbiornika Przebędowo oraz w samym zbiorniku wyniosły odpowiednio $6,37 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ i $6,64 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (tab. 6, ryc. 11) i zgodnie z Rozporządzeniem (2019) zostały zakwalifikowane do II klasy jakości wód.

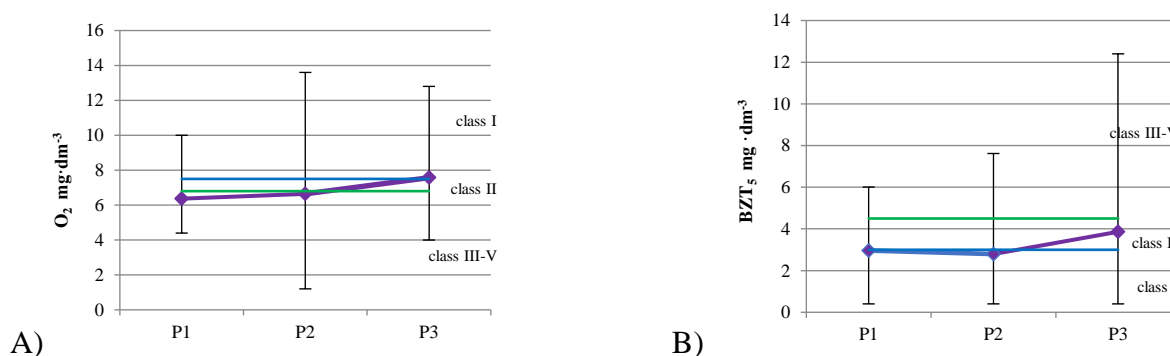
Tabela 6. Minimalne, maksymalne, średnie oraz mediany wskaźników fizyko-chemicznych wody w punktach pomiarowo-kontrolnych rzeki Trojanki w okresach wegetacyjnych lat 2016-2018.

(źródło: Waligórski, Janicka 2021)

Wskaźnik	Punkty pomiarowo-kontrolne		
	Dopływ (P1)	Zbiornik (P2)	Odpływ (P3)
/1/	/2/	/3/	/4/
Tlen rozpuszczony O ₂ (mg · dm ⁻³)	4,4-10 6,37 (6,10)	1,2-13,6 6,64 (6,32)	4,0-12,8 7,57 (6,81)
Biochemiczne zapotrzebowanie na tlen, BZT ₅ (mg · dm ⁻³)	0,4-6,01 2,96 (2,65)	0,4-7,62 2,79 (2,28)	0,4-12,4 3,86 (3,11)
Odczyn pH	6,78-9,66 8,48 (8,75)	7,12-9,54 8,59 (8,75)	7,32-9,17 8,52 (8,68)
Wapń Ca (mg · dm ⁻³)	84,0-140,0 111,33 (116,0)	76,0-140,0 108,0 (108,0)	88,0-140,0 110,11 (110,0)
Magnez Mg (mg · dm ⁻³)	4,86-21,89 13,78 (14,59)	7,30-19,46 13,24 (12,16)	9,73-24,32 14,59 (13,38)
Chlorki Cl (mg · dm ⁻³)	20,0-45,0 34,72 (35,0)	20,0-50,0 35,14 (35,0)	30,0-60,0 39,86 (40,0)
Azot azotanowy (V) N-NO ₃ (mg · dm ⁻³)	0,02-7,6 1,49 (1,05)	0,02-4,1 1,06 (0,9)	0,02-3,4 1,01 (0,85)
Azot azotanowy (III) N-NO ₂ (mg · dm ⁻³)	0,005-0,09 0,05 (0,05)	0,005-0,15 0,03 (0,025)	0,01-0,09 0,04 (0,02)
Azot amonowy N-NH ₄ (mg · dm ⁻³)	0,01-0,15 0,04 (0,04)	0,01-0,12 0,03 (0,01)	0,01-0,14 0,04 (0,01)
Siarczany (VI) SO ₄ ²⁻ (mg · dm ⁻³)	81,48-145,26 115,4 (123,45)	78,19-145,67 111,85 (114,5)	85,59-140,32 113,39 (118,51)
Fosfor fosforanowy (V) P-PO ₄ (mg · dm ⁻³)	0,01-0,25 0,08 (0,05)	0,01-0,34 0,08 (0,02)	0,01-0,38 0,10 (0,07)
Przewodność elektrolityczna EC (μS · cm ⁻¹)	402,0-714,0 565,22 (555,0)	426,0-674,0 519,22 (514,0)	447,0-725,0 556,94 (548,5)

Natomiast na odpływie ze zbiornika warunki tlenowe uległy poprawie, gdyż średnia wartość tlenu rozpuszczonego wyniosła 7,57 mg·dm⁻³ i wody pod względem tego wskaźnika zostały sklasyfikowane w I klasie jakości (ryc. 11A). Zwiększenie zawartości tlenu rozpuszczonego na odpływie ze zbiornika, oscylujące w granicach 1 mg·dm⁻³, mogło być efektem dyfuzji cząsteczek tlenu atmosferycznego zachodzącej na przelewie górnym budowli upustowej. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że zbiornik Przebędowo wpływa na poprawę jakości stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie poniżej budowli piętrzącej. Podobne

wyniki uzyskali Krzemińska i in. (2006) w badaniach przeprowadzonych na rzece Smortawie w których Autorzy podkreślali, że poniżej budowli piętrzącej wartości stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie były wyższe. Natomiast odmienne wyniki uzyskali Bogdał i in. (2015) na obiekcie Zbiornik Goczałkowicki, gdzie średnie wartości stężenia tlenu rozpuszczonego na odpływie były niższe aniżeli na dopływie o $1,05 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Według tych Autorów przyczynę tak niskiego stężenia tlenu w wodzie odpływającej ze zbiornika należało upatrywać w zakwicie sinic.



Ryc. 11. Średnie wartości tlenu rozpuszczonego (A) oraz BZT₅ (B) w wodach rzeki Trojanki i zbiornika Przebędowo, w trzech punktach pomiarowo-kontrolnych, w okresach wegetacyjnych lat 2016-2018 (źródło: Waligórski, Janicka 2021)

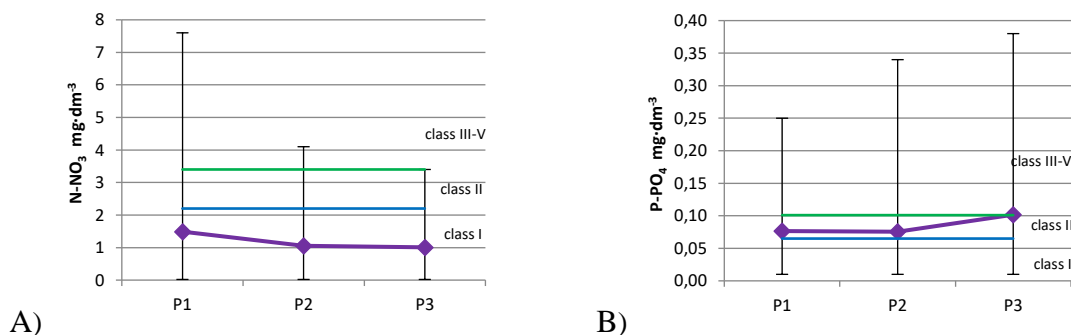
Niezwykle istotnym wskaźnikiem, który charakteryzuje warunki tlenowe jest również biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT₅). Analiza tego wskaźnika pozwoliła stwierdzić, że w omawianym okresie jego wartości na dopływie wahały się od $0,4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ do $6,01 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a średnia wyniosła $2,96 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, co pozwoliło sklasyfikować wody w I klasie jakości (ryc. 11B). Natomiast na odpływie ze zbiornika stwierdzono pogorszenie się jakości wody pod względem tego wskaźnika, gdyż jego wartość wahała się od $0,4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ do $12,4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a średnia wyniosła $3,86 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, co w omawianych okresach wegetacyjnych pozwoliło zakwalifikować wody do II klasy. Zbliżone wyniki badań uzyskali Kanclerz i in. (2014) na zbiorniku zaporowym Stare Miasto, w których Autorzy wykazali również, że procesy zachodzące w analizowanym zbiorniku wpłynęły na pogorszenie się jakości wód pod względem BZT₅, którego wartość na odpływie klasyfikowała wody do klasy II. W obu przypadkach wzrost analizowanego wskaźnika może wiązać się z nagromadzeniem materii organicznej, będącej naturalną konsekwencją wzrostu produkcji biologicznej. Natomiast odmienne wyniki uzyskał Mazur (2013) na zbiorniku usytuowanym na rzece Por, gdzie wartość BZT₅ wahała się od $1,61 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ do $7,33 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ na dopływie do zbiornika i zasadniczo ulegała obniżeniu na odpływie, co świadczyło o dalszej poprawie jakości wód po przejściu

przez zbiornik. Autor ten podkreślał również, że tego typu sytuacja mogła być spowodowana intensywnym wzrostem makrofitów w początkowej fazie funkcjonowania zbiornika.

Wyniki wieloletnich badań wykazały, że głównym źródłem zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych są substancje biogenne tzn. związki azotu i fosforu występujące licznie w nawozach sztucznych, które są odpowiedzialne za zjawisko eutrofizacji, metale ciężkie powodujące silne skażenie wód oraz zanieczyszczenia organiczne pochodzące z produktów powszechnie stosowanych (Bieroński 2005, Adamczyk i Jachimowski 2012 oraz Othman i in., 2019).

Pierwszym parametrem charakteryzującym substancje biogenne, poddanym analizie na omawianym obiekcie Przebędowo, był azot azotanowy (V). Jest on formą azotu niewiązaną przez kompleks sorpcyjny gleb i dlatego łatwo ulega wymyciu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz stwierdzono, że wartość średnia omawianego wskaźnika na dopływie do zbiornika wynosiła $1,49 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, w samym zbiorniku kształtowała się na poziomie $1,06 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a na odpływie osiągnęła wartość $1,01 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ co pozwoliło zakwalifikować wody pod względem tego parametru do klasy I jakości (ryc. 12A). Analizowany zbiornik wpłynął na obniżenie badanego parametru i przyczynił się do poprawy jakości wód poniżej budowli piętrzącej. Można stwierdzić, że w dużej mierze o takiej sytuacji mogło decydować funkcjonowanie stref ekotonowych zlokalizowanych wzdłuż obu brzegów zbiornika. Wieloletnie badania wykazały, że powstałe w ten sposób strefy buforowe skutecznie ograniczają zasilanie zbiornika związkami biogennymi ze źródeł obszarowych (Bis i in. 1997, Chmielewski i Kułak 2016, Valkama i in. 2018). Według Gizińskiego i Falkowskiej (2003) oraz Ławniczak i in. (2006) tego typu strefy oraz odpowiadające im dezaktywujące substancje biogenne – naturalne bariery biologiczne w postaci planowo rozwijających się struktur makrofitowych, w znacznym stopniu mogą wpływać na korzystny dla cieków bilans azotanów. Bariery makrofitowe, obok bezpośredniej absorpcji nutrientów, zapewniają też stabilizację osadów dennych i ograniczenie zasilania wtórnego w procesie resuspensji (Obarska-Pempkowiak 2005). Uzyskane w odniesieniu do tego parametru wyniki były w dużej mierze porównywalne, z wynikami badań przeprowadzonymi przez Bogdała i in. (2015) na obiekcie zbiornik Goczałkowicki oraz Szatyłowicz i in. (2013) na obiekcie zbiornik Topiło, a także Kosteckiego i in. (2020) na zbiorniku zaporowym „Blachownia”, w których średnie wartości omawianego wskaźnika również były niższe na odpływie ze zbiornika, niż na jego dopływie i mieściły się w I klasie jakości wód. Natomiast odmienne wyniki badań w odniesieniu do omawianego parametru uzyskali Szczykowska i in. (2013) prowadząc badania w trzech małych zbiornikach retencyjnych (Korycin, Otapy-Kiersnówek, Jasionówka) oraz Berleć i in. (2013)

na obiekcie jezioro Jelonek. Autorzy w swoich badaniach wykazali, że próbki wody pochodzące z punktów pomiarowo-kontrolnych zlokalizowanych na odpływie w większości przypadków charakteryzowały się wyższymi stężeniami azotanu azotanowego (V), niż na dopływie wody do zbiorników.



Ryc. 12. Średnie wartości azotu azotanowego (V) - A, fosforu fosforanowego (V) – B w wodach rzeki Trojanki i zbiornika Przebędowo, w trzech punktach pomiarowo-kontrolnych, w okresach wegetacyjnych lat 2016-2018 (źródło: Waligórski, Janicka 2021)

Natomiast uzyskane wyniki badań w odniesieniu do fosforu fosforanowego (V) (ryc. 12B) pozwoliły stwierdzić, że zbiornik nie przyczynił się do poprawy jakości wody w cieku Trojanka, poniżej budowli piętrzącej. Jak podaje Pawełek i Spytek (2005), fosforany w wodach powierzchniowych najczęściej pochodzą z erozji gleb, dopływu ścieków, rozpuszczania wszelkiego rodzaju minerałów, jak również z opadów atmosferycznych. Średnie wartości fosforanów zarówno na dopływie do zbiornika Przebędowo, jak i w samym akwenu wynosiły 0,08 mg·dm⁻³, natomiast na odpływie z analizowanego zbiornika stężenie tych związków było nieco wyższe i wyniosło 0,10 mg·dm⁻³ (ryc. 12B), co pod względem tego parametru pozwoliło zakwalifikować wodny do II klasy jakości wód. Maksymalne wartości w odniesieniu do omawianych związków wyniosły na dopływie do zbiornika 0,25 mg·dm⁻³, w samym zbiorniku osiągnęły wartość 0,34 mg·dm⁻³, a na odpływie kształtowały się na poziomie 0,38 mg·dm⁻³ (tab. 6). Wyższe wartości fosforanów stwierdzone na odpływie ze zbiornika w dużej mierze mogą być determinowane typowo rolniczym użytkowaniem terenów w jego zlewni bezpośredniej, co mogło wpływać na jakość wody w cieku poniżej lokalizacji zbiornika. Zbliżone wyniki badań uzyskał Bieroński (2005) na zbiorniku Kobyła Góra oraz Bus i Mosiej (2018) na kompleksie zbiorników na rzece Cetyni, Autorzy w swoich wynikach również podkreślali zwiększone wartości fosforanów na odpływie ze zbiorników.

Należy stwierdzić, że uzyskane w odniesieniu do zbiornika Przebędowo wyniki badań dotyczące fosforanów były nieco odmienne w odniesieniu do badań przeprowadzonych

w innych regionach kraju. Zarówno Wiatkowski (2013) na obiekcie zbiornik Michalice na rzece Widawie, Kanclerz i in. (2015) na obiekcie Jezioro Gorzuchowskie oraz Morczewska-Majkut i in. (2022) na obiekcie zbiornik Słupsko w swoich badaniach podkreślali, że zbiorniki retencyjne zazwyczaj przyczyniają się do poprawy jakości wody na cieku pod względem substancji biogenych, w tym również fosforanów poniżej urządzenia piętrzącego.

W celu oceny istotności różnic pomiędzy dwoma punktami pomiarowo-kontrolnymi P1 i P3 wykonano test U Manna-Whitneya (nieparametryczny odpowiednik testu t-Studenta). Przeprowadzona analiza statystyczna testem U Manna-Whitneya mająca na celu wykazanie istotności różnic w wartościach wskaźników między punktami pomiarowo-kontrolnymi, pozwoliła stwierdzić, że wartości tylko dwóch analizowanych składników (tlen rozpuszczony oraz chlorki) różniły się istotnie między punktami pomiarowo-kontrolnymi (tab. 7). Statystycznie wyższe wartości tlenu rozpuszczonego w wodzie i chlorków stwierdzono w punkcie 1 (dopływ) w porównaniu do punktu 3 (odpływ).

Tabela 7. Porównanie wartości wskaźników jakości wody pomiędzy punktami pomiarowo-kontrolnymi P1 i P3 Zbiornika Przebędowo – test nieparametryczny Manna-Whitneya*
(źródło: Waligórski, Janicka 2021)

Wskaźnik	Jednostki	Mediana punktów		Test statystyczny, <i>p</i>
		Dopływ (P1)	Odpływ (P3)	
Tlen rozpuszczony O₂	(mg O ₂ · dm ⁻³)	6.10	6.81	0.037
Biochemiczne zapotrzebowanie na tlen BZT ₅	(mg O ₂ · dm ⁻³)	2.65	3.11	0.734
Odczyn	pH	8.75	8.68	0.518
Wapń Ca	(mg · dm ⁻³)	116.00	110.00	0.786
Magnez Mg	(mg · dm ⁻³)	14.59	13.38	0.738
Chlorki Cl	(mg · dm ⁻³)	35.00	40.00	0.020
Azot azotanowy (V) N-NO ₃	(mg · dm ⁻³)	1.05	0.85	0.459
Azot azotanowy (III) N-NO ₂	(mg · dm ⁻³)	0.05	0.02	0.387
Azot amonowy N-NH ₄	(mg · dm ⁻³)	0.04	0.01	0.462
Siarczany (VI) SO ₄ ²⁻	(mg · dm ⁻³)	123.45	118.51	0.707
Fosfor fosforanowy (V) P-PO ₄	(mg · dm ⁻³)	0.05	0.07	0.653
Przewodność elektrolityczna EC	(μS · cm ⁻¹)	555.00	548.50	0.460

*Wartości statystyczne zaznaczone na czerwono oznaczają różnice istotne statystycznie przy *p* < 0,05

W badaniach przeprowadzonych przez Bus i Mosieja (2018), w odniesieniu do kompleksu zbiorników zlokalizowanych na rzece Cetyni, przeprowadzona analiza statystyczna

testem U Manna Whitneya wykazała istotne różnice dla P-PO₄ oraz dla BZT₅. W odniesieniu do pozostałych analizowanych przez tych Autorów parametrów stwierdzone różnice nie były istotne statystycznie. Natomiast ocena parametrów charakteryzujących jakość wody na zbiorniku Mściwojów przeprowadzona przez Dąbrowską i Markowską (2012) wraz z analizą statystyczną wykazała istotne różnice tylko dla azotanów oraz przewodności elektrolitycznej. Istotnie statystyczne różnice w odniesieniu do tych parametrów wykazano dla punktów pomiarowych na dopływie i odpływie.

Pełny opis wyników przedstawiono w publikacji P3:

Waligórski B., Janicka E., 2021. The Influence of the Przebędowo Reservoir on the Water Quality of the Trojanka River in the First Years of its Functioning. Rocznik Ochrona Środowiska, Volume 23, s.:151-167.

W publikacji P3 zrealizowano cel szczegółowy rozprawy doktorskiej:

C3) Określenie wpływu zbiornika na jakość wody w rzece Trojanka poniżej budowli upustowej w okresach wegetacyjnych analizowanych lat hydrologicznych.

Ponadto w publikacji P3 zweryfikowano hipotezę badawczą:

H3) Zbiornik Przebędowo pozytywnie wpływa na jakość wody w rzece Trojanka poniżej budowli upustowej.

6. Wnioski oraz podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące główne wnioski:

1. Analiza przebiegu rzędnych zwierciadła wody w zbiorniku Przebędowo i wód gruntowych w terenie przyległym pozwoliła stwierdzić, że przez większą część analizowanych lat hydrologicznych retencjonowane w omawianym zbiorniku wody zasilają wody gruntowe. Jednocześnie w okolicach środkowej części zbiornika stwierdzono dwukierunkowy przepływ wód, gdzie zbiornik poza rolą alimentacyjną pełnił również funkcję drenującą.
2. Uzyskane dla analizowanych półroczy zimowych i letnich omawianych lat hydrologicznych obliczenia związków pomiędzy rzędnymi stanów wody w zbiorniku, a rzędnymi zwierciadła wód gruntowych w badanych studzienkach wykazały w większości silne zależności, statystycznie istotne na poziomie $\alpha = 0,01$.
3. Przeprowadzona analiza bilansu wodnego zbiornika Przebędowo wykazała, że w skali całych analizowanych lat hydrologicznych 2017 i 2018 największy udział w bilansie wodnym miały składowe związane z poziomą wymianą wody. Dopływy do zbiornika ciekami Trojanka oraz odpływy stanowiły średnio około 49% i 38% bilansu.
4. Przeprowadzone badania dotyczące parametrów charakteryzujących jakość wody, szczególnie w odniesieniu do średnich wartości parametrów fizykochemicznych wykazały, że wody rzeki Trojanki zarówno na dopływie do zbiornika jak i na odpływie sklasyfikowano do stanu ekologicznego poniżej dobrego. Pozwoliło to stwierdzić, że wpływ zbiornika Przebędowo na zmiany jakości wody w rzece Trojanka, poniżej budowli upustowej, nie jest jednoznaczny.
5. Uzyskane wyniki badań wykazały pozytywny wpływ zbiornika w odniesieniu do kształtowania się warunków tlenowych na odpływie, szczególnie w kontekście stężenia tlenu rozpuszczonego. W tym punkcie pomiarowo kontrolnym stwierdzono również zmniejszenie stężenia azotu azotanowego (V) oraz azotu azotanowego (III).
6. Można stwierdzić, że w odniesieniu do analizowanego zbiornika Przebędowo, który jest stosunkowo młodym obiektem, przy prawidłowo funkcjonujących strefach buforowych i naturalnych barierach biochemicznych oraz z zachowaniem wyłącznie górnego upustu wód może on, w kolejnych latach funkcjonowania,

wpływać na poprawę parametrów charakteryzujących jakość wody w rzece Trojanka poniżej budowli upustowej.

Bardziej szczegółowe wnioski zostały wskazane w opublikowanych artykułach stanowiących część niniejszej rozprawy doktorskiej, a które są dołączone w punkcie 8 niniejszego autoreferatu.

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy jednego z aktualnych wyzwań przed jakimi na obszarze naszego kraju stoją sektory rolnictwa, leśnictwa czy energetyki, w kontekście pogłębiających się deficytów wody. Przedstawione w pracy wyniki badań mogą wnieść istotny wkład do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych i dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka poprzez zwiększenie stanu wiedzy o funkcjonowaniu zbiorników zaporowych, w pierwszych latach ich eksploatacji. Przeprowadzone w pracy badania i analizy uwzględniające charakterystykę zbiornika zarówno w kontekście hydrologicznym jak i ekologicznym mogą stanowić przyczynek do podejmowania, w szerszym zakresie na obszarze naszego kraju, tego typu badań na nowo powstałych zbiornikach zaporowych. Kontynuacja i prowadzenie dalszych badań na tego typu obiektach, których alimentacyjna rola w znacznym stopniu przyczynia się do poprawy bilansów wodnych ich zlewni bezpośrednich, jest również istotne w kontekście pojawiających kontrowersji (Kornijów 2011) dotyczących słuszności realizacji tego typu zbiorników.

Przedstawione w pracy wyniki badań wpisują się w cel nadrzędny Polityki wodnej państwa (Projekt...2011), w której jako priorytet, do roku 2030, wymienia się między innymi istotne ograniczenie zagrożeń wywołanych przez powodzie i susze, zwiększenie retencji a także minimalizowanie ryzyka wystąpienia sytuacji nadzwyczajnych, w powiązaniu z utrzymaniem dobrego stanu wód i związanych z nimi ekosystemów. Jednocześnie biorąc pod uwagę fakt, iż na podstawie badań naukowych i szerokich konsultacji społecznych powstał pierwszy w Polsce, opracowany przez Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie, Plan przeciwdziałania skutkom suszy (PPSS, 2021), zakładający szerokie działania z zakresu retencji krajobrazowej, leśnej, jeziornej oraz zbiornikowej, prowadzenie badań dotyczących funkcjonowania zbiorników zaporowych w pierwszych latach eksploatacji, wydaje się być szczególnie istotne.

7. Literatura

1. Adamczyk W., Jachimowski A. (2012): Eutrofizacja wód powierzchniowych kierowanych do uzdatnienia. *JEcolHEalth*, vol. 16, nr 2, kwiecień-czerwiec 2012.
2. Bajkiewicz-Grabowska E. (2007): Jeziorne ogniwa sieci hydrograficznej obszarów młodogłacjalnych i ich rola w kształtowaniu odpływu rzeki pojeziernej. [w:] *Obieg wody w środowisku naturalnym i przekształconym*. Wyd. UMCS, Lublin, 39-46.
3. Baścik M. (2006): Elementy bilansu wodnego. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 251-252.
4. Bem B., Kaca E. (2003): Uwarunkowania obiegu i retencjonowania wody w Rezerwacie Przyrody „Stawy Raszyńskie”. *Woda-Środowisko-Obszary wiejskie 2003: t. 3 z. specj. (6) s. 85–95*
5. Bashar K.E., Mustafa M.O. (2009): Water Balance Assessment of the Roseires Reservoir. Intermediate Result Dissemination Workshop. February 5-9, 2009, Addis Ababa, Ethiopia.
6. Berleć K., Traczykowski A., Budzińska K., Szejniuk B., Michalska M., Jurek A., Tarczykowska M., Klimczak I. (2013): Skuteczność rekultywacji jeziora Jelonek na podstawie wybranych fizycznych i chemicznych parametrów wody. *Rocznik Ochrona Środowiska*. Tom 15, 1336 – 1351.
7. Biedrzycka A. (2021): Budownictwo hydrotechniczne w Polsce. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, nr 6 (99), s.: 75-87
8. Bieroński J. (2005): Zbiorniki małej retencji – problemy funkcjonowania. *Struktura przestrzenno-funkcjonalna krajobrazu*, Vol. 17, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 101–110
9. Bis B., Krauze K., Bednarek A., Zalewski M., (1997): Ekologiczne podstawy renaturyzacji rzek pod kontem redukcji transportu biopierwiastków do zbiorników zaporowych i wód przybrzeżnych. [w] Zalewski M., Wiśniewski R. J. (eds.) *Zastosowanie biotechnologii ekosystemowych do poprawy jakości wód*. *Zeszyty Naukowe Komitetu „Człowiek i Środowisko”* 18, 137–155.
10. Błachuta J., Kamiński W., Kowalczak P., Rosa J., Zgrabczyński J. (2011): *Podręcznik dobrych praktyk w gospodarce wodnej na terenach nizinnych – wybrane zagadnienia*. Poznań. RDOŚ pp. 88

11. Błażejewska-Murat S., Kanclerz J., Sojka M. (2005): Zmienność stanów wód gruntowych i powierzchniowych w zlewni rzeki Małej Wełny w latach hydrologicznych 2000-2004. *Inżynieria Ekologiczna* nr 12, Warszawa, s. 55-56
12. Bogdał A., Kowalik T., Witoszek K. (2015): Wpływ Zbiornika Goczałkowickiego na zmiany jakości wód w rzece Wiśle. *Inżynieria Ekologiczna*. Vol. 45, 2015, p.124-134.
<https://doi.org/10.12912/23920629/60605>
13. Bus A., Mosiej J. (2018): Kształtowanie jakości wody odpływającej i dopływającej z kompleksu zbiorników Niewiadoma zlokalizowanego na rzece Cetyni. *Rocznik Ochrony Środowiska* Vol. 20, 1793-1810.
14. Chalfen M., Czamara A. (2007): Wpływ projektowanego zbiornika małej retencji na stany wód podziemnych w jego otoczeniu. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 6 (4), s. 3-16
15. Charakterystyka Regionu Wodnego Warty. 2017. Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu, Pion Zasobów Wodnych, s. 1-65
16. Chmielewski T. J., Kułak A., (2016): Ekotony w Krajobrazie i Krajobraz Ekotonów: Nowe Wyzwania dla Uznanej Koncepcji. *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*. Nr 31/2016: 25-42.
17. Choiński A. (1995): *Zarys limnologii fizycznej Polski*. Wyd. Nauk. UAM. Poznań, ss. 298
18. Dembek W., Kuś J., Wiatkowski M., Żurek G. (2016): Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wodnymi w rolnictwie. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie.
19. Dąbrowska J., Markowska J. (2012): Wpływ zbiornika wstępnego na jakość wód retencjonowanych w zbiorniku Mściwojów. *Nauka Przyr. Technol.*, 6, 2, #37
20. Fairchild G.W., Velinsky D.J. (2006): Effects of small ponds on stream water chemistry, *Lake and Reservoir Management*, 22, s. 321-330.
<https://doi.org/10.1080/07438140609354366>
21. Fowe T., Karambiri H., Paturel J.-E., Poussin J.-C., Cecchi P. (2015): Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*. Vol. 152, April 2015, pages 99-109.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006>
22. Filipowicz B., Sobkowiak J. (2007): Procesy sufozyjne – w jakiej sytuacji mogą wystąpić, *Mat. Konf. „Ekologia aBudownictwo”*, Bielsko-Biała 2007, /geotechnika.edu.pl/publikacje/bielsko-biala-2007-procesy-sufozyjne.pdf

23. Friedl G., Wüest A. (2002): Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming, *Aquat. Sci.*, 64, 55–65, 2002
<https://doi.org/10.1007/s00027-002-8054-0>
24. Galicka W., Kruk A., Zięba G. (2007): Bilans azotu i fosforu w zbiorniku Jeziorsko. *Nauka Przyr. Technol.* 1, 2, #17
<https://doi.org/10.17512/ios.2016.1.10>
25. Gao Y. Wang B., Liu X., Wang Y., Zhang J., Jiang Y., Wang F. (2013): Impacts of river impoundment on the riverine water chemistry composition and their response to chemical weathering rate, *Frontiers of Earth Science*, 7, s. 351-360.
<https://doi.org/10.1007/s11707-013-0366-y>
26. Gierszewski P.(2006): Intensywność wymiany wody w zbiorniku wrocławskim. PAN Warszawa. Dokumentacja Geograficzna nr 32, s.: 64-69.
27. Giziński A., Falkowska E. (2003): Hydrobiologia stosowana: ochrona wód powierzchniowych. Wyższa Szkoła Humanistyczno-Ekonomiczna, Włocławek.
28. Głowski R., Parzonka W. (2007): Eksploatacja i oddziaływanie zbiornika Brzeg Dolny na rzece Odrze. *Nauka Przyr. Technol.* 1, 2, #19
29. Górniak A. (2006): Ekosystem zbiornika Siemianówka w latach 1994-2004 i jego rekultywacja. Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, Białystok.
30. Grajewski S., Pacholczyk K. (2011): Charakterystyka warunków meteorologicznych Puszczy Zielonka w latach 1986-2010. *Forestry Letters, Agricultural Letters, PTPN, Wydz. Nauk Rolniczych i Leśnych, Prace Kom. Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych*, t. 102: 59-78.
31. Grześkowiak A., Jańczak J., Sziwa R. (2010): Hydrologia i jakość wody jeziora Ostrowiec w Drawieńskim Parku Narodowym. *Polskie Towarzystwo Geofizyczne w Warszawie*, s.: 55-64.
32. Grzywna A., Kowalczyk-Juśko A., Józwiakowski K. (2017): The changes of surface and ground water level on the effect of regulated outflow. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW*. No 49(4), 2017: 269-276.
<https://doi.org/10.1515/sggw-2017-0021>
33. Gurwin J. (2010): Zagrożenie wód podziemnych w ocenie oddziaływania na środowisko planowanej renaturalizacji zbiornika retencyjnego Turawa. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 440: 65-76.

34. Gurwin J. (2020): Ocena stanu ekologicznego Jeziora Turawskiego w celu opracowania działań na rzecz jego poprawy. Oficyna Wydawnicza ATUT – Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe. Wrocław 2020.
35. Gutry-Korycka M., Bajkiewicz-Grabowska E. (1981): Rola jezior w naturalnym drenażu podziemnym. *Przegląd Geofizyczny*. T. 26, z. 3, s. 171-179
36. Hem J.D. (1985): Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waterm 2254, Department of the Interior, US Geological Survey.
<https://doi.org/10.3133/wsp2254>
37. Humnicki W. (2010): Zmiany warunków hydrogeologicznych wokół zbiorników zaporowych w Pieninach. *Pieniny – Zapora – Zmiany — Monografie Pienińskie 2*: 83–95
38. Hussain A., Zaib K., Khalil J., Rahman U., Shang S., Ejaz N., et al. (2022): Analyzing the impact of drought on agriculture: evidence from Pakistan using standardized precipitation evapotranspiration index. *Nat. Hazards* 115, 389–408.
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05559-6>
39. Instrukcja gospodarowania wodą „Zbiornika małej retencji Przebędowo” (2009). Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska „BIPROWODMEL” Sp. z o.o.
40. IPCC. (2014), The fifth assessment report (AR5). The Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland
41. Jaguś A., Khak V., Kozyrera E., Rzętała M., Rzętała M, Szczypek T. (2010): Zmiany w środowisku wywołane spiętrzeniem wód rzeki Angary i jeziora Bajkał. *Wszecławiat*, t. 111, nr 10-12, s.: 265-271
42. Jasińska J. (2021): Przegląd metod zwiększania zasobów wodnych na obszarach z jej deficytem. *Tutoring Gedanensis* 6(2)/2021, s.: 54–58
<http://dx.doi.org/10.26881/tutg.2021.2.08>
43. Jöhnk, K. D., Huisman, J., Sharples, J., Sommeijer, B., Visser, P. M., & Stroom, J. M. (2008): Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 14(3), 495–512.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01510.x>
44. Kala R. (2002): Statystyka dla przyrodników. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Poznań, ss.231
45. Kampf S., Burges S.J. (2010): Quantifying the water balance in a planar hillslope plot: Effects of measurement errors on flow prediction. *Journal of Hydrology* 380(1-2): 191-202

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.036>

46. Kanclerz J., Wiatrowska K., Adamska A. (2015): Formy specjacyjne fosforu w wodach powierzchniowych w zlewni Jeziora Gorzuchowskiego. *Polish Journal of Agronomy*. 2015, 22, 10-17
- <https://doi.org/10.26114/pja.iung.249.2015.22.02>
47. Kanclerz J., Wicher-Dysarz J., Dysarz. T., Sojka M., Dwornikowska Ż.(2014): Wpływ Zbiornika Stare Miasto na jakość wody rzeki Powy. *Nauka Przym. Technol.* 8, 4, #54.
48. Kanownik W., Kowalik T., Bodgał A., Ostrowski K., Rajda Wł. (2011): Jakość i walory użytkowe wód odpływających ze zlewni zbiorników małej retencji planowanych w rejonie Krakowa. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu rozwojowego nr R12 001 02 sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego [Quality and utility value of water flowing from the catchment of planned small retention reservoirs near Kraków. Results of studies conducted within the R&D project no. R12 001 02 financed by the Ministry of Science and higher Education], pp. 36
49. Karasiewicz, M.T, Hulisz, P., Świtoniak, M. (2014): Wpływ procesów denudacji na właściwości osadów wypełniających zagłębienia między krętymi wałami z erozji wód subglacjalnych w okolicy Zbójna (Pojezierze Dobrzyńskie). *Landform Analysis*, Vol. 25, s.: 29-42.
- <http://dx.doi.org/10.12657/landfana.025.004>
50. Kasza H. (2009): Zbiorniki zaporowe. Znaczenie – eutrofizacja – ochrona. ATH, Bielsko-Biała, ss. 366
51. Kędziora A. (1995): Podstawy Agrometeorologii. PWRiL Poznań, ss.264.
52. Kostecki M., Pohl A., Kowalski E. (2020): Zbiornik zaporowy „Błachownia” Studium limnologiczne w aspekcie rekultywacji. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk. Zabrze 2020.
53. Kosturkiewicz A., Szafranski Cz., Czopor St., Korytowski M., Stasik R. (2001): Związki stanów wód w śródleśnych oczkach wodnych ze stanami wód gruntowych w przyległych siedliskach leśnych. Konferencja Naukowa „Funkcjonowanie geosystemów w zróżnicowanych warunkach morfoklimatycznych - monitoring, ochrona, edukacja”, Poznań, s. 237-250.
54. Kosturkiewicz A., Szafranski Cz., Fiedler M. (1996): Śródpolne oczka wodne w gospodarce wodnej meliorowanych terenów bogato urzeźbionych. *Przegląd Nauk. Wyzd. Melior. i Inż. Środ.* SGGW Warszawa, zesz. 11, s. 245-255.
55. Kondracki J. (2000): *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.

56. Korytowski M., Stasik R., Fiedler M. (2023): Zmiany składników bilansu wodnego śródlęśnych małych zbiorników wodnych w zlewni Proсны (środkowa Polska). *Przegląd Geograficzny* 2023, 95, 2, s. 187-210
<https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.2.4>
57. Kornijów R. (2011): Kontrowersje wokół zbiorników za-porowych w Polsce i na świecie. *Gospodarka Wodna*, 2011, nr 12, 489–495
58. Król P., Brandyk A., Dobrzelewski B. (2010): Analiza wpływu retencyjnego zbiornika lateralnego na poziom wód gruntowych terenów przyległych. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 2 (48), s.: 49–59
59. Krzemińska A., Adynkiewicz-Piragas M., Kazimierska R. (2006): Ocena warunków tlenowych dolnego odcinka rzeki Smortawy jako podstawa oceny samooczyszczania się wód w świetle wymogów Ramowej Dyrektywy Wodnej. *Infrastruktura i Ekologia terenów wiejskich*. PAN, Nr 4/3/2006, s. 67-76.
60. Kuczyński T., Pieckiel P., Kozłowski K. (2022): Metodyka monitoringu ichtiofauny w zbiornikach zaporowych. Państwowy Monitoring Środowiska. Praca realizowana w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w ramach umowy nr 28/2019/F z dnia 12 sierpnia 2019 r. przez zespół Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni.
61. Kundzewicz Z.W., Zalewski M., Kędziora A., Pierzgalski E. (2010): Zagrożenia związane z Wodą. *Nauka* 4: 87-96
62. Kunz M. J., Wüest A., Wehrli B., Landert J., Senn D. B. (2011): Impact of a large tropical reservoir on riverine transport of sediment, carbon, and nutrients to downstream wetlands, *Water Resour. Res.*, 47, 1–16,
<https://doi.org/10.1029/2011WR010996>
63. Ławniczak A.E., Zbierska J., Nowak B., Achtenberg K., Grześkowiak A., Kanas K. (2016): Impact of agriculture and land use on nitrate contamination in groundwater and running waters in central-west Poland. *Environmental Monitoring and assessment* 188, 3: 172
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5167-9>
64. Machowski R., Rzętała M. (2020): Zbiornik Dzieńkowice. Instytut Badań Regionalnych Biblioteki Śląskiej. *Encyklopedia Województwa Śląskiego* T. 7
65. Majewski W. (2022): Stopień wodny Włocławek – najbardziej kontrowersyjny obiekt hydrotechniczny w Polsce. *Nauka* 3/2022, s.: 159-178
<https://doi.org/10.24425/nauka.2022.142914>

66. Major M. (2003): Charakter i funkcjonowanie zagłębień bezodpływowych w krajobrazie strefy młodoglacjalnej (Pomorze Zachodnie, górna Parsęta). UAM Poznań, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Zakład Geoekologii, rozprawa doktorska ss.210
67. Major M. (2012): Funkcjonowanie zagłębień bezodpływowych w zróżnicowanych warunkach morfolitologicznych (dorzecze Parsęty, Pomorze Zachodnie). *Studia i Prace z Geografii i Geologii* nr 27, ss. 232
68. Major, M., Pietruszyński, Ł., Cieśliński, R. (2021): Zróżnicowanie przestrzenne wybranych składników biogenych w śródpolnych oczkach w Polsce Północnej. *Przegląd Geograficzny* 93, 1, s.: 59-81.
<https://doi.org/10.7163/PrzG.2021.1.4>
69. Małecki Z. (2008): Funkcje zbiornika wodnego i stawów parkowych w Gołuchowie [Function of water reservoir and park ponds in Gołuchów]. *Inżynieria Ekologiczna* 20, 7-15.
70. Małecki Z., Pokładek R. (2010): Istotne procesy zagrażające bezpieczeństwu zbiorników wodnych. *Zeszyty Naukowe – Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska* Nr 2, 2010: 33-43.
71. Maślanka K. Kostuch R. (2014): Oddziaływanie zbiornika wodnego Domaniów na poziom wody w studniach znajdujących się w jego otoczeniu. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*. Nr I/1/2014, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 61–72.
<https://doi.org/10.14597/infraeco.2014.1.1.005>
72. Maślanka K., Ptak M., Popławski Ł. (2003): Wpływ stanów wody w Nidzie na poziom zwierciadła wody gruntowej w przyległym terenie. *Zesz. Nauk. Inż. Środ.* Nr 24, Kraków, s. 105-112.
73. Matson P.A., Parton W. J., Power A.G., Swift M.J. (1997): Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277: 504-509.
<https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
74. Mazur A. (2013): Ocena skuteczności działania zbiornika wstępnego na rzece Por. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr I/IV/2013. PAN, s.:299-310.
75. Mazurek M., Biegała J., Makohonienko M., Gadzińska J. (2022): Wpływ działalności człowieka na chemizm wód Junikowskiego Strumienia. *Środowisko geograficzne zlewni Junikowskiego Strumienia*. Bogucki Wyd. Nauk, Poznań 2022, ISBN 978-83-7986-431-7

76. Mikulski Z. (1970): Kształtowanie się bilansu wodnego jezior w Polsce. Przegląd geograficzny. T.. 42, z. 2. IG PAN, PAW. Warszawa, s. 438-448.
77. Michalska J., Nowicki Z. (2009): Wyznaczanie zmian zasobów wód podziemnych w rejonach zbiorników małej retencji. Informator Państwowej Służby Hydrologicznej.
78. Mioduszewski W., Okruszko T., (2016): Naturalna mała retencja. Metoda łagodzenia skutków suszy, obniżenie ryzyka powodziowego i ochrona różnorodności biologicznej. Podstawy metodyczne. Globalne partnerstwo dla wody.
79. Mioduszewski W. Pierzgalski E. (2009): Zwiększenie możliwości retencyjnych oraz przeciwdziałanie powodzi i suszy w ekosystemach leśnych na terenach nizinnych (projekt programu). Centrum Koordynacji Projektów Środowiskowych. Lasy Państwowe. Warszawa.
80. Moniewski P. (2015): Rola zbiorników wodnych w kształtowaniu cech fizykochemicznych wód rzecznych na przykładzie Ciosenki. Prace i Studia Geograficzne 2015, T.58 ss. 7-23
81. Morczewska-Majkut K., Jaroń A., Łobos-Moysa E., Nocoń W.K. (2022): Zmienność wybranych parametrów fizyko-chemicznych wody w zbiorniku Słupsko. Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus 21 (1) 2022, 3-15
<https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.1.3>
83. Nachlik E. (2006): Ochrona przeciwpowodziowa w powiązaniu z ochroną walorów przyrodniczych rzek i ich dolin. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich nr 4/1/2006, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, s. 47–62 Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi
84. Obarska-Pempkowiak H., (2005): Oczyszczalnie hydrofitowe w świetle przepisów UE. (mat. pokonferencyjne na temat: „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”) Ustronie Morskie, 1–13
85. Okulanis E. (1993): Stosunki hydrologiczne jezior. W: Lange W. (red.): Metody badań fizyczno-limnologicznych. Wydawnictwo UG. Gdańsk, s. 43-66.
86. Operacz A. Operacz T. Tomalik J. (2012): Wpływ realizacji małych elektrowni wodnych na warunki hydrogeologiczne. Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2, s.: 55-62
87. Operat wodnoprawny „Zbiornik małej retencji Przebędowo” (2009). Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska „BIPROWODMEL” Sp. z o.o.
88. Othman, R., Sulaiman, W.S.H.W., Baharuddin, Z.M., Mahamod, L.H., Hashim, K.S.H-Y. (2019): Impact of sandy soil physico-chemical properties towards urban lakes

- eutrophication and inorganic pollutant status. *Desalination and Water Treatment*, 163, 398–408.
- <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24211>
89. Palmer R.W., O’Keeffe J.H. (1990): Downstream effects of impoundments on the water chemistry of the Buffalo River (Eastern Cape), South Africa, *Hydrobiologia*, 202, s. 71-83.
- <https://doi.org/10.1007/BF02208128>
90. Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie (2022): www.wody.gov.pl
91. Pawełek J., Grenda W (2011): Wpływ zbiorników retencyjnych na ujęciu z Rudawy na jakość wody przeznaczonej do zaopatrzenia Krakowa. *Ochrona Środowiska*. Vol. 33, No.4, 63-66.
92. Pawełek J., Spytek M. (2005): Substancje biogenne w dopływach zbiornika Dobczyckiego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, PAN, 4/2005 99-113.
93. Philips P.J., Shedlock R.J. (1993): Hydrology and chemistry of groundwater and sesonal ponds in the Atlantic Coastal Plain in Delaware, USA. *Journal of Hydrology*, 141, 157 – 178
- [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90048-E](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90048-E)
94. Plan przeciwdziałania skutkom suszy (PPSS), 2021
95. Program przeciwdziałania niedoborowi wody na lata 2021-2027 z perspektywą do roku 2030. Ministerstwo Infrastruktury, grudzień 2021.
96. Projekt Polityki wodnej Państwa do roku 2030 (Z uwzględnieniem etapu 2016) Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej 2011
97. Projekt wykonawczy „Zbiornik małej retencji Przebędowo” (2011). Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska „BIPROWODMEL” Sp. z o.o.
98. Przybyła Cz., Kozdrój P. (2013): Wpływ zbiornika lateralnego Pakosław na położenie zwierciadła wód gruntowych terenów przyległych. *Annual Set The Enviroment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, T. 15, s. 1673-1688
99. Przybyła Cz., Sojka M., Wróżyński R., Pyszny K. (2017): Planowanie małej retencji w lasach na przykładzie Puszczy Noteckiej. Bogucki Wydawnictwo Naukowe. Poznań 2017.
100. Radczuk L., Olearczyk D. (2002): Małe zbiorniki retencyjne jako element poprawy bilansu wodnego zlewni użytkowanej rolniczo. *Zesz. Nauk. AR Krak.*, 393: 139–148

101. Radecki – Pawlik A., Kapusta A. (2006): Mała retencja wodna i jej znaczenie. *Aura* nr 3, s. 32-33
102. Radzka E. (2014): Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowowschodniej Polsce. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 2014 (I–III). T. 14. Z. 1 (45), s. 67–76
103. Ramowa Dyrektywa Wodna (RDW, Dyrektywa 2000/60/WE) Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r.
104. Rodrigues L.N., Sano E.E., Steenhuis T.S., Passo D.P. (2012): Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian Savannah Region. *Water Resour Manage*, 26: 873–882.
<https://doi.org/10.1007/s11269-011-9941-8>
105. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych.
106. Ruman M, Absalon D., Matysik M. (2013): Innowacyjne rozwiązania w monitoringu jakości wód powierzchniowych. Publikacja dofinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, w ramach projektu: „Kongres EkoInnowacje w ochronie środowiska 2013”, s.: 1-82
107. Rushton K.R. (2003): *Groundwater Hydrology*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, ss. 408
108. Ryszkowski L., Kędziora A.(1996): Mała retencja wody w krajobrazie rolniczym. *Zesz. Nauk. AR Wrocław*, Nr 289, s. 217-225
109. Rzętała (2000): Bilans wodny oraz dynamika zmian wybranych zanieczyszczeń zbiornika Dzierżno Duże w warunkach silnej antropopresji. *Prace Naukowe UŚ w Katowicach* nr 1913. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice. 176 s.
110. Rzętała M. (2008): Funkcjonowanie zbiorników wodnych oraz przebieg procesów limnicznych w warunkach zróżnicowanej antropopresji na przykładzie regionu górnośląskiego. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice, ss.: 172
111. Sala K. (2017): Wodne zbiorniki zaporowe a społeczne korzyści. "Energia Gigawat" - 10/2017
<http://dx.doi.org/10.53259/2023.7.01>

112. Seeboonruang U. (2012): Impacts of Reservoir on Groundwater Level and Quality in a Saline Area, Nakhon Panom Province, Thailand. APCBEE Procedia4 (2012) p.:16-21
<https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.11.004>
113. Shukla A. K., Ojha C. S. P., Garg R. D., Shukla S., Pal L. (2020): Influence of spatial urbanization on hydrological components of the upper ganga River Basin, India. J. Hazard. Toxic, Radioact. Waste 24 (4).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000508](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000508)
114. Soja R., Wiejaczka Ł. (2014): The impact of a reservoir on the physicochemical properties of water in a mountain river, Water and Environment Journal, 28, 4, s. 473-482;
<https://doi.org/10.1111/wej.12059>
115. Sojka M., Murat-Błażejewska S., Kanclerz J. (2010): Ocena możliwości retencjonowania wody w jeziorach zlewni Strugi Dormowskiej. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi Nr 8/1, s. 5–13, specj. (9), s. 11–38
116. Song W., Jiang Y., Lei X., Wang H., Shu D. (2015): Annual runoff and flood regime trend analysis and the relation with reservoirs in the Sanchahe River Basin, China. Quaternary International. Volumes 380–381, 2015, p.: 197-206.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.01.049>
117. Szatyłowicz E., Lewkowicz M., Szczykowska J. (2013): Jakość wód rzeki Perebel i zbiornika wodnego Topiło jako elementów infrastruktury środowiskowej Podlasia. Environmental Engineering – Trough a Young Eye Vol.2, 2013.
118. Szczykowska J., Siemieniuk A. (2011): Znaczenie zbiorników retencyjnych na terenach rolniczych oraz jakość ich wód. Inżynieria Ekologiczna Nr 26, s.: 103-111
119. Szczykowska J., Siemieniuk A., Wiater J. (2013): Problemy ekologiczne zbiorników małej retencji na Podlasiu. Ekonomia i Środowisko, 4(47).
120. Szymczyk, S., Świtajska, I. J. (2013): Wpływ użytku ekologicznego na ograniczenie odpływu zanieczyszczeń z zagrody wiejskiej. Inżynieria Ekologiczna nr 34, s.: 214-221
121. Świątek M. (2022): Zalety i wady energetyki wodnej. Uniwersytet Szczeciński, Urząd Marszałkowski Województwa Zachodniopomorskiego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. s.: 29-46

122. Traczewska T.M. (2012): Problemy ekologiczne zbiorników retencyjnych w aspekcie ich wielofunkcyjności. Sympozyjum Europejskie nt.: Współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej, Paris – Orléans, s.: 1-8
123. Tran T. N. D., Nguyen Q. B., Zeeshan, A. (2021a): Application of plaxis for calculating the construction stability and soft embankment in protecting ha thanh. 2nd conference on sustainability in Civil engineering (CSCE) 2020, 202–210. <https://csce.cust.edu.pk/archive/20-613.pdf>
124. Tran T. N. D., Zeeshan A., Vo N. D. (2021b): Application of hydrodynamic modelling to assess the efficiency of hurricane protection measure at xom ro dike, in PHU YEN PROVINCE, VIETNAM. 2nd Conference on Sustainability in Civil Engineering (CSCE). <https://csce.cust.edu.pk/archive/20-406.pdf>.
125. Valkama E., Usva K., Saarinen M., Uusi-Kämpä J. (2018): A Meta-Analysis on Nitrogen Retention by Buffer Zones. Journal of Environmental Quality SPECIAL SECTION. RIPARIAN BUFFER MANAGEMENT 20 <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0120>
126. van der Kamp G., Hayashi M. (2009): Groundwater –wetland ecosystem interaction in the semiarid glaciated plains of North America. Hydrogeol. J. 17, s. 203-214 <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0367-1>
127. Wiatkowski M., Głowski R., Kasperek R., Kościański S. (2007): Ocena sposobu użytkowania zbiorników zaporowych małej retencji na terenie województwa opolskiego [Characteristic and exploitation of the small dam reservoirs in Opole voivodeship]. Nauka Przyr. Technol., 1 (2), 1-9
128. Wiatkowski M. (2008): Wstępne wyniki badań jakości wody dopływającej i odpływającej ze zbiornika Psurów na rzece Prośnie. W: Meteorologia, hydrologia, ochrona środowiska – kierunki badań i problemy. Red. A. Dubicki. Monogr. IMGW: 407-414.
129. Wiatkowski M. (2010): Zmiany wybranych wskaźników jakości wody rzeki Prośny przepływającej przez zbiornik Psurów. Proc. ECOpole 4, 2: 495-500.
130. Wiatkowski M. (2010): Ocena jakości wody zbiornika Komorów na potoku Milikówka. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich. Nr 8/2/2010: 51-64.
131. Wiatkowski M. (2013): Wstępne wyniki badań jakości wody małego zbiornika Michalice na Widawie. Inżynieria Ekologiczna Nr 35, 2013, s: 117-135

132. Wiatkowski M. (2015): Problemy Gospodarki Wodnej zbiornika Młyny na rzece Julianpolka. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus* 14(3) 2015, s.:191-203.
<https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2015.14.3.191>
133. Wibig J. (2012): Warunki wilgotnościowe w Polsce w świetle wskaźnika standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t. 12 z. 2 (38), s.: 329-340
134. Wicher J. (2004): Akumulacja rumowiska w nizinnych zbiornikach wodnych. *Maszynopis. Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej UP, Poznań*.
135. Wiejaczka Ł, Prokop P., Kozłowski R., Sarkar S. (2017): Wpływ zbiornika retencyjnego na fizykochemiczne właściwości rzeki himalajskiej (Tista, Indie). *Przegląd Geograficzny* 2017, 89, 1, s. 165-181.
<https://doi.org/10.7163/PrzG.2017.1.9>
136. Zubala T. (2005): Możliwość retencjonowania odpływu na przykładzie wybranej mikrozelewni lessowej. *Acta Agrophysica*, 2005, 5(1), 219-228
137. Żelaziński J., Wawręty R. (2007): Cele wybranych przedsięwzięć hydrotechnicznych o możliwości ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko. *Materiały szkoleniowe dla uczestników warsztatów zorganizowanych w dniach 29-30 maja 2007 przez Towarzystwo na rzecz Ziemi i Polską Zieloną Sieć. Jak skutecznie chronić przyrodę dolin rzecznych?* s. 38-52.

8. Kopie opublikowanych prac wchodzących w skład rozprawy

8.1. Publikacja #1

Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), s.: 767-788



MIDDLE POMERANIAN SCIENTIFIC SOCIETY OF THE ENVIRONMENT PROTECTION

Rocznik Ochrona Środowiska

Volume 21.

Year 2019

ISSN 1506-218X

767-788

Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir

Błażej Waligórski¹, Mariusz Korytowski^{2}, Piotr Stachowski²,
Krzysztof Otremba², Karolina Kraczkowska²*

¹State Water Holding Polish Waters;

Regional Water Management Authority, Poznań, Poland

²Poznań University of Life Sciences, Poland

**corresponding author's e-mail: mariusz.korytowski@up.poznan.pl*

1. Introduction

At present the term water management is used to refer to the process of water storage, use and protection, the removal of its excess and limitation of the resulting threats, as well as alleviation and elimination of water shortages (Kaca et al. 2011). As it was reported by Mioduszewski (2012) and Przybyła et al. (2014), water resources, modified mainly by precipitation and evapotranspiration, are characterised by considerable spatial and temporal variation, resulting in periods of deleterious water scarcity or floods causing considerable losses in river valleys.

One of the methods applied to counteract these adverse phenomena is connected with the construction of retention reservoirs, frequently located either in the river continuum (such as dam reservoirs) or outside it (lateral). According to Puczyńska and Skrzypski (2009) as well as Szczykowska and Siemieniuk (2011), water retention in dam reservoirs contributes to a considerable improvement of water balance. However, once water is dammed in retention reservoirs we may observe a certain change in the hydrologic conditions in the water systems. It frequently consists in a reduction of the fluctuations in river water stages and flows, as well as an increased depth of groundwater tables and soil moisture in the immediate vicinity of reservoirs (Górniak and Piekarski 1999, Król et al. 2010). Changes in hydrogeological conditions caused by damming structures within their impact zones may be beneficial, neutral or adverse (Michalec 2012). The intensity of changes caused by the constructed dam reservoir depends on the relief of the surrounding area, the size of the reservoir and primarily its capacity.

The higher the shores, the faster this impact declines, while the greater the mass of retained water, the farther its impact is extended (Traczewska 2012).

According to Zieliński (2015), knowledge on the mechanisms of function in anthropogenically transformed, lowland aquatic ecosystems under various hydrometeorological conditions is still insufficient, particularly in the context of sustainable water management, wherever the probability of hydrological stress is high.

The aim of this study was to assess the impact of the Przebędowo dam reservoir on the groundwater tables in adjacent areas after three years of its operation.

2. Material and methods

This paper presents results of studies conducted in 2015, 2016 and 2017 hydrological years in the catchment of the Przebędowo reservoir (in the areas adjacent to the reservoir) located in the Wielkopolskie province, 25 km north of Poznań in the Murowana Goślina commune (Fig. 1).

In terms of the physico-geographical regionalisation of Poland (Kondracki 2000) the study area of early postglacial landscape is located in the Wielkopolskie Lake District in the area of the Poznań Warta Gorge (315.52). In the discussed catchment of approx. 100 km² forests predominate, while to a lesser extent arable land is found in the area adjacent to the reservoir.

Overall the areas adjacent to the reservoir are composed of quaternary (Pleistocene) fluvial deposits, while the analysis of layers within piezometers showed a predominance of medium sands up to a depth of approx. 3m, with mean porosity of 36%, in which groundwaters form a continuous phreatic aquifer.

The analysed reservoir was established in the valley of the Trojanka river (from 6+915 km to 8+371 km of its course), being a depositional terrace with its slope towards the reservoir shores. It was constructed by the Greater Poland Provincial Land Drainage and Water Units Board in Poznań and put into operation in November 2014. The reservoir is located at 52°34'28" northern latitude and 17°00'33" eastern longitude. The earth dam of the reservoir is class IV it is 334 meters long and 3.30 meters high. The reservoir with a length of 1450 m and a maximum bed-width of 120 m at a normal pool level with an elevation of 72.5 m a.s.l. has a mean depth of 0.94 m and a flooded surface of 12.03 ha (Table 1). Around the reservoir an ecological buffer zone, the so-called transition zone between the reservoir and the surrounding utilised agricultural areas, with a mean width of approx. 13, was established as grassland with tree and shrub plantings. The role of this buffer zone is to reduce runoff of biogenic compounds and pesticides from adjacent agricultural areas.



Fig. 1. Location of the Przebędowo reservoir in the Wielkopolskie province

Water levels in the reservoir were measured using a staff gauge located in the damming structure at the outflow of the reservoir (Fig. 2). Additionally water levels in the reservoir were recorded continuously using a hydrostatic probe, from which recorded data were sent to the telemetric module installed at the spillway tower.

In turn, groundwater levels were measured in 21 wells established in seven section lines in the immediate vicinity of the reservoir. Analyses were conducted for data recorded in 7 selected wells: no. P-2 and no. P-3 located in the area adjacent to the reservoir from the west and from no. P16 to P18, as well as nos. P-20 and P-21 installed from the east. The other wells established during the reservoir construction works were not included in this study due to their location in the dam crest.

In the water year 2015 from mid-January a monitoring system was initiated in the discussed structure; for this reason the characteristics of water levels cover the period since that time point.

Further analysis was expanded to include data from six additional wells installed in April 2016, i.e. wells nos. 1', 2', 3', 4', 5' and 6', in terms of the elevation to the national grid and located in the area adjacent to the reservoir at a distance of approx. 10 m from its shores in three representative cross-sections (Fig. 3).

Water levels in the analysed years were measured once every two weeks. In turn, weekly water levels in the investigated wells were recreated by calculating mean values from the levels measured at 2-week intervals.

The number of days when groundwaters were fed by the water retained in the reservoir was determined in the analysed period based on the difference between the elevation of waters in the reservoir and those of groundwaters in the wells included in the study. Estimate of essentiality relations between water levels in reservoir and groundwater levels in analysed wells carried T-students method.

Table 1. Basic parameters of the Przebędowo retention reservoir

No.	Parameter	Unit	results
1	Structure class (earth dam)	class	IV
2	Length	m	1450
3	Maximum width	m	120
4	Shoreline length	m	2980
5	Pool levels:		
	a/ Max. pool level (at $Q_{K0.5\%}$)	m a.s.l.	73.00
	b/ normal pool level	m a.s.l.	72.50
	c/ minimum pool level	m a.s.l.	71.50
6	Reservoir capacity:		
	- maximum at max. pool level	m^3	229 450
	- total at normal pool level V_c	m^3	162 350
	- active capacity V_U	m^3	113 350
	- dead at min. pool level V_m	m^3	49 000
7	Flood control capacity between normal damming and maximum pool levels	m^3	67 100
8	Mean reservoir depth		
	at: normal pool level	m	0.94
	minimum pool level	m	0.38
9	Reservoir area:		
	- normal pool level	ha	12.03
	- minimum pool level	ha	10.64



Fig. 2. A staff gauge with a hydrostatic probe installed at the damming structure at the outflow from the reservoir



Fig. 3. Location of wells measuring groundwater levels in the area adjacent to the reservoir (source: the authors' study based on Google Earth – <https://www.google.pl/intl/pl/earth/>)

Results of water level observations in the investigated structure were used by permission of the Director of the former Wielkopolska Board of Land Amelioration and Water Facilities (at present State Water Holding Polish Waters; Regional Water Management Authority in Poznań).

Meteorological conditions in the investigated water years (precipitation and air temperature) in relation to the multiannual means of 2000-2015 were characterised based on the data recorded in the weather station of the Experimental and Teaching Station of the Forest Arboretum in Zielonka, located approx. 8 km south-east from the discussed reservoir. The station is located in the central part of the Puszcza Zielonka Forest at 91.00 m a.s.l., at 52°33'00" northern latitude and 17°06'33" eastern longitude. It is situated approx. 24 km from the nearest station of the Institute of Meteorology and Water Management in Poznań Ławica (Grajewski 2013).

The characteristics of moisture conditions for the analysed water years was conducted according to Kędziora (1995, after Kaczorowska 1962) taking into consideration criteria contained in Table 2.

Table 2. Characteristics of moisture conditions in hydrological years

Type of year	% normal precipitation
Extremely dry	below 50
very dry	50-74
Dry	75-89
Average	90-110
Wet	111-125
Very wet	126-150
Extremely wet	over 150

This study included also documentation from the execution of geological works connected with the installation of piezometers in the Przebędowo small retention reservoir (2014) prepared by Geoprogram (W. Andrzejewski, R. Urban), the Water utility and water rights report (2009) and the Water management guidelines (2009), as well as the Detailed design of the Przebędowo reservoir (2011) prepared by Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska „BIPROWODMEL” from Poznań.

3. Results and discussion

As it was reported by Bąk (2003), the Wielkopolska region is considered to be one of the driest and warmest regions of Poland. Polar-maritime air masses predominate over the area; as a result the summers are cooler and the winters are

warmer when compared to the eastern, more continental part of Poland. Most frequently cold fronts move over the region and in the summer season they are often accompanied by storms, considerable fluctuations in temperature and increased wind speeds. Mean annual atmospheric pressure is approx. 1005 hPa – it is lowest in the spring (in April), slightly higher in the summer, while it reaches the maximum in the autumn (in October). According to that author one of the characteristics of the Wielkopolska climate is also related with the frequent, although irregular occurrence of precipitation-free periods, which has a negative effect on plant growth. In the 20-year period of 1981-2000 the long-term precipitation-free periods (lasting over 30 days) appeared in 9-year intervals. Precipitation-free periods were observed both in dry, average and wet years. The largest numbers of days with precipitation were recorded in the winter, whereas the greatest precipitation totals are observed in the summer.

The first hydrological year analysed in this study (2015) was a dry year, in which precipitation total was 429 mm and it was by 131 mm lower than the multi-annual mean at air temperature exceeding the mean by 0.5°C (Table 3). Both the winter and summer half-years of the discussed year, in which precipitation totals were lower than the multi-annual means by 54 mm and 77 mm, respectively, were classified as dry.

Table 3. Half-year and yearly precipitation totals (P) and mean air temperatures (t) in 2015, 2016 and 2017 hydrological years and their deviations from means of the multi-year period of 2000-2015

Period	precipitation P (mm)			Temperature t (°C)		
	winter XI-IV	summer V-X	year XI-X	winter XI-IV	summer V-X	year XI-X
Multi-year mean	229	330	560	2.6	15.4	9.0
2015	175	253	429	3.8	15.3	9.5
Deviation	-54	-77	-131	1.2	-0.1	0.5
2016	219	463	682	4.1	15.7	9.9
Deviation	-10	133	122	1.5	0.4	0.4
2017	211	593	804	2.5	15.6	9.1
Deviation	-18	263	244	-0.1	0.2	0.1

In turn, the hydrological year of 2016 was a wet year, in which the precipitation total was 682 mm and it was by 122 mm higher than the multi-annual mean, at air temperature exceeding the mean by 0.4°C. The winter half-year of that year with the precipitation total by 10 mm lower than the multi-annual mean and air temperature by 1.5°C higher than the mean was average and warm. In turn, the

summer half-year of the discussed year was very wet, at the precipitation total exceeding the mean by 122 mm, at air temperature by 0.4°C higher than the mean.

The last hydrological year analysed in this study, i.e. 2017, was very wet, since precipitation total in that year exceeded the multi-annual mean by as much as 244 mm, at air temperature close to the mean. The winter half-year of that year, in which precipitation total was 211 mm and by 18 mm lower than the mean, was average. In contrast, the summer half-year was extremely wet, since precipitation total in that half-year was 593 mm and exceeded the multi-year mean by 263 mm, at air temperature exceeding the mean by 0.2°C.

In the winter half-year of the first year analysed in this study, on 18 February the water elevation in the reservoir reached the maximum (72.49 m a.s.l.), which was maintained until 13 April (Fig. 4). In turn, groundwater levels in the analysed wells on that day reached values ranging from 70.72 m a.s.l. (well P-21) to 71.7 m a.s.l. (well P-3) and it continued to increase. On 7 April maximum groundwater elevations in the investigated wells were recorded and they ranged from 70.85 m a.s.l. (well P-21) to 71.87 m a.s.l. (well P-3). From mid-April to the end of the analysed winter half-year the water table in the reservoir was dropping, while the groundwater tables in the adjacent area showed no greater variability. At the end of this half-year the water pool in the reservoir reached the elevation of 72.39 m a.s.l., while groundwater levels ranged from 70.85 m a.s.l. (well P-21) to 71.85 m a.s.l. (well P-3). From the beginning of the summer half-year of 2015, which in terms of moisture conditions was dry, both the water pool in the reservoir and groundwater levels in the adjacent area were decreasing. The lowest levels of reservoir water and groundwaters were recorded in the beginning of September. The water pool in the reservoir in that period was 71.89 m a.s.l. and it was 61 cm below the normal pool level, while the elevation of groundwaters in the analysed wells ranged from 70.65 m a.s.l. (well P-21) to 71.52 m a.s.l. (well P-3). A considerable effect on this situation was exerted by the adverse course of weather conditions, particularly low precipitation totals and high air temperatures in August. At the end of the discussed half-year, after total precipitation of 30 mm an increase was recorded in the water pool in the reservoir and in the analysed wells, the water pool in the reservoir was 72.26 m a.s.l., while groundwater elevations ranged from 70.7 m a.s.l. in well P-21 to 71.63 m a.s.l. in well P-3. It needs to be stated that over the entire analysed period from January to the end of October, except for the first week of observations, in which the reservoir served the drainage function, waters retained in the investigated reservoir fed groundwaters from the discussed wells, since elevations of the water pool in the reservoir were maintained over the elevations of groundwaters in the adjacent area (Fig. 4).

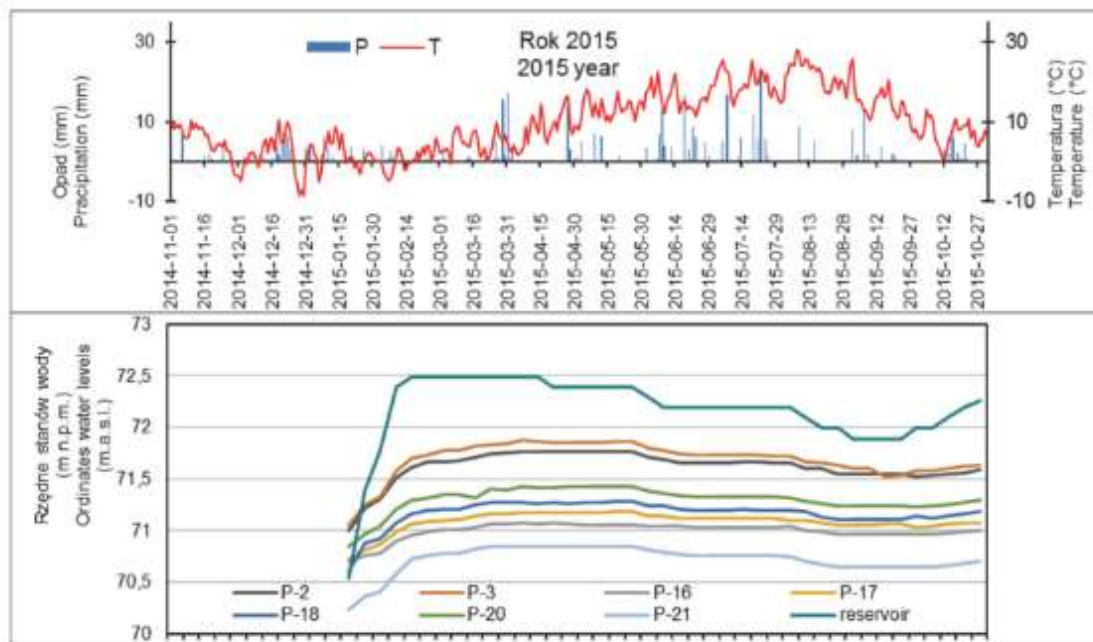


Fig. 4. Elevations of water pool in the reservoir and groundwater in analysed wells (m a.s.l.) against daily precipitation totals and mean daily air temperatures in 2015 hydrological year

In the beginning of the winter half-year of 2016 the water pool in the analysed reservoir was 72.28 m a.s.l., while the groundwater elevations in the adjacent area ranged from 70.72 m a.s.l. in well P-21 to 71.65 m a.s.l. in well P-3 (Fig. 5). Over the entire analysed half-year the water pool in the reservoir and groundwater levels in the adjacent area showed no marked variability, while their maximum values were recorded on 29 March. The water pool in the reservoir on that day reached 72.52 m a.s.l., while the groundwater levels in the area adjacent to the reservoir ranged from 70.88 m a.s.l. in well P-21 to 71.85 m a.s.l. in well P-3. It may be stated that over the entire discussed winter half-year the reservoir served the supply role, since elevations in the water levels exceeded elevations of groundwaters in the discussed wells.

Observations of groundwater levels in the additionally installed wells, i.e. wells 1' to 6', were started in the beginning of the summer half-year. The water pool in the reservoir in that period was 72.46 m a.s.l. and the groundwater elevations in the adjacent area ranged from 70.8 m a.s.l. (well P-21) to 72.96 m a.s.l. (well 5'). At the turn of May and June at low precipitation totals and higher air temperatures the water pool in the reservoir and groundwater levels in the analysed wells were observed to subside. In contrast, precipitation total of 229 mm recorded for the period from 13 June to mid-July caused an increase in water pools in the reservoir and groundwater levels. On 15 July the water pool in the

reservoir reached the maximum elevation in that half-year, i.e. 72.59 m a.s.l. In turn, in some of the analysed wells the maximum pool was observed in the same day, while in some of them it was with a delay of 1 or 2 weeks and it ranged from 70.88 m n.p.m in well P-21 up to 73 m n.p.m in well no. 5'. At the end of this half-year the water pool in the reservoir had the elevation of 72.58 m a.s.l., while in the analysed wells the elevations ranged from 70.86 m a.s.l. (well P-21) to 72.89 m a.s.l. (well 5'). In the discussed half-year the elevation of the water pool in the reservoir was above those of groundwaters in most investigated wells. In turn, feeding of reservoir waters by groundwaters was observed over the entire half-year period from the area of well no. 5', as well as wells nos. 4' and 6' - this time to a limited extent. Groundwaters from the side of well no. 4' fed reservoir waters in that half-year for 63 days, while from well no. 6' it was for 28 days.

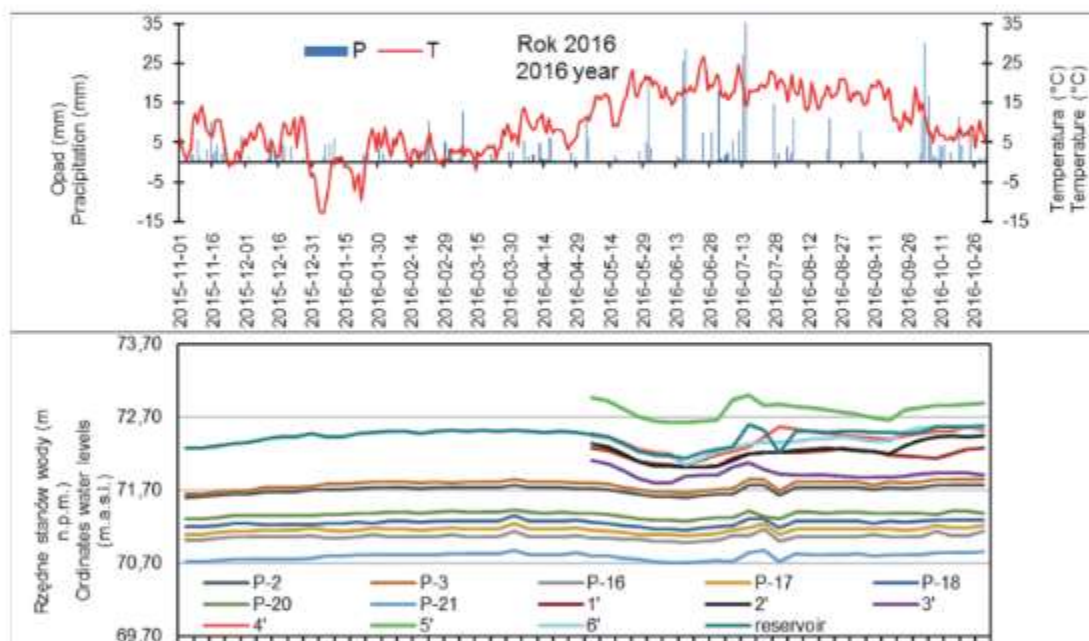


Fig. 5. Elevation of water pool in reservoir and groundwaters in analysed wells (m a.s.l.) against daily precipitation totals and mean daily air temperatures in 2016 hydrological year

In the beginning of the winter half-year of 2017 the water pool in the analysed reservoir ranged from 72.62 m a.s.l., maintained at 12 cm above the normal pool level (Fig. 6). In turn, the groundwater levels in the adjacent area in that period ranged from 70.87 m a.s.l. (well P-21) to 73.12 m a.s.l. (well 5').

The maximum water pool in the reservoir, i.e. the elevation of 72.83 m a.s.l., was recorded in that half-year on 15 December, while groundwater levels in the adjacent area on that day reached elevations close to the maximum and

ranged from 70.94 m a.s.l. in well P-21 to 73.33 m a.s.l. in well no. 5'. Over the entire analysed winter half-year (181 days) groundwaters fed the reservoir waters from the side of well no. 5', while to a lesser extent feeding by groundwaters was also observed from wells nos. 1', 2', 3', 4' and 6', with the feeding time ranged from 28 days (well 1') to 112 days (well 4'). In turn, in the case of the other analysed wells, which were located closer to the damming structure, elevations of the water table were recorded below the elevations of the water pool in the reservoir and the direction of feeding was opposite. It may be stated that the recorded results were consistent, among other things, with the results of studies conducted by Głuchowska and Pływaczyk (2008) in the Odra river valley, below the Brzeg Dolny barrage, in which the authors stressed that upstream of the damming structure in its close vicinity water infiltration from the reservoir and feeding of the valley are observed.

In the beginning of the summer half-year of 2017, which in terms of precipitation was extremely wet, the water pool elevation in the reservoir was 72.59m a.s.l., while groundwater levels in the analysed wells ranged from 70.86 m a.s.l. in well P-21 to 73.32 m a.s.l. in well no. 5' (Fig. 6).

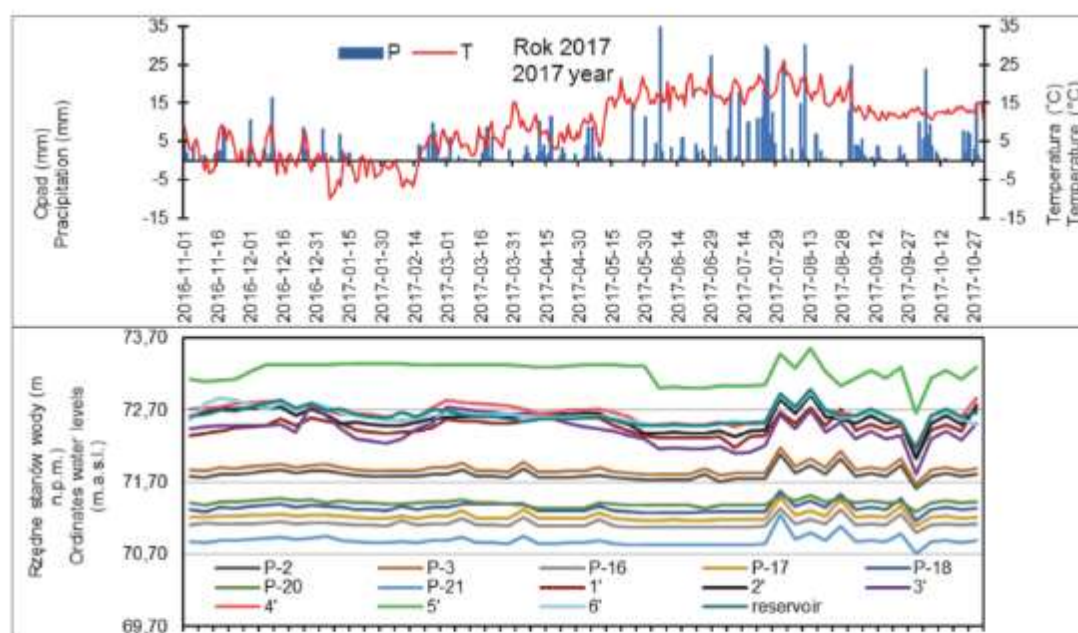


Fig. 6. Elevations of water pool in the reservoir and groundwaters in analysed wells (m a.s.l.) against daily precipitation totals and mean daily air temperatures in 2017 hydrological year

From the second decade of July to mid-August following precipitation total of 209 mm, which had been recorded in that period, an intense increase was

observed in the water levels both in the reservoir and groundwaters in the adjacent area. The maximum water pool in the analysed reservoir, at the same time close to the maximum pool of 72.99 m a.s.l., was recorded on 13 August. On that day the maximum elevation was also observed for groundwaters in wells P-2' to P-6', where it reached values ranging from 72.70 m a.s.l. in well no. 3' to 73.55 m a.s.l. in well no. 5', respectively.

In turn, in the other analysed wells the maximum elevation of groundwaters was recorded two weeks earlier and ranged from 71.24 m a.s.l. (well P-21) to 72.17 m a.s.l. (well P-3). The intensive drop in the water pool levels in the reservoir and simultaneously in groundwaters in the adjacent area, which was observed in the second half of August, was not caused by the course of weather conditions, but rather by the opening of the so-called bottom outlets. This was connected with a very high water level in the reservoir, caused mainly by high precipitation totals in that period and the damming structure being jammed by vegetation debris, resulting in a threat of water overspill over the dam crest and flooding of buildings located nearby. Such actions, after Nachlik (2006), may be classified as the so-called flood prevention measure, which promotes restoration or preservation of natural outflow conditions from the catchment. These are actions facilitating limitation of flood damage in a given area and as such they are frequently applied in flood control retention facilities.

The adverse course of weather conditions observed in the second and third decades of September, particularly low precipitation total (12 mm) in that period, caused further subsidence of the water pool in the reservoir and groundwater levels in the adjacent area. The lowest water elevation in the analysed half-year was recorded on 1 October. The water elevation in the reservoir on that day was 72.16 m a.s.l., while the level of groundwaters in the analysed wells ranged from 70.71 m a.s.l. (well P-21) to 72.65 m a.s.l. (well 5').

Precipitation total of 59 mm, observed in the first decade of October caused an intensive rise in the water pool in the reservoir and the analysed wells. At the end of that half-year the water pool in the reservoir was found at 72.67 m a.s.l., while the groundwater levels reached elevations from 70.89 m a.s.l. (well P-21) to 73.29 m a.s.l. (well 5').

In the analysed summer half-year groundwaters fed reservoir waters from wells nos. 1' and 2', where the supply time amounted to 21 and 35 days, respectively. Supplying the reservoir waters with groundwaters from adjacent areas was also reported from wells nos. 4', 5' and 6', while the water inflow time ranged from 49 days (well 6') to 184 days (well 5').

It may be stated that for a greater part of the analysed water years waters retained in the investigated reservoir fed groundwaters in adjacent areas, with the longest supply time ranging from 282 up to 366 days recorded for wells from P-2 to P-21 located within a close distance from the dam (Table 4).

Table 4. The numbers of days when reservoir waters were supplied by ground waters in adjacent area and ground waters in adjacent area were supplied by reservoir waters in 2015, 2016 and 2017 hydrological years

Well no.	Number of days					
	Groundwaters supplying reservoir waters			Reservoir waters supplying groundwaters		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
P-2	7	0	0	282	366	365
P-3	7	0	0	282	366	365
P-16	7	0	0	282	366	365
P-17	7	0	0	282	366	365
P-18	7	0	0	282	366	365
P-20	7	0	0	282	366	365
P-21	0	0	0	289	366	365
1'	-	0	42	-	366	323
2'	-	7	105	-	359	260
3'	-	0	56	-	366	309
4'	-	70	259	-	296	106
5'	-	184	365	-	182	0
6'	-	35	147	-	331	218

In turn, in the case of wells nos. 1' to 6' located in the central area of the reservoir the waters were found to flow in both of these opposite directions. According to Radecki-Pawlik and Kapusta (2006), surface retention may not only be supplied by precipitation, but also by the soil itself, if in a porous medium such hydraulic gradients are formed, which may counter the gradient of the gravitational potential directed downward. In the analysed years groundwaters fed the reservoir waters for a period ranging from 7 days (well 2') up to 365 days (well 5'). Recorded results are confirmed e.g. by studies conducted by Bem and Kacy (2003) in the Stawy Raszyńskie Nature Reserve, in which those authors stressed in the case of groundwaters the possible occurrence of a draining or alimentary effect of reservoirs on adjacent areas.

It needs to be observed here that the longer supply time of reservoir waters with groundwaters was recorded for wells nos. 4', 5' and 6' located east of the reservoir, which may be explained by the greater supply area and influx of waters from outside the immediate catchment.

Calculations of relationships between elevations of water pools in the reservoir and elevations of groundwater tables in the investigated wells conducted

for the analysed winter and summer half-years of the investigated water years in most cases showed strong dependencies. In the winter half-years of the first two years the calculated correlation coefficients ranged from 0.58 for well P-16 to 0.96 for wells P-2 and P-18 (Table 5). In turn, for the summer half-years these values ranged from 0.34 for well 3' to 0.99 in wells P-2 and P-3. It needs to be observed here that in most cases, except for the correlation for well 3', the obtained dependencies were significant at $\alpha = 0.01$. As it was reported by Kala (2002), for the phenomena analysed in life sciences objective inference on strong dependencies is sufficient already at the significance level $\alpha = 0.05$. In turn, in the winter half-year of the last year of the study the weakest dependencies were found between the discussed parameters. Statistically significant relationships were obtained for only six out of all the discussed wells, in which correlation coefficients ranged from 0.48 (well 2') to 0.85 (well P-20).

Table 5. Correlation coefficients (r) and significance levels (α) for relations of water levels in the reservoir with groundwater depths, in analysed wells in the adjacent area in winter and summer half-years of the 2015, 2016 and 2017 hydrological years

Well no.	P-2	P-3	P-16	P-17	P-18	P-20	P-21	1'	2'	3'	4'	5'	6'
Winter half-year of 2015													
r	0.94	0.94	0.88	0.91	0.96	0.93	0.91	-	-	-	-	-	-
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
Summer half-year of 2015													
r	0.9	0.9	0.89	0.89	0.95	0.92	0.92	-	-	-	-	-	-
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
Winter half-year of 2016													
r	0.96	0.95	0.58	0.75	0.75	0.62	0.88	-	-	-	-	-	-
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
Summer half-year of 2016													
r	0.99	0.99	0.75	0.89	0.97	0.78	0.97	0.79	0.8	0.34	0.75	0.62	0.85
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.01	0.01
Winter half-year of 2017													
r	0.6	0.6	0.24	0.33	0.34	0.85	0.61	0.1	0.48	0.1	0.45	0.1	0.62
α	0.01	0.01	-	-	-	0.01	0.01	-	0.01	-	-	-	0.01
Summer half-year of 2017													
r	0.74	0.74	0.61	0.64	0.73	0.9	0.74	0.79	0.94	0.89	0.94	0.81	0.97
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

A considerable effect on such a situation in that half-year was exerted by the below zero temperatures maintained from mid-December to the third decade of February, which could have considerably disturbed the mutual relationships between waters retained in the reservoir and groundwaters in the adjacent areas. In turn, for the summer half-year of the discussed year, similarly as in the earlier analysed summer half-years, strong dependencies were obtained, since the

correlation coefficients ranged from 0.61 for well P-16 to 0.97 for well 6' (Table 5, Fig. 7) and these values were also significant at $\alpha = 0.01$.

It may be stated that apart from the course of weather conditions and relief in the immediate vicinity of the reservoir, the strong dependencies resulted also from the properties of the deposits lying in the area adjacent to the reservoir. According to Halfen and Czamary (2007) and Michalak and Nowicki (2009), hydrogeological parameters of deposits found in the escarpments and bottom of a given reservoir and its immediate vicinity, particularly porosity, to a considerable degree determine mutual dependencies between reservoir waters and groundwaters.

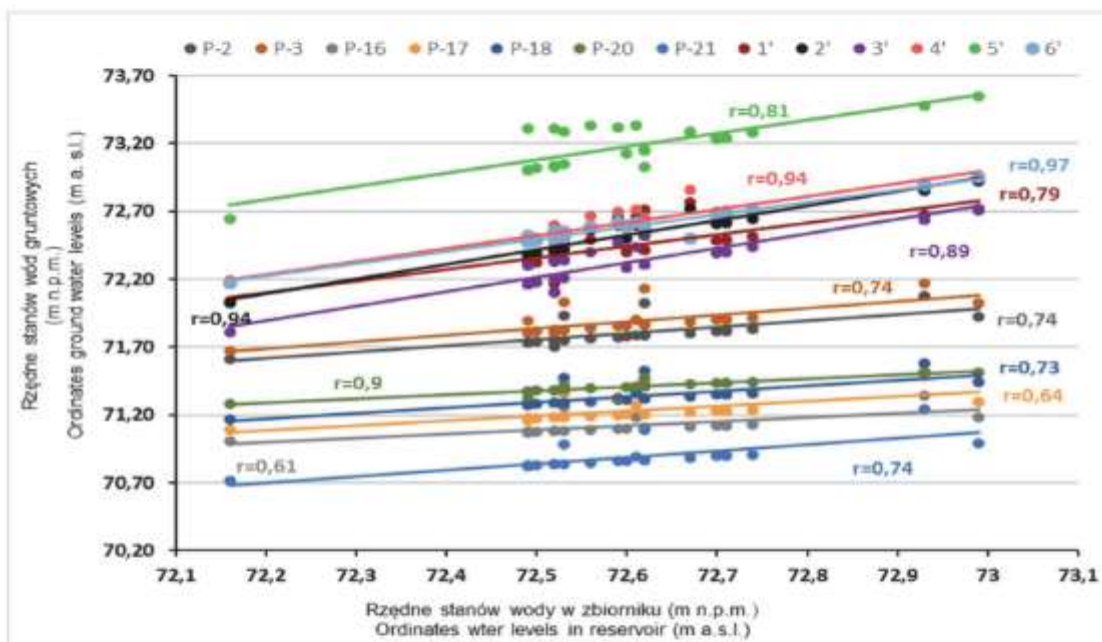


Fig. 7. Correlations between elevations of water levels in the Przebędowo reservoir and elevations of groundwater levels in analysed wells in the 2017 summer half-year

Mutual relationships between waters retained in reservoirs and groundwaters in adjacent areas have been investigated in many regions of Poland. Strong dependencies between these parameters have been stressed e.g. by Zubala (2005) and Przybyła and Kozdrój (2013) in their studies conducted on the Pakosław reservoir in the Orla river catchment. Many authors have also underlined the positive effect of waters retained in reservoirs on groundwaters in adjacent areas, manifested mainly in their supply in drought periods, as shown e.g. in studies by Szafrański and Stefanek (2008) carried out on the Mściwojów dam reservoir and by Sojka et al. (2010) in the Struga Dormowska catchment.

As it was reported by Operacz et al. (2012), an artificially raised water table by structures regulating damming height in relation e.g. to dam reservoirs

considerably contributes to an increase in catchment retention. This phenomenon to a considerable extent prevents aridification of the area. According to those authors, from the point of view of water management increased underground retention, frequently close to total retention capacity of the catchment, is of paramount importance for the water cycle in the system.

For this reason it is crucial to conduct further studies on already existing facilities, which may serve as training grounds, particularly for the future new retention reservoirs and their assessed impact on the adjacent areas. According to Kanownik et al. (2011), at the accumulation of surface waters in reservoirs for their commercial or recreation use, monitoring studies are required especially in suburban areas under stronger anthropopressure. We also need to remember of the fact that the construction of dam reservoirs is considered to be particularly risky and requiring thorough analyses. Generally when assessing available water resources in catchments of watercourses located in river valleys we need to take into consideration infiltration or drainage effects of the main receiving waters on the adjacent area (Olszewska et al. 2012).

4. Conclusions

1. Conducted studies confirmed that a marked effect on the fluctuations in the water pool in the reservoir and groundwater levels in the adjacent area was exerted by the weather conditions, particularly daily precipitation totals in individual half-years of the analysed years. The maximum water levels in the reservoir and groundwaters in the analysed wells in the winter half-years was most frequently observed at the turn of March and April. In turn, in the summer half-years no definite trend was observed, as is frequently characteristic of drainless reservoirs. High water levels were most typically recorded at the turn of July and August and towards the end of those half-years.
2. Studies also showed that measures connected with water management in the flood control retention facilities, such as dam reservoirs, often significantly determine also changes in water levels both in the reservoir itself and groundwaters in the adjacent area. The measures classified as flood control prevention, e.g. opening of bottom outlets on damming structures in critical situations, contribute to the restoration or maintenance of natural outflow conditions from the catchment and limit flood damage in a given area.
3. The analysis of changes in the elevations of reservoir waters and groundwaters in the adjacent area indicated that for a greater part of the analysed hydrological years waters retained in the investigated reservoir fed groundwaters of adjacent areas, while the longest supply time, ranging from 282 days to 366 days, was found for wells P-2 to P-21 located in the vicinity of the dam. In turn, for wells from 1' to 6' located in the area of the central part of the

reservoir the flow of waters in two opposite directions was observed, with the reservoir serving draining function next to the alimentary function.

4. Calculations for the relationships between elevations of waters in the reservoir and those of groundwater levels in the investigated wells, obtained for the analysed winter and summer half-years of the studied hydrological years in most cases showed strong dependencies. However, it needs to be stressed that stronger mutual dependencies between the above-mentioned parameters were found for the summer half-years, for which calculated correlation coefficients, statistically significant at $\alpha = 0.01$, ranged from 0.61 for well P-16 to 0.99 for wells P-2 and P-3, respectively.

References

- Bąk, B. (2003). Warunki klimatyczne Wielkopolski i Kujaw [Climatic conditions of the Wielkopolska and Kujawy regions]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 3.
- Bem, B., Kaca, E. (2003). Uwarunkowania obiegu i retencjonowania wody w Rezerwacie Przyrody „Stawy Raszyńskie” [Conditions of water cycle and retention in the Stawy Raszyńskie Nature Reserve]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 3(6), 85-95.
- Chalfen, M., Czamara, A. (2007). Wpływ projektowanego zbiornika małej retencji na stany wód podziemnych w jego otoczeniu [The impact of a designed small retention reservoir on groundwater levels in its vicinity]. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiec-tus* 6(4), 3-16.
- Głuchowska, B., Pływaczyk, L. (2008). Zwierciadło wody gruntowej w dolinie Odry, poniżej stopnia wodnego w Brzegu Dolnym [Groundwater table in the Odra river valley downstream the barrage in Brzeg Dolny]. *Współczesne Problemy Inżynierii Środowiska*, V, 109.
- Górniak, A., Piekarski, M. (1999). Charakter i zasięg wpływu zbiornika zaporowego Siemianówka na ekosystem Narwi [Character and range of impact of the Siemianówka dammed reservoir on the Narwia river ecosystem]. Proceedings of the scientific and engineering conference "Operation and impact of large lowland reservoirs based on the Jeziorsko reservoir". Wyd. AR Poznań, pp. 279-289.
- Grajewski, S. (2013). Warunki termiczne w Puszczy Zielonce w latach 1987-2008 [Temperature conditions in the Puszcza Zielonka Forest in the years 1987-2008]. *Nauka, Przyroda, Technologie*, 7(1), 1-10.
- Kaca, E., Drabiński, A., Ostrowski, K., Pierzgalski, E., Szafranski, Cz. (2011). Gospodarowanie wodą w sektorze rolno-żywnościowym i obszarach wiejskich w warunkach nowych wyzwań i ograniczeń [Water management in the agri-food sector and rural areas in view of new challenges and limitations]. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 14-21.
- Kala, R. (2002). Statystyka dla przyrodników [Statistics for life scientists]. *Wydawnictwo Akademii Rolniczej*, Poznań, 231.

- Kanownik, W., Kowalik, T., Bodgał, A., Ostrowski, K., Rajda, W. (2011). *Jakość i walory użytkowe wód odpływających ze zlewni zbiorników małej retencji planowanych w rejonie Krakowa*. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu rozwojowego nr R12 001 02 sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego [Quality and utility value of water flowing from the catchment of planned small retention reservoirs near Kraków. Results of studies conducted within the R&D project no. R12 001 02 financed by the Ministry of Science and higher Education], 36.
- Kondracki, J. (2000). *Geografia regionalna Polski [Regional geography of Poland]*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Król, P., Brandyk, A., Dobrzelewski, B. (2010). Analiza wpływu retencyjnego zbiornika lateralnego na poziom wód gruntowych terenów przyległych [Assessment of the impact of a lateral retention reservoir on groundwater levels in adjacent areas]. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 2(48), 49-59.
- Michalec, B. (2012). Wstępna prognoza oddziaływania zbiornika Świnna Poręba na poziom wód gruntowych miejscowości Muchacz [Preliminary assessment of the impact of the Świnna Poręba reservoir on groundwater levels in the town of Muchacz]. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 58, 239-250.
- Mioduszeński, W. (2012): Zjawiska ekstremalne w przyrodzie – susze i powodzie [Extreme weather phenomena – droughts and floods]. *Współczesne Problemy Kształtowania i Ochrony Środowiska, Monografie* 3(3), 7-74
- Nachlik, E. (2006). Ochrona przeciwpowodziowa w powiązaniu z ochroną walorów przyrodniczych rzek i ich dolin [Flood control combined with protection of nature value of rivers and their valleys]. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4(1), 47-62, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.
- Olszewska, B., Pływaczyk, L., Łyczko, W. (2012). Oddziaływanie spiętrzenia Odry stopniem wodnym w Brzegu Dolnym na przepływy w cieku Jeziorka w latach 1971-2010 [Impact of damming the Odra with a barrage in Brzeg Dolny on discharge in the Jeziorka watercourse in the years 1971-2010]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 12/3(39), 161-170.
- Operacz, A., Operacz, T., Tomalik, J. (2012). Wpływ realizacji małych elektrowni wodnych na warunki hydrogeologiczne [The impact of small hydropower plants on hydrogeological conditions]. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 2, 55-62.
- Przybyła, Cz., Kozdrój, P. (2013). Wpływ zbiornika lateralnego Pakosław na położenie zwierciadła wód gruntowych terenów przyległych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15, 1673-1688.
- Przybyła, Cz., Kozdrój, P., Sojka, M. (2014). Ocena jakości wód w lateralnych zbiornikach Jutrosin i Pakosław w pierwszych latach funkcjonowania [Assessment of water quality in the Jutrosin and Pakosław lateral reservoirs in the first years of their operation]. *Inżynieria Ekologiczna*, 39, 123-135.

- Puczyńska, I., Skrzypski, J. (2009). Integracja działań biologicznych i technicznych jako podstawa intensyfikacji procesów samooczyszczania się zbiorników zaporowych (na przykładzie zbiornika Sulejowskiego) [Integration of biological and engineering measures as the basis for intensification of self-purification in dam reservoirs (based on the Sulejowski reservoir)]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 16(S2), 221-23.
- Radecki-Pawlik, A., Kapusta, A. (2006). Mała retencja wodna i jej znaczenie [Small retention and its importance]. *Aura*, 3, 32-33.
- Sojka, M., Murat-Błażejewska, S., Kanclerz, J. (2010). Ocena możliwości retencjonowania wody w jeziorach zlewni Strugi Dormowskiej [Assessment of water retention potential in lakes of the Struga Dormowska catchment]. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi, 8/1, 5-13.
- Szafrąński, Cz. Stefanek, P. (2008). Wstępna ocena wpływu zbiornika Mściwojów na przepływy w rzece Wierzbak i głębokości zwierciadła wody gruntowej w terenach przyległych [Preliminary assessment of the impact of the Mściwojów reservoir on flow in the Wierzbak river and groundwater table in adjacent areas]. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 10, 491-502.
- Szczykowska, J., Siemieniuk, A. (2011). Znaczenie zbiorników retencyjnych na terenach rolniczych oraz jakość ich wód [The role of retention reservoirs in agricultural areas and the quality of their waters]. *Inżynieria Ekologiczna*, 26, 103-111.
- Traczewska, T. M. (2012). *Problemy ekologiczne zbiorników retencyjnych w aspekcie ich wielofunkcyjności* [Ecological problems of retention reservoirs in terms of their multiple functions]. European symposium "Contemporary problems in flood control", Paris – Orléans, 1-8.
- Zieliński, Piotr (2015). *Summary of scientific accomplishments*. Department of Environmental Protection, Institute of Biology, Faculty of Biology and Chemistry, University of Białystok, 38 (in Polish).
- Zubala, T. (2005). Możliwość retencjonowania odpływu na przykładzie wybranej mikro-zlewni lessowej [Outflow retention potential based on a selected lessive micro-catchment]. *Acta Agrophysica*, 5(1), 219-228.

Abstract

The article presents the results of investigations carried out in the hydrological years of 2015, 2016 and 2017 in the Przebędowo reservoir basin (in areas adjacent to the reservoir). It is located in the Wielkopolskie province, 25 kilometres north of Poznań in the Murowana Goślina commune. The analysed catchment with an area of approx. 100 km² is mostly covered by forests, while in the immediate vicinity of the reservoir it also comprises arable land. The entire catchment is covered by postglacial deposits, such as sands and clays. Areas adjacent to the reservoir are composed of quaternary (Pleistocene) fluvial deposits. The analysis of layers contained within piezometers showed the predominance of medium sands, which were deposited up to a depth of about 3 m. The groundwaters in those layers formed a continuous aquifer horizon.

The analysed reservoir was constructed in the valley of the Trojanka river, from km 6 + 915 to km 8 + 371 of the river course, by the Greater Poland Provincial Land Drainage and Water Units Board in Poznań. It was put into operation in November 2014. The earth dam of the reservoir is class IV it is 334 meters long and 3.30 meters high. The reservoir with a length of 1450 m and a maximum bed-width of 120 m at a normal damming level has a flooded surface of 12.03 ha. The main purpose of the reservoir is to store water for agricultural purposes, improve climatic and water conditions in the adjacent agricultural areas, provide protect against flooding and fire for areas lying both below the dam and adjacent to the reservoir. Around the reservoir an ecological buffer zone was made in the form of tree and shrub plantings. It reduced runoff of biogenic compounds (nitrogen and phosphorus) and pesticides from adjacent agricultural areas.

The conducted analysis of precipitation data according to the criterion developed by Kędziora (1995) (following Kaczorowska, 1962) showed that the water year of 2015 was dry. The precipitation total in that year was 429 mm and was lower than the average of the multi-year period by 131 mm, while temperature was higher than average by 0.5°C. In contrast, the water year of 2016 was wet, as the precipitation total in that year was 682 mm, i.e. by 122 mm higher than the average of the multi-year period, with the air temperature higher than the average by 0.4°C. The last water year analysed (2017) was very wet, because the precipitation total exceeded the multi-year average by 244 mm, with the air temperature close to the average.

Results indicated that next to the character of the reservoir, also meteorological conditions had a considerable impact on changes in water levels in the analysed reservoir and groundwater levels in the adjacent area. Research showed a hydraulic connection between the water retained in the reservoir and groundwater in the adjacent areas. It was found that over a greater part of the water years analysed in this paper the water retained in the Przebędowo reservoir fed groundwaters of the adjacent areas. The longest supply time, which ranged from 282 days to 366 days, was recorded for wells P-2 to P-21. They are located within a short distance from the dam. In contrast, in the case of wells 1' to 6', located near the middle part of the reservoir, two-way water flow was found. In the analysed years the water in reservoir was fed by the groundwater from the wells for a period between 7 days (st. 2') to 365 days (st. 5').

The analyses carried out in the winter and summer half-years of the discussed water years indicated mostly strong relations between the elevation of water levels in the reservoir and groundwater elevation in the studied wells. However, it was found that the interrelationships between the discussed values were stronger in the summer half-years. The obtained research results generally showed that the waters accumulated in the Przebędowo reservoir have a positive impact on groundwaters in the adjacent areas and feed them during drought periods.

Keywords:

small-scale water retention, dammed reservoirs, groundwater

Ocena oddziaływania zbiornika zaporowego na zwierciadło wód gruntowych w terenach przyległych na przykładzie obiektu Przebędowo

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w latach hydrologicznych 2015, 2016 oraz 2017 w zlewni zbiornika Przebędowo (w terenach bezpośrednio przyległych do zbiornika), zlokalizowanej w województwie wielkopolskim, 25 km na północ od Poznania w gminie Murowana Goślina. W omawianej zlewni, o powierzchni około 100 km² przeważają lasy, a w mniejszym stopniu w terenie bezpośrednio przyległym do zbiornika występują grunty orne. Na całym obszarze zalegają utwory polodowcowe takie jak piaski i gliny. W ogólnym ujęciu tereny przyległe do zbiornika zbudowane są z osadów czwartorzędowych (plejstocen) fluwialnych, a analiza warstw objętych piezometrami wykazała przewagę piasków średnich zalegających do głębokości około 3m, w których wody gruntowe tworzą ciągły poziom wodonośny. W terenie bezpośrednio przyległym do zbiornika występują grunty orne.

Analizowany zbiornik został wykonany w dolinie rzeki Trojanki, od km 6+915 do km 8+371 jej biegu przez Wielkopolski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Poznaniu i został oddany do eksploatacji w listopadzie 2014 roku. Ziemna zaporą czołowa na zbiorniku jest klasy IV, jej długość wynosi 334 m, przy wysokości 3,30 m. Zbiornik o długości 1450m i szerokości maksymalnej 120m, przy normalnym poziomie piętrzenia (NPP) ma powierzchnię zalewu 12,03ha. Głównym celem zbiornika jest magazynowanie wody dla celów rolniczych, poprawa warunków klimatycznych i wodnych na przyległych użytkach rolnych, oraz ochrona przeciwpowodziowa i przeciwpożarowa terenów leżących poniżej zapory, a także terenów przyległych do zbiornika. Wokół zbiornika wykonano ekologiczną strefę buforową w postaci nasadzeń z drzew i krzewów, redukującą spływy związków biogenych (azot, fosfor) i środków ochrony roślin z przyległych terenów użytkowanych rolniczo.

Przeprowadzona analiza wilgotnościowa omawianych w pracy lat według kryterium Kędziory 1995 (za Kaczorowska 1962) pozwoliła stwierdzić, że pierwszy analizowany w pracy rok hydrologiczny 2015 był rokiem suchym, w którym suma opadów wyniosła 429 mm i była niższa od średniej z wielolecia o 131 mm, przy temperaturze powietrza wyższej od średniej o 0,5°C. Natomiast rok hydrologiczny 2016 był rokiem wilgotnym, w którym suma opadów wyniosła 682 mm i była wyższa od średniej z wielolecia o 122 mm, przy temperaturze powietrza wyższej od średniej o 0,4°C. Ostatni analizowany w pracy rok hydrologiczny 2017 był bardzo wilgotny, gdyż suma opadów przekroczyła w tym roku średnią z wielolecia aż o 244 mm, przy zbliżonej do średniej temperaturze powietrza.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że duży wpływ na zmiany stanów wody w analizowanym zbiorniku i wód gruntowych w terenie przyległym, poza charakterem zbiornika, miał przebieg warunków meteorologicznych. Badania wykazały, że pomiędzy wodami retencjonowanymi w zbiorniku a wodami gruntowymi w terenach przyległych istnieje więź hydrauliczna. Stwierdzono, że przez większą część analizowanych w pracy lat hydrologicznych retencjonowane w omawianym zbiorniku wody zasilały wody gruntowe terenów przyległych, przy czym najdłuższy czas zasilania, wynoszący od 282 dni

do 366 dni, stwierdzono dla studzienek od P-2 do P-21 zlokalizowanych w niedalekiej odległości od zapory. Natomiast w przypadku studzienek od 1' do 6' zlokalizowanych w okolicach środkowej części zbiornika stwierdzono dwukierunkowy przepływ wód. W analizowanych latach wody gruntowe zasilają od strony tych studzienek wody zbiornika przez okres od 7 dni (st. 2') do 365 dni (st. 5').

Przeprowadzone w analizowanych półroczach zimowych i letnich omawianych lat hydrologicznych obliczenia związków pomiędzy rzędnymi stanów wody w zbiorniku, a rzędnymi zwierciadła wód gruntowych w badanych studzienkach wykazały w większości silne zależności. Stwierdzono jednak, że wzajemne powiązania pomiędzy omawianymi wielkościami silniejsze były w półroczach letnich analizowanych lat.

W ogólnym ujęciu uzyskane wyniki badań wykazały, że zasoby wodne gromadzone w zbiorniku Przebędowo pozytywnie oddziałują na wody gruntowe terenów przyległych, zasilając je w okresach posusznych.

Słowa kluczowe:

mała retencja, zbiorniki zaporowe, wody gruntowe

8.2. Publikacja #2

The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, s.: 324-346



MIDDLE POMERANIAN SCIENTIFIC SOCIETY OF THE ENVIRONMENT PROTECTION

Rocznik Ochrona Środowiska

Volume 22.

Year 2020

ISSN 1506-218X

324-346

The Water Balance in a Dam Reservoir – a Case Study of the Przebędowo Reservoir

Błażej Waligórski¹, Mariusz Korytowski^{2}, Adam Zydróż²,
Daniel Liberacki², Michał Fiedler², Rafał Stasik²*

¹State Water Holding Polish Waters;

Regional Water Management Authority in Poznań, Poland

²Poznań University of Life Sciences, Poznań

**corresponding author's e-mail: mariusz.korytowski@up.poznan.pl*

1. Introduction

Extreme weather events, particularly droughts, frequently contribute to disturbances in the natural water balance (Characteristics... 2007). As it was reported by Wibig (2012), the present-day climate warming, in Poland manifested in an increase of temperature in the second half of the 20th century by almost 1°C, has led to a growing risk of water deficits. Climate warming results in an increased potential evaporation, which at practically unchanged precipitation totals causes a reduction of the climatic water balance. According to Radzka (2014), in central and eastern Poland in the months of the vegetation season the frequency of negative climatic water balances is 2-fold greater than the incidence of positive balances. The negative values of this index have been recorded most frequently in the spring months, while the positive balances have been most common in September.

For this reason it continues to be of paramount importance to conduct research on water balances both for entire catchments and reservoirs located in such catchments. However, it needs to be stressed here that at the end of the 20th century very few studies concerned water balances of lakes in Poland; as indicated by Choiński (1995) due to problems in preparing water balances for lake waters such case studies were conducted for only several dozen of lakes in Poland.

Depending on the character of a given reservoir the water balance equations may take more or less complex forms. In relation to dammed reservoirs, which location in the river continuum frequently leads to changes in the previous hydrologic conditions, a reliable characterisation of water balance components is often a complicated process. According to Gruszczyński et al. (2009), one of the most

significant changes in the filtration area as a result of damming is related to a unique situation found in the immediate vicinity of the damming structure. This is the site, where hydrogeological conditions have been drastically altered, as it combines the areas with an unchanged drainage base (the region downstream of the damming structure) and areas with a maximum rise of water levels (the region upstream of the damming structure). As it was reported by Traczewska (2012), dammed reservoirs exhibit many characteristics distinguishing them from natural lakes or rivers, and thus they constitute a separate category of surface water bodies.

A reliable determination of individual components of the water balance for a given water body or reservoir not only provides information on its functioning, but also makes it possible to assess its available water capacity. According to Szczykowska and Siemieniuk (2011), water retention in reservoirs, including dammed reservoirs, generally contributes greatly to a marked improvement of the balance of water resources.

In view of the threats related to drought all measures aiming at the determination of the water balances for reservoirs may contribute to the limitation of the adverse effects of droughts.

The aim of this study was to characterise the water balance of a dammed reservoir of Przebędowo in two hydrological years differing in terms of precipitation totals.

2. Material and methods

This study presents the results of investigations conducted in the hydrological years of 2017 and 2018 in the immediate catchment of the Przebędowo reservoir, located in the Wielkopolskie province 25 km north of Poznań in the Murowana Goślina commune (Fig. 1).

According to the physico-geographical regionalisation of Poland (Konracki 2000) the area of the study with the early post-glacial landscape is located in the Wielkopolska Lake District in the area of the Poznań Warta Gorge (315.52). The total catchment area of the reservoir is approx. 95 km², while the direct alimentation area of the lake (catchment direct) covers 1.31 km². The areas adjacent to the reservoir are arable lands (cereal crops) composed of fluvial Quaternary (Pleistocene) deposits, while the analysis of layers covered by piezometers showed a predominance of medium sands deposited to a depth of approx. 3 m.

The analysed reservoir was constructed in the valley of the Trojanki river (from 6+915 km to 8+371 km of its course) by the Wielkopolska Land Reclamation and Hydraulic Structure Authority in Poznań and it was commissioned in November 2014. The embankment dam of the reservoir is class IV, it is 334 m in length and 3.30 m in height (Fig. 2).

The reservoir of 1450 m in length and maximum width of 120 m, at the normal pool elevation of 72.50 m a.s.l. has a mean depth of 0.94 m and the pool area of 12.03 ha (Fig. 3, Table 1).



Fig. 1. Location of the Przebędowo reservoir in the Wielkopolska region



Fig. 2. The embankment dam with the spillway-overflow structure (steady level damming) in the Przebędowo reservoir

The shoreline length of the reservoir is 2980 m, shoreline density is $248 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ and the elongation index is 12. In turn, the flood control capacity derived from the difference between normal and maximum pool level is around 67000 m^3 .



Fig. 3. A view of the Przebędowo reservoir (Sojka et al. 2017)

Water levels in the reservoir were measured at the staff gauge installed at the damming structure situated at the reservoir outlet. Additionally, water levels in the reservoir were continuously recorded using a hydrostatic level sensor, which readings were transmitted to a remote telemetry module installed at the spillway tower.

Table 1. Basic morphometric parameters of the Przebędowo reservoir

Item	List	Unit	Value
1	Surface area	ha	12.03
2	Length	m	1450
3	Maximum width	m	120
4	Mean depth	m	0.94
5	Length of shoreline	m	2980
6	Shoreline density	$\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$	248
7	Elongation index	–	12
8	Total capacity at normal pool level	m^3	162 350
9	Flood control capacity derived from the difference between normal and maximum pool levels	m^3	67 100

This study was based on measurements of groundwater levels taken at 7 selected wells installed during reservoir construction: P-2 and P-3 in the area adjacent to the reservoir to the west, and wells P-16, P-17, P-18, as well as P-20 and P-21 installed to the east of the reservoir. From May 2016 groundwater levels were measured in additionally installed wells (from 1' to 6') located in the area adjacent to the reservoir at a distance of approx. 10 m from its shore in three representative sections (Fig. 4). Water levels in the years of analysis were measured at 14-day intervals. In turn, weekly water levels in the analysed wells were recreated by calculating mean values from measurements taken every two weeks.



Fig. 4. Location of wells for groundwater level measurements in the area adjacent to the reservoir (source: the authors' study based on Google Earth <https://www.google.pl/intl/pl/earth/>)

Meteorological conditions in the discussed hydrological years (precipitation and air temperatures), compared to the data from the multiannual period of 2000-2015, were characterised based on the results of measurements recorded at the weather station of the Experimental and Teaching Station of the Forest Arboretum in Zielonka, located approx. 8 km south-east from the reservoir. The weather station is situated in the central part of the Zielonka Forest at 91.00 m a.s.l., at 52°33'00"

northern latitude and 17°06'33" eastern longitude. Measurements have been recorded there continuously since 1986, while readings are recorded three times a day (Grajewski and Pacholczyk 2011).

Moisture conditions for the analysed hydrological years were characterised according to Kędziora (1995, after Kaczorowska 1962) taking into consideration the criteria given in Table 2.

Table 2. Characteristics of moisture conditions in hydrological years

Type of year	% normal precipitation
Extremely dry	below 50
Very dry	50-74
Dry	75-89
Average	90-110
Wet	111-125
Very wet	126-150
Extremely wet	over 150

In view of the considerable, both half-year and yearly, values of water balance components included in the so-called river water exchange (inflow and surface runoff in the Trojanka watercourse) the water balance of the investigated reservoir was expressed in hm^3 and calculated using the following equation:

$$P + H_d + H_p + H_{pp} + \Delta R_1 = E + \Delta R_2 + H_o + H_{opp} + H_w \quad (1)$$

where: P – precipitation onto the reservoir surface (hm^3), H_d – inflow to the reservoir from the Trojanka watercourse (hm^3), H_p – surface inflow to the reservoir from adjacent areas (hm^3), H_{pp} – subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas (hm^3), ΔR_1 – increase in retention (hm^3) E – evaporation from the reservoir surface (hm^3), ΔR_2 – loss of retention (hm^3), H_o – outflow from the reservoir with the Trojanka watercourse (hm^3), H_{opp} – subsurface outflow from the reservoir to adjacent areas (hm^3), H_w – uncontrolled underground outflow (hm^3). At the same time, in view of the relatively small fluctuations in water levels within the reservoir, the water balance of the analysed reservoir was assessed in reference to its surface at normal pool level.

In the calculations for the water balance of the analysed reservoir the precipitation level was adjusted by the correction resulting from the formula proposed by Jaworski, recommended for the conditions prevalent in the Wielkopolska region by Kędziora (1995):

$$P_s = 1.034 \cdot P_z + 0.484 \cdot N + 4.0 \quad (2)$$

where:

Ps – adjusted precipitation (mm),

Pz – precipitation catch (mm),

N – number of days with precipitation in a month.

In turn, precipitation feeding the reservoir was calculated from the dependence:

$$P = Ps \cdot Azb, \quad (3)$$

where:

Ps – adjusted precipitation (mm),

Azb – reservoir surface area (ha).

Values of inflow to the reservoir with the Trojanka watercourse (Hd) and outflows (Ho), as well as surface inflows (Hp) from two drainage ditches (A and B, Fig. 4) feeding the reservoir from the north-west (A) and east (B), were determined based on calculations of flow rates, which in turn were established using water flow velocity measured using a hydrometric current meter (electromagnetic open flow meter FLAT Model 801 by Valeport) with measurements taken once a month. Flows were calculated using characteristic curves plotted based on in-situ measurements.

Values of subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas (Hpp) and outflow from the reservoir to adjacent areas (Hopp) were determined using the Darcy formula (Rushton 2003):

$$Q = k \cdot I \cdot O \cdot \Delta h \quad (4)$$

where:

k – hydraulic conductivity ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$),

I – hydraulic gradient,

O – length of shoreline (m),

Δh – aquifer thickness (m).

The value of hydraulic conductivity was assumed at $k = 24.704 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, determined as the mean for the values obtained during bore drilling at the installation of piezometers, established using the Hazen method and contained in the documentation from the execution of geotechnical works related to the assembly of piezometers for the small retention reservoir of Przebędowo (2014) and prepared by Geoprogram (W. Andrzejewski, R. Urban) from Bydgoszcz.

The thickness of the aquifer (Δh) participating in the feeding of water to the reservoir from adjacent areas was reversely determined based on the difference between the water level in the reservoir and water levels in the analysed wells (mean value). In turn, the number of days with groundwater being fed by waters stored in the reservoir was determined in the analysed years based on the difference between ordinates of water levels in the reservoir and groundwater levels in the wells included in the analyses.

Monthly evaporation from the reservoir surface was calculated using the formula proposed by Tichomirow (Kędziora 1995):

$$E_1 = d \cdot (15 + 3 \cdot v) \quad (5)$$

where:

E – monthly evaporation from the water surface (mm),

d – mean monthly humidity deficit (mmHg),

v – mean monthly wind velocity at the anemometer (m/s).

In turn, half-year and yearly values of evaporation were determined from the formula:

$$E = E_1 \cdot A_{zb} \quad (6)$$

where:

E_1 – evaporation from the reservoir surface (mm),

A_{zb} – surface area of the reservoir (m²).

Increments (ΔR_1) or losses (ΔR_2) of water retention in the reservoir were determined based on changes in water levels recorded at the staff gauge installed at the damming structure. In turn, the value of uncontrolled underground outflow (H_w) was determined as the complement to the water balance equation.

Data on recorded water levels in the discussed facility were used as kindly provided at the permission of the Director of the former Wielkopolska Land Reclamation and Hydraulic Structure Authority in Poznań (presently the State Water Holding Polish Waters; Regional Water Management Authority in Poznań).

3. Results and discussion

Wielkopolska is a region, in which the vegetation period is one of the longest in Poland, starting the earliest in western Wielkopolska, where it begins around 28 March. In the South Wielkopolska Lowland the vegetation period lasts approx. 228 days, whereas at its northern boundaries it is only 216 days. Mean annual precipitation totals are 500-550 mm, while in the Gniezno Lake District

and in the southern parts of the Kujawy region they are by 50-100 mm lower. The precipitation deficit is observed particularly in the eastern part of the province. Precipitation is highly irregular and differences in precipitation totals in individual years may be as high as 250%. The distribution of precipitation during the year or the vegetation period is also far from uniform. More precipitation in the summer period is recorded in the vicinity of water bodies, reservoirs and river valleys, which are located in the paths of storms. Mean annual temperature for the Wielkopolska region is approx. 8.2°C, in the north it drops to 7.6°C, while in the southern and western edges it reaches 8.5°C. Extreme temperatures in the summer period reach +38°C, while during the harshest winters they drop to almost -30°C (Program... 2016, after Bąk 2003).

The hydrological year of 2017 was very wet, since precipitation total in that year exceeded the multiannual mean by as much as 244 mm, at air temperatures close to the mean (Fig. 5).

The winter half-year in that year was average, with precipitation total of 211 mm, by 18 mm lower than the mean. In turn, the summer half-year was extremely wet, as precipitation total in that half-year was 593 mm and it was higher than the multiannual mean by 263 mm, at air temperature exceeding the mean by 0.2°C.

In turn, the second analysed hydrological year (2018) was a very dry year, in which precipitation total was equivalent to as little as 65% normal precipitation and it was lower than that value by 196 mm, at air temperature higher by 1.1°C compared to the mean. Both the winter and summer half-years of that year were very dry, with precipitation totals lower than the means by 79 mm and 115 mm, at air temperatures higher than the means by 0.4°C and as much as 1.6°C, respectively.

Analyses of mean monthly water levels in the investigated reservoir indicate that in the month preceding the winter half-year of 2017 (November) the mean water level was 317 cm (Fig. 6). Precipitation total of 78 mm, which was observed in November and in December, caused a rise in water levels. Mean monthly water level in the reservoir in December was 328 cm and at the same time it was the highest mean value in the discussed half-year. From January to the end of the analysed half-year a lowering of water levels was recorded in the reservoir.

The lowest mean water level was recorded in April and it amounted to 308 cm, being by as little as 7 cm higher than the level corresponding to the normal pool level. A considerable effect on such a situation was exerted by higher air temperatures in March and April and evaporation from the reservoir surface, which jointly in those months amounted to 113 mm.

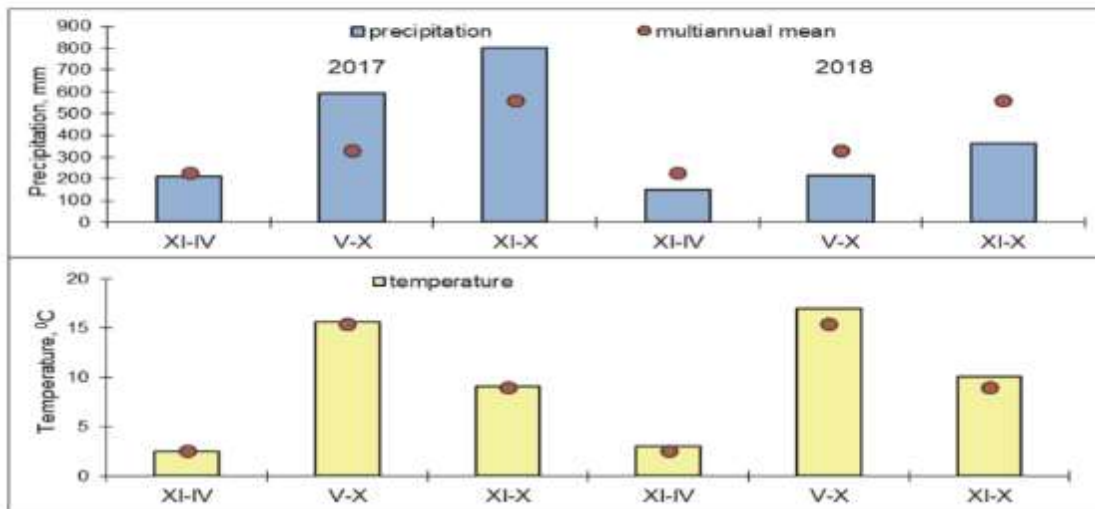


Fig. 5. Half-year and yearly precipitation (P) and average air temperatures (t) in 2017 and 2018 hydrological years, and their deviations from averages of the multiyear period of 2000-2015

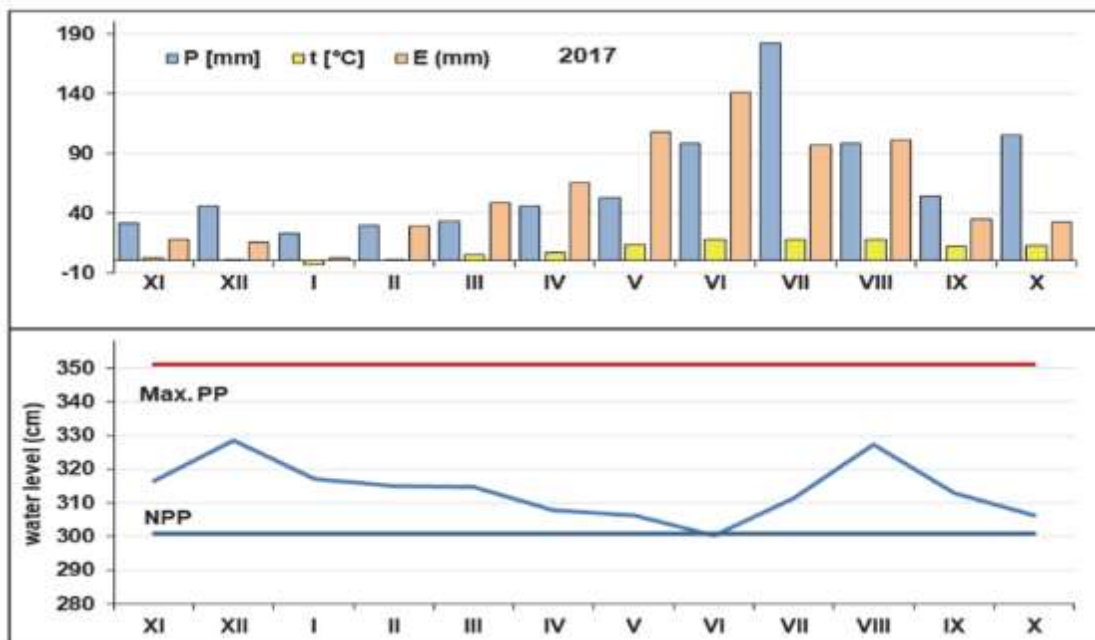


Fig. 6. Mean monthly water levels (cm) in the Przebędowo reservoir and levels corresponding to normal (NPP) and maximum pool levels (Max PP) depending on mean monthly precipitation totals (P) and mean monthly air temperatures (t) as well as monthly evaporation from the reservoir surface (E) in the hydrological year of 2017

In the beginning of the summer half-year (May) of 2017 the mean water level in the analysed reservoir was 306 cm. Higher mean monthly air temperatures observed in May and June (13.8°C and 17.8°C, respectively), as well as high evaporation from the reservoir recorded in those months (jointly 173 mm) contributed to a further lowering of water levels. The mean water level in the reservoir in June was 300 cm and it was the lowest mean level both in the discussed summer half-year and in the entire hydrological year of 2017. In July and August water levels in the reservoir were observed to raise, while their mean values in those months were 311 cm and 327 cm, respectively. A considerable effect on this situation, despite higher air temperatures and evaporation from the reservoir surface, was found for precipitation total of 282 mm, recorded in those months. Results obtained for those months were consistent e.g. with the studies by Błażyca and Rzętała (2013) concerning analyses of changes in water levels in the Pławniowice reservoir, since those authors stressed that maximum water levels were observed in the summer half-year, typically at the turn of July and August following precipitation with high daily totals.

From August to the end of the discussed summer half-year water levels in the reservoir were lowering. The mean water level in September was 313 cm, while in October it was 306 cm. However, it needs to be stressed here that the lowering of the water levels towards the end of the discussed half-year was not directly connected with the course of weather conditions, since precipitation total for September and October was 161 mm, while total evaporation for those months was 67 mm. The values of evaporation calculated for those months were consistent with the results of calculations presented by Górski et al. (2009) in their analysis of the water balance for Lake Czerniakowskie and with the results of direct measurements obtained e.g. for Lake Raduńskie Górne by Wereski et al. (2017). As it was reported by Waligórski et al. (2019), the lowering of water levels in the Przebędowo reservoir was caused by a considerable effect of the anthropogenic factor, related to the opening of bottom gates towards the end of August, in a situation when higher daily precipitation totals and the vegetation debris jamming the damming structure posed a risk of crest overflow spill and flooding of buildings located nearby.

In the winter half-year of the second analysed year of the analyses (2018) the mean water level in the reservoir in November was 305 cm (Fig. 7). In the period from November to February water levels were lowering and during that period they remained below the normal pool level.

Similarly as in the previous analysed year of the study, the marked lowering of water levels in February, when the mean water level was 277 cm and it was lower than normal pool level by 24 cm, was not caused by the weather conditions, but by anthropopressure. In the course of maintenance works performed

in that month due to negligence the bottom gates were left partly open, which resulted in an uncontrolled outflow of water from the reservoir and a lowering of water levels. As it was reported by Mioduszewski and Okruszko (2016), the hydrological functions of this reservoir may be considerably influenced also by its operation. Until the end of the discussed winter half-year the water levels in the reservoir were raising as a result of the bottom gates being completely shut and the progressing reservoir filling. In April the mean water level in the reservoir was 302 cm and it was similar to that corresponding to the normal pool level.

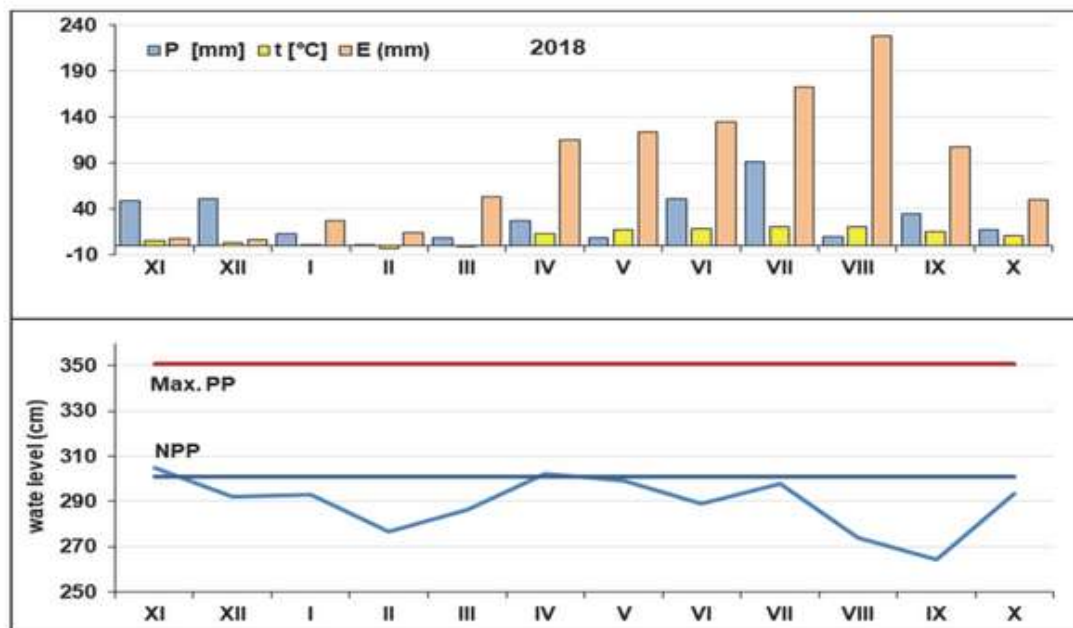


Fig. 7. Mean monthly water levels (cm) in the Przebędowo reservoir and levels corresponding to normal (NPP) and maximum pool levels (Max PP) in view of mean monthly precipitation totals (P) and mean monthly air temperatures (t) and monthly evaporation from the reservoir surface (E) in the hydrological year of 2018

From the beginning of the summer half-year the water levels in the discussed reservoir were falling and in June the mean water level was 289 cm. To a considerable extent this situation was the result of the weather conditions, particularly low precipitation total in May (9 mm) and high evaporation from the reservoir, which total joint value for May and June was as high as 259 mm. A slight increase in water levels in the reservoir was recorded in July due to precipitation total for that month amounting to 92 mm, when the mean water level reached 298 cm.

At the turn of August and September a considerable lowering of water levels was caused to a considerable extent by adverse weather conditions, particularly low precipitation totals in that month, at higher air temperatures and very high evaporation from the reservoir, which jointly amounted to as much as 336 mm. The mean water level in the analysed reservoir in September was 265 cm and it was lowest both in the discussed summer half-year and over the entire hydrological year of 2018.

Towards the end of the discussed half-year water levels were found to increase in the reservoir and in October the mean level was 293 cm. However, throughout the entire analysed summer half-year, which in terms of precipitation was very dry, the mean water levels in the reservoir remained below the level corresponding to the normal pool level (301 cm).

Analysis of the water balance for the Przebędowo reservoir indicates that in the winter half-year of the first year of the study the highest share in terms of increments was recorded for the inflow to the reservoir by the Trojanka water-course, which in the discussed half-year was 12.9 hm³ (Table 3).

Table 3. Components of water balances of the Przebędowo reservoir (hm³) in the winter (XI-IV) and summer (V-X) hydrological half-years of 2017 and 2018

Increments (+) and losses of water (-)	Water balance components	Hydrological half-years			
		2017		2018	
		XI-IV	V-X	XI-IV	V-X
(+)	P	0.03	0.08	0.027	0.032
	Hd	12.9	10.7	5.16	3.59
	Hp	0.165	0.047	0.0025	-
	Hpp	0.0015	0.0002	-	-
	ΔR_1	-	0.011	-	0.004
(-)	E	0.02	0.06	0.03	0.098
	ΔR_2	0.0048	-	0.036	-
	Ho	10.0	9.06	3.75	2.70
	Hopp	0.56	0.55	0.81	0.78
	Hw	2.51	1.16	0.55	0.046

According to Rzętała (2008), when analysing water balances of anthropogenic reservoirs, including dammed reservoirs, in terms of the type of water feeding and artificial control of water circulation, the results of calculations

should be expressed in hm^3 rather than in millimeters, as it is the typical practice in geographical studies.

To a much lesser extent the increments in water resources in that half-year were determined by the inflow to the reservoir from adjacent areas, which was 0.165 hm^3 .

In turn, to the lowest extent the increments were determined by precipitation falling on the surface of the reservoir and by the subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas, which in the discussed half-year amounted to 0.03 hm^3 and 0.0015 hm^3 , respectively. In terms of the water losses the highest share in the water balance equation was found for the outflow from the reservoir with the watercourse, amounting to 10.0 hm^3 . Uncontrolled underground outflow determined as the complement in the balance equation was 2.51 hm^3 . As reported by Rösler et al. (2007), when characterising the water balance of Lake Ślawa the greatest methodological problems were caused by water exchange in the underground drainage zone, frequently leading to a situation when the parameters of underground exchange are typically calculated from the water balance difference. The underground outflow is often problematic; as reported by Lange (1993), currently available research results indicate a considerable predominance of feeding by the underground outflow. Some hydrologists even claim that the underground loss of water is rather unlikely due to the strong bottom sealing of lake basins by impermeable sediments. Previously cited Rösler et al. (2007) reported that colmatation, i.e. silting and sealing of lake basic bottoms by sediments, takes place and plays a significant role in blocking the underground outflow. However, according to those authors particularly in flow-through lakes in the outflow zone sediments may be washed away and wide marginal stream valley filled with permeable deposits (sands, gravel) form the so-called underground outflow gateways. Similar observations were reported by Wojtuszevska (2007) and Dąbska and Popielski (2020), in whose opinion operation of dammed reservoirs is frequently connected with hydrogeological problems, the most frequent of which include e.g. excessive filtration to the substrate and within the dam abutment zone. In the latter case this is frequently caused by quick sands or the so-called piping.

In the analysed half-year the losses in the water balance were to a lesser extent determined by subsurface outflow from the reservoir to adjacent areas, amounting to 0.56 hm^3 . In turn, the smallest share was recorded for evaporation from the reservoir, which was 0.02 hm^3 , and water storage loss in the reservoir, which amounted to 0.0048 hm^3 . In the summer half-year of the discussed hydrological year of 2017, similarly as it was in the winter half-year, a major factor in the water balance of the reservoir in terms of increments was related to the inflow

by the watercourse, which amounted to 10.7 hm^3 . To a much lesser extent the increments were determined by surface inflow from adjacent areas, which reached 0.047 hm^3 . In turn, precipitation falling on the reservoir surface in the discussed half-year amounted to 0.08 hm^3 , while the increment in retention was 0.011 hm^3 . The lowest share in the water increments in that half-year was observed for subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas, being as low as 0.0002 hm^3 . In relation to water losses the greatest share in the balance equation in that half-year was recorded for the outflow from the reservoir through the watercourse, which was 9.06 hm^3 . Uncontrolled underground outflow and subsurface outflow from the reservoir to adjacent areas amounted to 1.16 hm^3 and 0.55 hm^3 , respectively. In turn, water losses related to evaporation from the reservoir amounted to 0.06 hm^3 .

In the second analysed hydrological year of 2018, which in terms of precipitation was very dry, both in the winter half-year (XI-IV) and the summer half-year (V-X), the highest share in the water balance of the reservoir in the case of increments was recorded for the Trojanka inflow, amounting to 5.16 hm^3 and 3.59 hm^3 , respectively (Table 3). However, it needs to be observed here that these values in relation to inflows from the previous year were much smaller. In the winter half-year of 2018 the difference was 7.74 hm^3 , while in the summer half-year it was 7.11 hm^3 . To a much lesser degree the increments in the discussed half-years were determined by precipitation falling on the reservoir surface, which in the winter half-year was 0.027 hm^3 , while in the summer half-year it reached 0.032 hm^3 . The increments to a slight extent were also determined by surface inflow from adjacent areas (in ditches A and B), which was observed only in the winter half-year and amounted to 0.0025 hm^3 , as well as the increment of water storage amounting to 0.004 hm^3 , reported in the summer half-year. It needs to be stressed here that both in the winter and summer half-years of the discussed hydrological year the reservoir was not fed by groundwaters from adjacent areas (Hpp). In turn, in terms of water losses the highest share in the water balance equation for the analysed reservoir was found for the outflow from the reservoir through the watercourse (Ho), which in the winter half-year amounted to 3.75 hm^3 , while in the summer half-year it reached 2.70 hm^3 . However, they were much lower values (by approx. 6 hm^3) in comparison to outflows in 2017, being a wet year in terms of precipitation. A significant share in the losses was also found for subsurface outflow from the reservoir to adjacent areas (Hopp), which suggests that in the discussed hydrological year the reservoir played only the feeding function. In the winter half-year the outflow amounted to 0.81 hm^3 , while in the summer half-year it was 0.78 hm^3 . It may be stated here the analysed Przebędowo reservoir fully served a major function ascribed to retention reservoirs, since as it was reported by Humnicki (2010) and Jaguś et al. (2010) the

main role of such reservoirs is to store water in periods of its excess to be subsequently used during dry spells, e.g. by feeding groundwaters in adjacent areas.

Losses in the water balance equation for the reservoir in the discussed hydrological year were to a lesser extent affected by uncontrolled underground outflow, in the winter half-year amounting to 0.55 hm^3 , while in the summer half-year it was 0.046 hm^3 . In turn, the least important effect on water losses was observed for evaporation from the reservoir surface, which in the winter half-year amounted to 0.03 hm^3 , while in the summer half-year it was 0.098 hm^3 , similarly as it was for storage losses, which in the winter half-year amounted to 0.036 hm^3 .

Analyses of the percentage share of individual components of the water balance for the Przebędowo dammed reservoir over the entire period of the discussed hydrological years show that in the hydrological year of 2017 increments were determined to the greatest extent by inflow to the reservoir through the Trojanka watercourse (Hd), accounting for 49.3% (Fig. 8).

To a lesser extent the water increments were influenced by the surface inflow from adjacent areas (Hp), which constituted 0.44%, and precipitation (P) falling on the reservoir surface (0.23%). In turn, the lowest shares in the water balance equation were found for the increment in water storage (ΔR_1) and subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas (Hpp), which accounted for as little as 0.023% and 0.004%. In terms of losses the greatest share in the water balance for the discussed year was observed for surface outflow from the reservoir (Ho), which accounted for 39.8%, and for uncontrolled underground outflow (Hw) constituting 7.7%. Losses were determined to a lesser extent by subsurface outflows from the reservoir to adjacent areas (Hopp) and evaporation from the reservoir (E), which percentage shares in the water balance were 2.3% and 0.17%, respectively. In turn, the lowest share (0.01%) was found for the water storage losses (ΔR_2). In the second analysed hydrological year of 2018, similarly as in 2017, a crucial share in increments was recorded for the watercourse inflow to the reservoir, which accounted to 49.7%. In turn, the percentage shares of the other water balance components determining the increments, such as precipitation falling on the reservoir surface, surface inflow from adjacent areas and the increment in water storage, were slight. In the case of water losses the greatest role in that year in the water balance was played by the outflow from the reservoir through the watercourse, accounting for 36.6%. A relatively high share was found for the subsurface outflow from the reservoir to adjacent areas (9%) and uncontrolled underground outflow (3.4%). To a lesser extent the losses were determined by evaporation from the reservoir (0.73%) and water storage losses (0.2%).

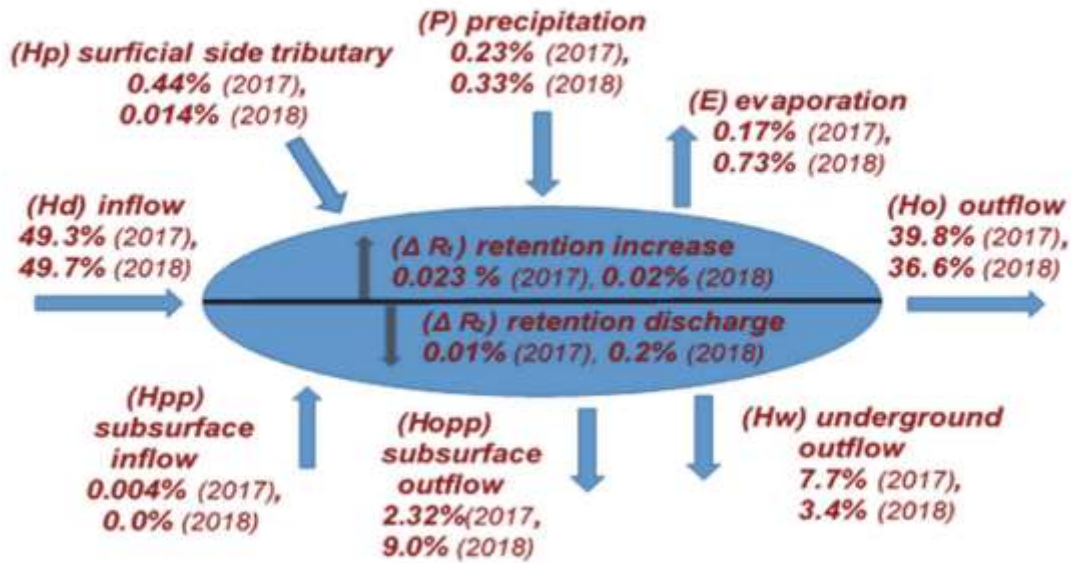


Fig. 8. Graphic representation of water balance components (%) for the Przebędowo reservoir in the hydrological years 2017 and 2018

Results recorded in the discussed years are consistent with e.g. those presented by Rzętała (2000), concerning water balance characteristics of the Dzierżno Duże reservoir, as that author stressed the greatest effect on the water balance exerted by inflow and surface outflow. In turn, precipitation in the case of increments and evaporation from the reservoir in the case of losses played a marginal role in the water balance. Analysis of the water balance components for the Przebędowo reservoir confirmed also the results of a study by Fac-Benedy (2013) concerning hydrological characteristics of Lake Drużno, in which the author stressed that the primary elements in the water balance of flow-through lakes are connected with inflow and surface outflow, since the vertical water exchange is less intensive than the horizontal exchange and it does not fundamentally alter the general balance structure. Similar conclusions were also drawn by Kropka and Jagliński (2015) when analysing the water balance for the underground catchment of the Kuźnica Warężyńska reservoir (Kotlina Dąbrowska). Those authors reported the greatest share in the water balance in the case of increments for surface inflow, while in the case of losses surface outflow from the reservoir was definitely dominant.

4. Conclusions

1. Obtained research results showed that in the hydrological year of 2017, which in terms of precipitation was very wet, mean water levels in the reservoir remained between normal and maximum pool levels. The highest mean water level in the winter half-year of that year was recorded in December (328 cm), while in the summer half-year it was in August (327 cm). In turn, for a greater part of the very dry hydrological year of 2018 mean water levels in the reservoir remained below the normal pool level. The lowest mean level was observed in that year in September (265 cm), which to a considerable extent was determined, among other things, by very high evaporation from the reservoir surface (228 mm), which was recorded in August.
2. The conducted analyses confirmed that apart from the weather conditions such as precipitation, air temperatures and evaporation from the reservoir a considerable role for the fluctuations in water levels in the reservoir was played by the anthropogenic factor. It was particularly related with the manner of reservoir operation frequently characteristic to dammed reservoirs and with the artificial control of water circulation.
3. The performed analysis of the water balance for the Przebędowo reservoir showed that in the winter half-years of the analysed hydrological years of 2017 and 2018 the dominant factor in the case of increments was connected with inflow to the reservoir in the Trojanka watercourse, amounting to 12.9 hm³ and 5.16 hm³, respectively. To a much lesser extent the increments of water in those half-years were determined by the inflow to the reservoir from adjacent areas and by precipitation. In the case of losses the greatest share in the water balance was observed in the discussed half-years for outflow from the reservoir through the watercourse, which amounted to 10.0 hm³ and 3.75 hm³. To a lesser extent losses were determined by the uncontrolled underground outflow and subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas. In turn, evaporation from the reservoir surface and water storage losses determined losses only slightly.
4. In the summer half-years the increments in the water balance to the greatest extent were determined by inflows to the reservoir through the watercourse, which amounted to 10.7 hm³ (2017) and 3.59 hm³ (2018), while in the case of losses it was outflows from the reservoir amounting to 9.06 hm³ and 2.7 hm³. In turn, a lesser role was played in the case of losses by outflow from the reservoir to adjacent areas, which in the discussed half-years was comparable and amounted to a mean 0.66 hm³.

5. Throughout the entire period of the analysed hydrological years of 2017 and 2018 the greatest share in the water balance for the Przebędowo reservoir was recorded for the components related with the horizontal water exchange. Inflows to the reservoir through the Trojanka watercourse and outflows constituted mean 49% and 38%, respectively. In the dry hydrological year of 2018 a significant share, in comparison to the other components, in the water balance was also found for the subsurface outflows from the reservoir to adjacent areas, accounting for 9%. In contrast, no major share in the water balance was found for the factors related with the vertical water exchange, characteristic of reservoirs having no outlets, such as precipitation and evaporation from the reservoir surface.

The publication was co-financed within the framework of Ministry of Science and Higher Education programme as „Regional Initiative Excellence” in years 2019-2022, Project No. 005/RID/2018/2019.

References

- Błażyca, D., Rzętała, M. (2013). *Uwarunkowania wahań stanów wody w zbiorniku Plawniowice [Fluctuations in water levels in the Plawniowice reservoir]*. Acta Geographica Silesiana, 14. Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytet Śląski, 27-34.
- Charakterystyka Regionu Wodnego Warty [Characteristics of the Warta Water Region]. 2007. Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu, Pion Zasobów Wodnych, 1-65.
- Choiński, A. (1995). *Zarys limnologii fizycznej Polski [An outline of physical limnology of Poland]*. Wyd. Nauk. UAM. Poznań, 298.
- Dąbska, A., Popielski, P. (2020). Makrodeformacje filtracyjne gruntów [Filtration macrodeformations of soils]. *Gospodarka wodna*, 2, 15-18.
- Fac-Beneda, J. (2013). *Charakterystyka hydrologiczna jeziora Druzno [Hydrological characteristics of Lake Druzno]*. Monografia Przyrodnicza. Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska w Olsztynie. 15-31.
- Górski, D., Banasik, K., Byczkowski, A., Gładecki, J., Hejduk, L. (2009). *Ekspertyza – bilans wodny Jeziora Czerniakowskiego w Warszawie [Expert opinion – water balance of Lake Czerniakowskie in Warszawa]*. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa, 55.
- Grajewski, S., Pacholczyk, K. 2011. *Charakterystyka warunków meteorologicznych Puszczy Zielonka w latach 1986-2010 [Characteristics of weather conditions in the Zielonka Forest in the years 1986-2010]*. Forestry Letters, Agricultural Letters, PTPN, Wydz. Nauk Rolniczych i Leśnych, Prace Kom. Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych, 102, 59-78.

- Gruszczyński, T., Leśniak, P., Michalak, J., Nowicki, Z. (2009). *Wyznaczanie zmian zasobów wód podziemnych w rejonach zbiorników małej retencji [Determination of changes in underground water resources in the vicinity of small retention reservoirs]*. Państwowy Instytut Geologiczny Warszawa, 109.
- Humnicki, W. (2010). *Zmiany warunków hydrogeologicznych wokół zbiorników zaporowych w Pieninach [Changes in hydrogeological conditions around dammed reservoirs in the Pieniny Mts.]* Pieniny – Zapora – Zmiany – Monografie Pienińskie 2: 83-95.
- Jaguś, A., Khak, V., Kozyrera, E., Rzętała, M., Rzętała, M., Szczypek, T. (2010). *Zmiany w środowisku wywołane spiętrzeniem wód rzeki Angary i jeziora Bajkał [Environmental changes caused by damming of the Angara River and Lake Bajkał]*. *Wszechświat*, 111(10-12), 265-271.
- Kędziora, A. (1995). *Podstawy Agrometeorologii [Introduction to agrometeorology]*. PWRiL Poznań, 264.
- Kondracki, J. (2000). *Geografia regionalna Polski [Regional geography of Poland]*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kropka, J., Jagliński, Ł. (2015). *Bilans wodny zlewni podziemnej zbiornika wodnego Kuźnica Warężyńska (Kotlina Dąbrowska) [Water balance of the underground catchment of the Kuźnica Warężyńska reservoir (Kotlina Dąbrowska)]*. *Przegląd Górniczy*, 12, 131-139.
- Lange, W. (1993). *Metody badań fizyczno-limnologicznych [Methodology of physico-limnological studies]*. Gdańsk, Uniwersytet Gdański, 175.
- Mioduszewski, W., Okruszko, T., (2016). *Naturalna mała retencja. Metoda łagodzenia skutków suszy, obniżenie ryzyka powodziowego i ochrona różnorodności biologicznej [Natural small retention. A method to alleviate the effects of drought, to reduce flood risk and to preserve biodiversity]*. Podstawy metodyczne. Globalne partnerstwo dla wody.
- Program ochrony środowiska dla województwa wielkopolskiego na lata 2016–2020 [Environmental protection program for the Wielkopolskie province for the years 2016-2020]. Poznań, 2016, 170.
- Radzka, E. (2014). *Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowowschodniej Polsce [Climatic water balance for the vegetation period (according to Iwanow) in central-eastern Poland]*. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 14(1), 67-76.
- Rösler, A., Bielawny, K., Chmal, M., Chmal, T., Staszewicz, S., Szymanowska, K. (2007). *Analiza zmian składowych bilansu wodnego jezior na przykładzie jeziora Ślawa [1976-2005], [Analysis of water balance components for lakes based on Lake Ślawa [1976-2005]*, Zadanie DS. H1 6b, 39.
- Rushton, K.R. (2003). *Groundwater Hydrology*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, 408.
- Rzętała, M. (2000). *Bilans wodny oraz dynamika zmian wybranych zanieczyszczeń zbiornika Dzierżno Duże w warunkach silnej antropopresji [Water balance and dynamics of changes in selected pollutants in the Dzierżno Duże reservoir at strong anthropopressure]*. Prace Naukowe UŚ w Katowicach, 1913. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice. 176.

- Rzętała, M. (2008). *Funkcjonowanie zbiorników wodnych oraz przebieg procesów limnicznych w warunkach zróżnicowanej antropopresji na przykładzie regionu górnośląskiego [Functioning of water reservoirs and the course of limnic processes at diverse anthropopressure conditions based on the Upper Silesia region]*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice, 172.
- Sojka, M., Korytowski, M., Jaskuła, J., Waligórski, B. (2017). Ocena podatności na degradację zbiornika retencyjnego Przebędowo [Assessment of susceptibility to degradation in the Przebędowo retention reservoir]. *Inżynieria Ekologiczna*, 5, 118-125.
- Szczykowska, J., Siemieniuk, A. (2011). Znaczenie zbiorników retencyjnych na terenach rolniczych oraz jakość ich wód. [Meaning retention reservoirs at agricultural land and their water quality]. *Inżynieria Ekologiczna*, 26, 103-111.
- Traczewska, T.M. (2012). *Problemy ekologiczne zbiorników retencyjnych w aspekcie ich wielofunkcyjności [Ecological problems of retention reservoirs in view of their multiple functions]*. Materiały na Sympozjum Europejskie pt.: „Współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej”, 1-8.
- Wereski, S., Pawelec, W., Sasim, M. (2017). Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, 10(186), Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, 34.
- Wibig, J. (2012). Warunki wilgotnościowe w Polsce w świetle wskaźnika standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego [Moisture conditions in Poland in view of the standardised climatic water balance index]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 12.2(38), 329-340.
- Wojtuszczyńska, K. (2007). Dynamika zmian stanu wód powierzchniowych i podziemnych w rejonie zbiorników wodnych Solina-Myczkowce [Dynamics of changes in the condition of surface and underground waters in the area of Solina-Myczkowce reservoirs]. *Gospodarka surowcami mineralnymi*, 23(3), 119-134.

Abstract

This study presents the results of investigations conducted in the hydrological years of 2017 and 2018 in the immediate catchment of the Przebędowo reservoir, located in the Wielkopolskie province 25 km north of Poznań in the Murowana Goślina commune. The immediate catchment of the reservoir is approx. 95 km² in area, while the direct recharge area of the lake (immediate catchment) covers 1.31 km². The areas adjacent to the reservoir are arable lands composed of fluvial Quaternary (Pleistocene) deposits, while the analysis of layers covered by piezometers showed a predominance of medium sands deposited to a depth of approx. 3 m. The analysed reservoir was constructed in the valley of the Trojanki river (from 6+915 km to 8+371 km of its course) by the Wielkopolska Land Reclamation and Hydraulic Structure Authority in Poznań and it was commissioned in November 2014. The embankment dam of the reservoir is class IV, it is 334 m in length and 3.30 m in height. The reservoir of 1450 m in length and maximum width of 120 m, at the normal pool elevation of 72.50 m a.s.l. has a mean depth of 0.94 m and the pool area of 12.03 ha. The shoreline length of the reservoir is 2980 m, shoreline density is 248 m·ha⁻¹ and the elongation index is 12. In turn, the flood control capacity derived from the difference between normal and maximum pool level is around 67 000 m³.

The conducted analyses confirmed that apart from the weather conditions such as precipitation, air temperatures and evaporation from the reservoir a considerable role for the fluctuations in water levels in the reservoir was played by the anthropogenic factor. It was particularly related with the manner of reservoir operation frequently characteristic to dammed reservoirs and with the artificial control of water circulation.

Analysis of the water balance for the Przebędowo reservoir showed that in the winter half-years of the analysed hydrological years of 2017 and 2018 the dominant factor in the case of increments was connected with inflow to the reservoir in the Trojanka watercourse, amounting to 12.9 hm³ and 5.16 hm³, respectively. To a much lesser extent the increments of water in those half-years were determined by the inflow to the reservoir from adjacent areas and by precipitation. In the case of losses the greatest share in the water balance was observed in the discussed half-years for outflow from the reservoir through the watercourse, which amounted to 10.0 hm³ and 3.75 hm³. To a lesser extent losses were determined by the uncontrolled underground outflow and subsurface inflow to the reservoir from adjacent areas. In turn, evaporation from the reservoir surface and water storage losses determined losses only slightly. Whereas in the summer half-years the increments in the water balance to the greatest extent were determined by inflows to the reservoir through the watercourse, which amounted to 10.7 hm³ (2017) and 3.59 hm³ (2018), while in the case of losses it was outflows from the reservoir amounting to 9.06 hm³ and 2.7 hm³. In turn, a lesser role was played in the case of losses by outflow from the reservoir to adjacent areas, which in the discussed half-years was comparable and amounted to a mean 0.66 hm³.

Throughout the entire period of the analysed hydrological years of 2017 and 2018 the greatest share in the water balance for the Przebędowo reservoir was recorded for the components related with the horizontal water exchange. Inflows to the reservoir through the Trojanka watercourse and outflows constituted mean 49% and 38%, respectively. In the dry hydrological year of 2018 a significant share, in comparison to the other components, in the water balance was also found for the subsurface outflows from the reservoir to adjacent areas, accounting for 9%. In contrast, no major share in the water balance was found for the factors related with the vertical water exchange, characteristic of reservoirs having no outlets, such as precipitation and evaporation from the reservoir surface.

Keywords:

small-scale water retention, dammed reservoirs, water balances

**Bilans wodny zbiornika zaporowego
na przykładzie obiektu Przebędowo****Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w latach hydrologicznych 2017 i 2018 w zlewni bezpośredniej zbiornika Przebędowo, zlokalizowanego w województwie wielkopolskim, 25 km na północ od Poznania w gminie Murowana Goślina. Powierzchnia zlewni całkowitej zbiornika wynosi około 95 km², natomiast obszar bezpośredniej alimentacji jeziora (zlewnia bezpośrednia) zajmuje powierzchnię 1,31 km².

Tereny przyległe do zbiornika to grunty orne zbudowane z osadów czwartorzędowych (plejstocen) fluwialnych, a analiza warstw objętych piezometrami wykazała przewagę piasków średnich zalegających do głębokości około 3 m. Analizowany zbiornik został wykonany w dolinie rzeki Trojanki (od km 6+915 do km 8+371 jej biegu), przez Wielkopolski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Poznaniu i został oddany do eksploatacji w listopadzie 2014 roku. Ziemna zaporę czołową na zbiorniku jest klasy IV, jej długość wynosi 334 m, przy wysokości 3,30 m. Zbiornik o długości 1450 m i szerokości maksymalnej 120 m, przy normalnym poziomie piętrzenia (NPP) wynoszącym 72,50 m n.p.m. ma średnią głębokość 0,94 m i powierzchnię zalewu 12,03 ha. Długość linii brzegowej omawianego zbiornika wynosi 2980 m, jej rozwinięcie kształtuje się na poziomie $248 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ a wskaźnik wydłużenia wynosi 12. Natomiast rezerwa powodziowa stanowi różnicę pomiędzy NPP, a Max. PP osiąga wartość na poziomie około 67000 m^3 .

Przeprowadzone badania potwierdziły, że poza czynnikami meteorologicznymi takimi jak opady atmosferyczne, temperatury powietrza oraz parowanie z powierzchni zbiornika duży wpływ na kształtowanie się stanów wody w zbiorniku miał również czynnik antropogeniczny. W szczególności związany z, często charakterystycznym dla zbiorników zaporowych, sposobem eksploatacji zbiornika i sztucznym sterowaniem obiegiem wody.

Analiza bilansu wodnego zbiornika Przebędowo wykazała, że w półroczach zimowych analizowanych lat hydrologicznych 2017 i 2018 czynnikami wiodącymi po stronie przychodów były dopływy do zbiornika ciekami Trojanka wynoszące odpowiednio $12,9 \text{ hm}^3$ i $5,16 \text{ hm}^3$. W znacznie mniejszym stopniu o przychodach wody w tych półroczach decydowały dopływy do zbiornika z terenów przyległych oraz opad atmosferyczny. Po stronie rozchodów największy udział w równaniu bilansowym miał, w omawianych półroczach odpływ ze zbiornika ciekami, który wyniósł $10,0 \text{ hm}^3$ i $3,75 \text{ hm}^3$. W mniejszym stopniu o rozchodach decydował niekontrolowany odpływ wgłębny oraz dopływ podpowierzchniowy do zbiornika z terenów przyległych. Parowanie z powierzchni zbiornika oraz ubytki retencji decydowały o rozchodach w sposób nieznaczny. Natomiast w półroczach letnich o przychodach w równaniu bilansowym w największym stopniu również decydowały dopływy do zbiornika ciekami, które wyniosły $10,7 \text{ hm}^3$ (2017) oraz $3,59 \text{ hm}^3$ (2018), a postronnie ubytków odpływy ze zbiornika kształtujące się na poziomie odpowiednio $9,06 \text{ hm}^3$ oraz $2,7 \text{ hm}^3$. Natomiast w mniejszym stopniu o rozchodach decydował odpływ ze zbiornika do przyległych terenów, który w omawianych półroczach był zbliżony i kształtował się na średnim poziomie $0,66 \text{ hm}^3$.

W skali całych analizowanych lat hydrologicznych największy udział w bilansie wodnym zbiornika Przebędowo miały składowe związane z poziomą wymianą wody. Dopływy do zbiornika ciekami Trojanka oraz odpływy stanowiły średnio około 49% i 38%. W suchym pod względem opadów roku hydrologicznym 2018 istotny, w porównaniu do pozostałych składowych, udział w bilansie miał również odpływ podpowierzchniowy ze zbiornika do przyległych terenów stanowiąc 9%. Natomiast nie stwierdzono w bilansie wodnym znacznego udziału czynników związanych z wymianą pionową wody, charakterystycznego dla zbiorników bezodpływowych, takich jak opady atmosferyczne oraz parowanie z powierzchni zbiornika.

Słowa kluczowe:

mała retencja, zbiorniki zaporowe, bilans wodny

8.3. Publikacja #3

The Influence of the Przebędowo Reservoir on the Water Quality of the Trojanka River in the First Years of its Functioning. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 23, s.:151-167



Rocznik Ochrona Środowiska

Volume 23	Year 2021	ISSN 1506-218X	pp. 151-167
https://doi.org/10.54740/ros.2021.010			open access
Received: 12 January 2021		Accepted: 30 April 2021	Published: 06 December 2021

The Influence of the Przebędowo Reservoir on the Water Quality of the Trojanka River in the First Years of its Functioning

*Błażej Waligórski**

*State Water Holding Polish Waters
Regional Water Management Board in Poznań, Poland*

Ewelina Janicka

*Department of Land Reclamation, Environmental Management
and Spatial Management, Poznań University of Life Sciences, Poland
<https://orcid.org/0000-0001-9616-6184>*

**corresponding author's e-mail: blazej.waligorski@wody.gov.pl*

Abstract: Agriculture, mainly biogenic compounds (nitrogen and phosphorus) and plant protection products are one of the sources of environmental pollution. The sources of pollution are both farm buildings and intensively used agricultural land. Therefore, a crucial element of the environment contributing to the improvement of surface water quality are the aforementioned shallow reservoirs covered by vegetation that act as biofilters or reservoirs such as dammed reservoirs. The analysed reservoir is located in the Greater Poland Province, about 25 km to the north from Poznań, in Murowana Goślina commune. The research on the analysed reservoir was conducted during the growing seasons, from 2016 to 2018, at three measurement and control points: at the Przebędowo reservoir inflow, at the Przebędowo reservoir and at the Przebędowo reservoir outflow. They included determining 4 groups of physico-chemical indicators supporting biological elements, including indicators characterising aerobic conditions, salinity, acidification (pH) and indicators characterising biogenic conditions. Based on the conducted research, a great influence of the reservoir was proven, especially in the context of the concentration of dissolved oxygen at the outflow, where, concerning this indicator, the reservoir was classified as water quality class I. The presented research results also confirmed that in the context of the complexity of hydrological and physico-chemical processes taking place in dammed reservoirs, it is necessary to continuously control them both in terms of water quantity and quality.

Keywords: small-scale water retention, dammed reservoirs, water quality

1. Introduction

Changes in the quality of surface water of a catchment are particularly visible in small water reservoirs. The factors that influence the size of the biogenic compounds and their migration in surface water are the development of the catchment, the size and depression of the land, the type and degree of vegetation cover, population density, sanitation infrastructure, level and method of fertilisation, livestock density and others (Giercuskiewicz-Bajtlik 1990, Ilnicki 2002). Concerning the functions of reservoirs, there are also two vital aspects, from which conflicting purposes of its use emerges. On the one hand, reservoirs are an important element of industrial infrastructure and indispensable source of water for cities and settlements but, on the other hand, because of their impact on the environment, they are also a vital element of the ecosystem (Wicher 2004). However, reservoirs which have a dam (dammed reservoirs), apart from their basic functions, also improve the purity of surface water. After damming, sedimentation and retention of up to 90% of mineral and organic particles that are in the water flowing into a reservoir occurs. Nonetheless, one cannot unequivocally determine whether reservoirs improve or deteriorate the water quality as these issues are very complex (Wiatkowski et al. 2010).

Agriculture, mainly biogenic compounds (nitrogen and phosphorus) and plant protection products are one of the sources of environmental pollution. The sources of pollution are both farm buildings and intensively used agricultural land (Saunders et al. 2001, Elser et al. 2007, Chislock et al. 2013). Chemical compounds from applied mineral fertilisers and plant protection products, leaking septic tanks and sewage systems are washed away by rain and directed to surface waters. Reduction of the amount of these pollutions can be achieved by suitable management of agriculture, building a treatment plant. However, even with such management, some of the compounds that get into the soil during fertilisation will always be washed away by precipitation water and will enter surface waters. Therefore, a crucial element of the environment contributing to the improvement of surface water quality are the aforementioned shallow reservoirs covered by vegetation that act as biofilters or reservoirs such as dammed reservoirs. According to Galicka et al. (2007) dammed reservoirs can periodically retain up to 90% of the total amount of matter flowing into them. Wiatkowski (2008, 2010) states that after flowing of the water of the Prosna river through the Psurów reservoir, one could spot a significant reduction of phosphates (by 21%), nitrates (V) (by 26%), nitrates (III) (by 9%) and ammonia (by 5%).

The influence of a dammed reservoir on water quality in the rivers located below it depends on the amount of stored water and the flow as well as on the time of water retention and the location of the reservoir (on the water-course or as a side-reservoir). Reservoirs with a long time of retention of water are "trap" for the river nutrient material such as phosphorus and nitrogen and limit

the amount of mineral suspensions. Depending on the depth and location of discharge, reservoirs can lower the water temperature in summer (deep reservoirs with a long time of water retention, in which stratification occurs and water discharge is below the thermocline) or raise it (shallow reservoirs with a long time of water retention). Water leaving deep reservoirs with a discharge below the thermocline on a short section below the dam has a low oxygen concentration. Some dammed reservoirs retain the water of poor quality (with a high content of phosphorus and nitrogen compounds) and introduce biological contaminants, namely large amount of phytoplankton into the river below, causing the algal bloom. The phenomenon caused by the algal bloom of water occurs in small and medium rivers with shallow reservoirs with a long time of retention.

Storage reservoirs in Poland are located mainly in catchments that are characterised by agricultural use, mostly in the lower or middle course of the river. Certainly, this is related to the problems with their functioning and exploitation. Such reservoirs are exposed to excessive accumulation of biogenic compounds, mainly organic and inorganic nitrogen and phosphorus compounds (as it was mentioned earlier). The result is the deterioration of the quality of the stored water and eutrophication (Przybyła et al. 2014).

The aim of this study was to assess the impact of Przebędowo reservoir on the water quality of the Trojanka river in the first years of its functioning.

2. Materials and methods

The analysed reservoir is located in the Greater Poland Province, about 25 km to the north from Poznań, in Murowana Goślina commune (Fig. 1). According to natural regions of Poland based on physical geography (Kondracki 2000), the area of research, characterised by the early post-glacial landscape, is located in the Greater Poland Lakeland (Polish: Pojezierze Wielkopolskie) in the area of the Poznań Warta Gorge (Polish: Poznański Przełom Warty) (315.52). The discussed catchment area of about 100² is covered mainly by forests, and to a lesser extent, arable lands in the area adjacent to the reservoir. The structure of land use according to Corine Land Cover 2018.

The Przebędowo reservoir was constructed in the valley of the Trojanka river at km 6+915-8+371 of its course, by the Provincial Management of Drainage, Irrigation and Infrastructure in Poznań and commissioned in November 2014. The reservoir is 1450 meters long and 120 meters wide. The front dam is class IV and is 334 meters long. It should be noted that the Trojanka river acts as a local wildlife corridor for a river system. The river is vital for the connection of the area of Puszcza Zielonka Landscape Park (established in 1994) Special Area of Conservation Natura 2000 "Uroczyska Puszczy Zielonki" and the Warta river to which it flows. Due to this fact, the reservoirs maintain connec-

tions between area of the Trojanka river above the damming and the Warta river valley. The main task of the reservoir is to store water for agricultural purposes, as well as to improve ambient and water conditions on adjacent agricultural land and to protect the area below the dam and area adjacent to the reservoirs from flooding and fire. 13 meters wide ecological buffer zone (biogeochemical barrier) was established around the reservoir and it serves as a transition zone between the reservoirs and the agricultural land in order to limit the flow of biogenic compounds (nitrogen, phosphorus) and plant protection products from the adjacent areas.

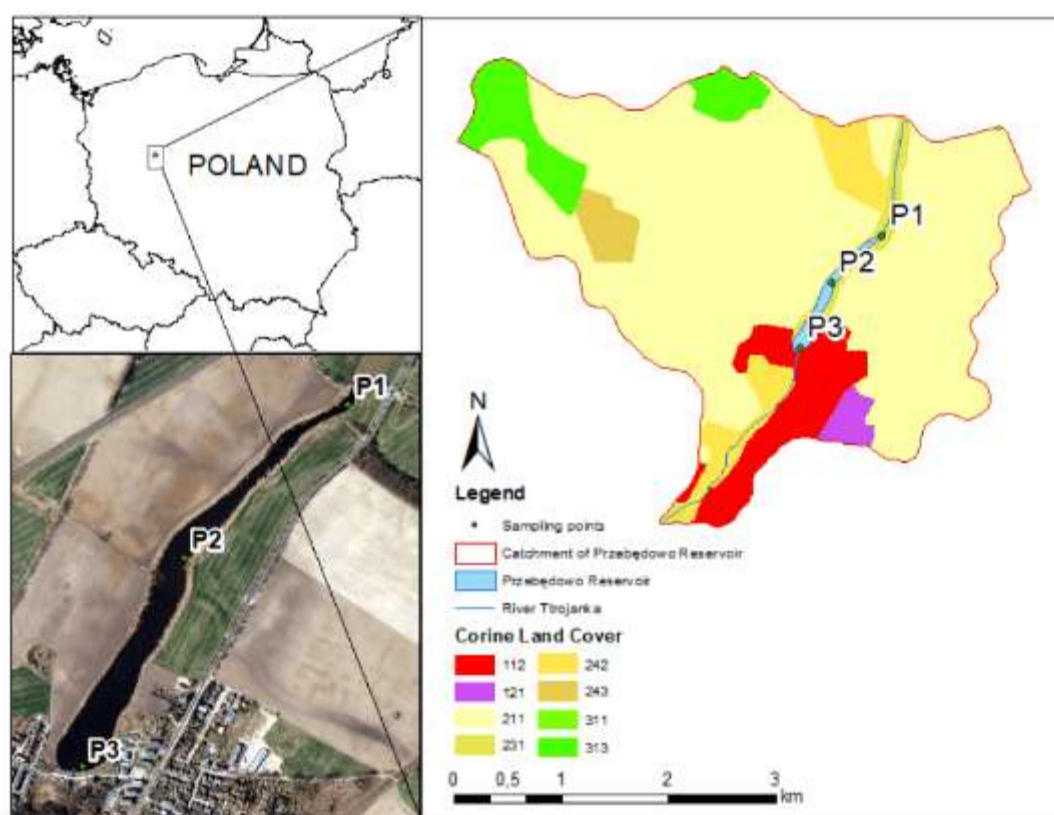


Fig. 1. Location of the Przebędowo Reservoir with water sampling points (P1 – inflow, P2 – reservoir, P3 – outflow) and use of the catchment area

The research on the analysed reservoir was conducted during the growing seasons, from 2016 to 2018, at three measurement and control points: at the Przebędowo reservoir inflow (Trojanka river), at the Przebędowo reservoir and at the Przebędowo reservoir outflow (Trojanka river). The tests of water samples were collected once a month and carried out in the laboratory of the Institute of Land Improvement, Environmental Development and Geodesy of the Poznań University of Life Sciences. They included determining 4 groups of physico-chemical indicators supporting biological elements, including indica-

tors characterising aerobic conditions (dissolved oxygen content and biochemical oxygen demand S_5), salinity indicators (calcium, magnesium, sulfates and electrolytic conductivity), acidification (pH) and indicators characterising biogenic conditions (ammoniacal nitrogen, nitrate nitrogen (V) nitrate nitrogen (III) and phosphate (V)) in accordance with applicable standards.



Fig. 2. 13 meters wide ecological buffer zone (biogeochemical barrier)

Statistical inference about the significance of the differences in the values of indicators between the measurement and control points was carried out with the non-parametric Mann-Whitney U test at the significance level $\alpha = 0.05$. This test was chosen due to the lack of normal distribution of most of the analyzed indicators.

The analysis of the ecological status of Trojanka river was carried out in accordance with the Regulation of the Ministry of Marine Economy and Inland Navigation of 11 October 2019 (hereinafter referred to as "the Regulation") on the classification of the ecological status, ecological potential and chemical status, method of classifying the status of a body of surface water, as well as environmental quality standards for priority substances. The ecological status was determined by characterising surface water quality for the abiotic 17 type (lowland sandy river) of a body of surface water, which is the Trojanka river, taking into account the physicochemical elements included in the Regulation.

3. Results and discussion

Analysing the indicators characterising the aerobic conditions, namely the concentration of dissolved oxygen, one can conclude that the average values of this indicator in the discussed vegetation periods of the analysed extent of time, at the inflow of the Przebędowo reservoir and in the reservoir itself were 6.37 and 6.64 $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ respectively, and are lower than the requirements of the Regulation for water quality class II, for which the limit value is set at 6.80 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. However, at the outflow of the reservoir, the average content of oxygen dissolved in water was 7.57 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ and exceeded the limit for class II. The water flowing out from the reservoirs can be classified as water quality class I regarding dissolved oxygen concentration (Fig. 3). Nonetheless, the extreme values of the discussed indicator were: min. – 4.0 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, and max – 12.8 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ respectively. The analysis of the water in the reservoir shows their good oxygenation. Slightly different results were obtained by Bogdał et al. (2015) at the Goczałkowice reservoir, where the average values of dissolved oxygen concentration at the outflow were lower than at the inflow (inflow – 9.51 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; outflow – 8.46 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). According to these authors, such results were due to the blooming of cyanobacteria.

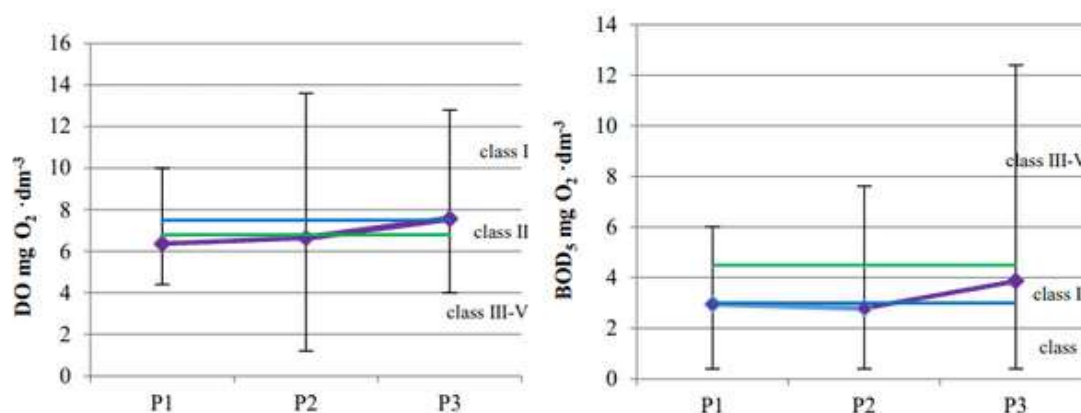


Fig. 3. The content of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand $_5$ in the Trojanka river and the Przebędowo reservoir on the three measurement points, during the growing seasons 2016-2018 (average values of indicators)

The analysis of the second indicator characterising aerobic conditions, which is BOD_5 , allowed to determine that in the discussed period its values at the inflow ranged from 0.4 to 6.01 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, and the average was 2.96 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, which classifies it as the water quality class I. 2). The quality of waters below the reservoir deteriorated, the value of BOD_5 ranged from 0.4 to 12.4 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, and the average was 3.86 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, which, concerning the analysed growing seasons, would classify it as the water quality class II. Similar values were ob-

tained by J. Kanclerz et al. (2014) on the Stare Miasto reservoir. There, the waters on the inflow were also classified according to BOD₅, as water quality class I, while after flowing through the reservoir, the water quality deteriorated and was also classified as water quality class II.

In general, one can state that the load of organic matter in the Trojanka river and the analysed reservoir that influence oxygen consumption in the self-purification process was irregular.

The results of research conducted in the laboratory and its analysis proved that waters at all three measure points (P1, P2, P3) had a slightly alkaline pH, with the average of P1 = 8.48; P2 = 8.59; P3 = 8.52 respectively, which classified those as water quality class III-V (Fig. 4). The results obtained were consistent with the results of Kanclerz et al. (2014) on Stare Miasto reservoir, where the authors also found a slightly alkaline pH of the waters of the Powa river (the average pH was 8.3), however, according to then binding Regulation of 2011, the waters of the Powa river were classified as water quality class I – of very good quality. Currently, for water quality class I and II, the pH values should be between 7.0 and 7.9.

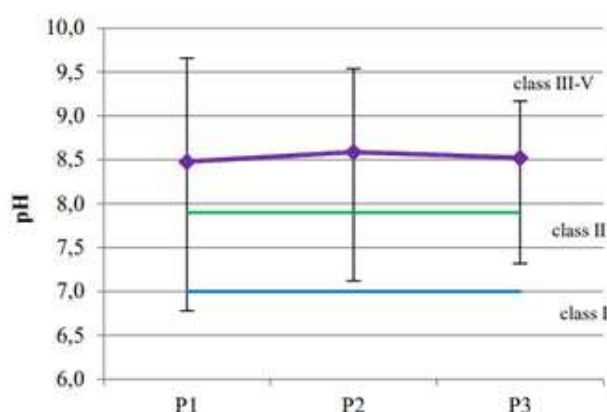


Fig. 4. The pH in the waters of Trojanka river and the Przebędowo reservoir at three measurement points, during the growing seasons 2016-2018 (average values of indicators)

The analysis of indicators characterising salinity of water in the aforementioned measurement points showed that the average values of calcium in the water during the growing seasons in years 2016-2018 were very similar to each other: inflow – 111.33 mg·dm⁻³; reservoir – 108.0 mg·dm⁻³ and outflow – 110.11 mg·dm⁻³ (Fig. 5) and, according to the Regulation, exceeded values necessary for classification as water quality class II.

Also, no major differences were found in the values of chlorides between the measuring points analysed. The average value of these elements in the

analysed years was: at the inflow $34.72 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; in the reservoir $35.14 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ and at the outflow $39.86 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Fig. 5) and according to the Regulation, exceeded the value necessary for classification as water quality class II which is $33.7 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Based on the obtained results, the quality of water was classified as class III-V.

In the research conducted by Przybyła et al. (2014) on the Jutrosin reservoir, the authors obtained slightly better results in relation to the aforementioned indications, as the concentration of chlorides allowed to classify the quality of water as class I and the concentration of calcium allowed to classify the quality of water as class II.

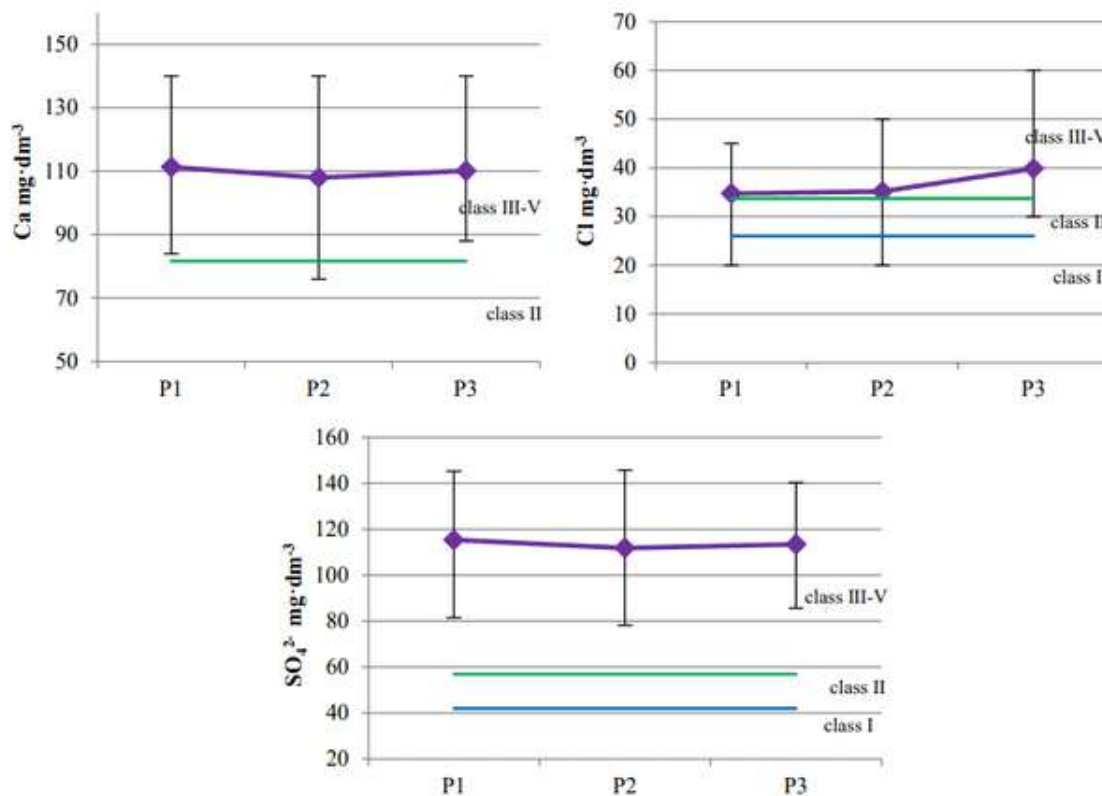


Fig. 5. The content of calcium, chlorides and sulphates (VI) in the waters of Trojanka river and the Przebędowo reservoir at three measurement points, during the growing seasons 2016-2018 (average values of indicators)

The analysis of another indicator characterising salinity of water, i.e. sulphates (VI) proved that, in the discussed period, the lowest values of $78.19 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ were recorded in the reservoir, while at the inflow and the outflow from the reservoir values were $81.48 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ and $85.59 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ respectively (Table 1). The obtained results allowed to classify those waters, in respect of the content of sulphates, as water quality class III-V. The average values of this indicator

were: P1 – 115.4 mg·dm⁻³; P2 – 111.85 mg·dm⁻³; P3 – 113.39 mg·dm⁻³. According to the Regulation, the limit value for classification as water quality class III-V is 57 mg·dm⁻³ (Fig. 5).

Table 1. Minimum, maximum, average and median of the physico-chemical indicators in the measurement points in the Trojanka river during the growing seasons 2016-2018

Indicator	Control and measurement points		
	Inflow (P1)	Reservoir (P2)	Outflow (P3)
/1/	/2/	/3/	/4/
Dissolved oxygen DO (mg O ₂ · dm ⁻³)	4.4-10 6.37 (6.10)	1.2-13.6 6.64 (6.32)	4.0-12.8 7.57 (6.81)
Biochemical oxygen demand, BOD ₅ (mg O ₂ · dm ⁻³)	0.4-6.01 2.96 (2.65)	0.4-7.62 2.79 (2.28)	0.4-12.4 3.86 (3.11)
Acidification (pH)	6.78-9.66 8.48 (8.75)	7.12-9.54 8.59 (8.75)	7.32-9.17 8.52 (8.68)
Calcium Ca (mg · dm ⁻³)	84.0-140.0 111.33 (116.0)	76.0-140.0 108.0 (108.0)	88.0-140.0 110.11 (110.0)
Magnesium Mg (mg · dm ⁻³)	4.86-21.89 13.78 (14.59)	7.30-19.46 13.24 (12.16)	9.73-24.32 14.59 (13.38)
Chlorides Cl (mg · dm ⁻³)	20.0-45.0 34.72 (35.0)	20.0-50.0 35.14 (35.0)	30.0-60.0 39.86 (40.0)
Nitrate nitrogen (V) N-NO ₃ (mg · dm ⁻³)	0.02-7.6 1.49 (1.05)	0.02-4.1 1.06 (0.9)	0.02-3.4 1.01 (0.85)
Nitrate nitrogen (III) N-NO ₂ (mg · dm ⁻³)	0.005-0.09 0.05 (0.05)	0.005-0.15 0.03 (0.025)	0.01-0.09 0.04 (0.02)
Ammoniacal nitrogen N-NH ₄ (mg · dm ⁻³)	0.01-0.15 0.04 (0.04)	0.01-0.12 0.03 (0.01)	0.01-0.14 0.04 (0.01)
Sulphates (VI) SO ₄ ²⁻ (mg · dm ⁻³)	81.48-145.26 115.4 (123.45)	78.19-145.67 111.85 (114.5)	85.59-140.32 113.39 (118.51)
Phosphate (V) P-PO ₄ (mg · dm ⁻³)	0.01-0.25 0.08 (0.05)	0.01-0.34 0.08 (0.02)	0.01-0.38 0.10 (0.07)
Electrolytic conductivity EC (μS · cm ⁻¹)	402.0-714.0 565.22 (555.0)	426.0-674.0 519.22 (514.0)	447.0-725.0 556.94 (548.5)

In the research of Bogdała et al. (2015) on the Goczałkowice reservoir, the authors obtained results allowing them to classify the water, in respect to the average or even maximum values of content sulphates as water quality class I. It may have resulted from the fact that, unlike Przebędowo reservoir, in the catchment of Goczałkowice reservoir, there are no arable lands as well as the parts of the area surrounding it is the protected area of Natura 2000.

The analyses carried out on another crucial indicator of salinity of water, which is the content of magnesium, showed that at each measurement point both minimum and average values of magnesium were at a low level during the test period which allows to classify the water quality as class I. However, by analysing the results, one might conclude that the values of magnesium increased with the flow of water between the points. The lowest value above the reservoir was $4.86 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, and in the reservoir itself $7.30 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. At the outflow, the lowest value was $9.73 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. The maximum values were as follows: inflow $21.89 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, reservoir $19.46 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, outflow $24.32 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Table 1). The average values were: inflow $13.78 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, reservoir $13.24 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, outflow $14.59 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Fig. 6). It should be noted that, according to the Regulation, the limit value for classifying as water quality class I is $18.4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

The last analysed indicator that measures salinity was the electrolytic conductivity. During the research, it ranged from 402 to $714 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for the waters at the inflow of the Przebędowo reservoir and from 426 to $674 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for the waters stored in the reservoir and from 447 to $725 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for the waters at the outflow of the reservoir (Table 1). It was found that the average values of electrolytic conductivity at the analysed measurement points allow to classify the waters at the inflow as water quality class II, the waters in the reservoir as class I and the waters at the outflow as class II (Fig. 5).

Such a tendency of fluctuation of average values of electrolytic conductivity, and consequently, convergent results, were also obtained by Kozłowski et al. (2017), at the Cedzyna reservoir on the Lubrzanka river. On the mentioned reservoir, the average values were: inflow – $272 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; reservoir – $222.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; outflow – $229.4 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

The last group of analysed physico-chemical indicators is that characterising biogenic conditions.

The first analysed indicator in this group of compounds were phosphates. According to Pawełek et al. (2005), the presence of these compounds in the surface water is due to the soil erosion, sewage inflow, dissolution of all kinds of minerals as well as precipitation.

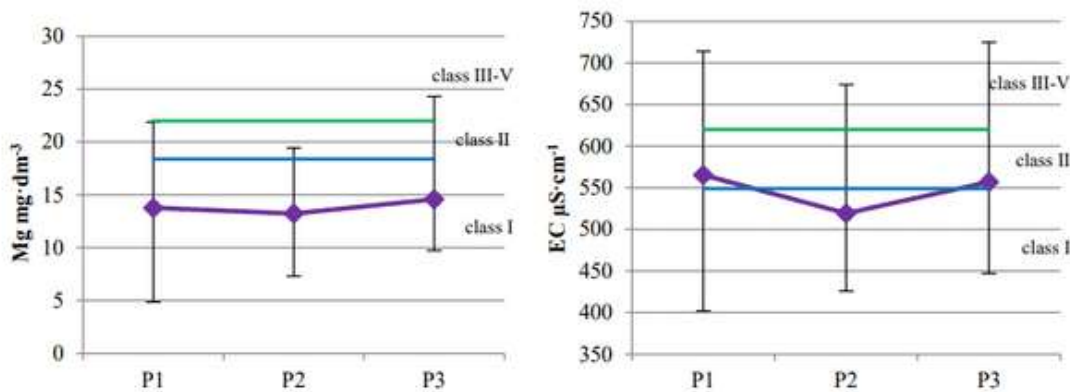


Fig. 6. The content of magnesium and specific electrolytic conductivity in the waters of the Trojanka river and the Przebędowo reservoir at three measurement points, during the growing seasons 2016-2018 (average values of indicators)

Average phosphate values at the inflow of the Przebędowo reservoir and in the reservoir itself were $0.08 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, while at the outflow $0.10 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Fig. 7). Average phosphate values for the water samples tested during the research period are within the limit value defined by the Regulation for water quality class II, i.e. between $0.065 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, and $0.101 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. The highest (maximum) values for the individual measurement points were: at the inflow $0.25 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, in the reservoir – $0.34 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ at the outflow $0.38 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Slightly higher values of phosphate were obtained by Pawełek et al. (2008) at the inflow of the Dobczycki reservoir. In their research, the authors analysed the concentration of biogenic compounds in the water of the streams flowing into the reservoir. Average phosphate values for the Dębnik and Wolnica tributaries were $0.136 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ and $0.142 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Another analysed indicator characterising biogenic conditions was nitrate nitrogen (V). It is a form of nitrogen that is not bound by sorbent soil and therefore is easily washed out. During the research, the average values of the analysed indicator above, below and in the reservoir itself were: P1 – $1.49 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; P2 – $1.06 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; P3 – $1.01 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, which allowed to classify this water, regarding this parameter, as class I (Fig. 7). According to the regulation, the limit value for water quality class I for nitrate nitrogen (V) is $2.2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

The results obtained regarding nitrate nitrogen (V) were largely comparable to the results of Kanclerz et al. (2010) obtained from the Stare Miasto reservoir, where the average values of the discussed indicator were also within the limit value of water quality class I.

Indicators characterising ammoniacal nitrogen constitute an important element of assessing the quality of water in reservoirs which catchments are used for agricultural purposes. According to the Regulation, the limit value for the water quality class I for the aforementioned indicator is $0.25 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. In the

analysed period, on the reservoir in question, the maximum values did not exceed this limit and were: at the inflow – $0.15 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, in the reservoir – $0.12 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, at the outflow – $0.14 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Table 1). Average values of ammoniacal nitrogen: P1 – $0.04 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; P2 – $0.03 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; P3 – $0.04 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Fig. 7).

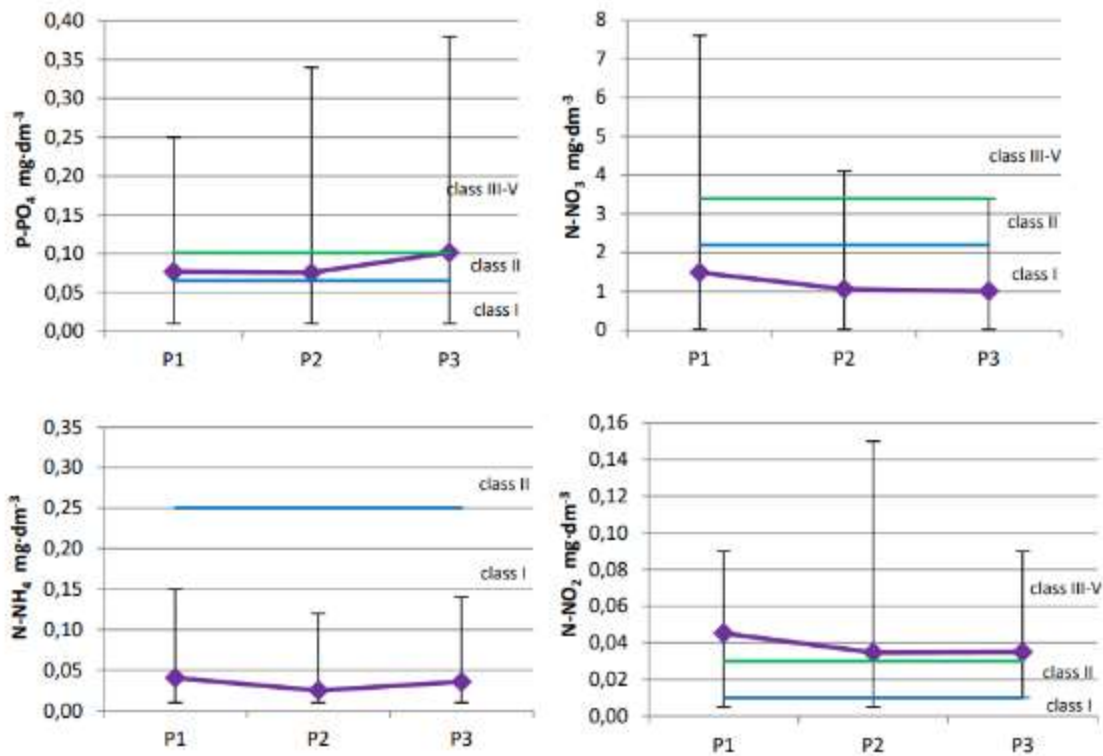


Fig. 7. The content of phosphate (V), nitrate nitrogen (V), ammoniacal nitrogen and nitrate nitrogen (III) in the waters of the Trojanka river and the Przebędowo reservoir at three measurement points, during the growing seasons 2016-2018 (average values of indicators)

Similar results were obtained by Szczykowska (2013), during the analysis of the water quality of the Koryncin reservoir. Ammoniacal nitrogen concentration was relatively low and allowed to classify this as water quality class I. However, the author emphasized that during the winter period, the values of this indicator might be increased, which is largely due to the intake of water from under the ice layer, when processes of ammonification of organic matter of sediments take place. Nonetheless, the observed increase in the value of ammoniacal nitrogen in the spring period might be related to the slopewash in the indirect and direct area of the catchment of the reservoir.

The last analysed indicator was nitrate nitrogen (III). The results obtained in the research period showed that the values of the indicator ranged from 0.005 to 0.9 mg·dm⁻³ concerning the waters at the inflow of the Przebędowo reservoir, from 0.005 to 0.15 mg·dm⁻³ concerning the waters stored in the reservoir and from 0.01 to 0.09 mg·dm⁻³ concerning the waters at the outflow of the reservoir (Table 1). The average values for individual measurement points were: P1 – 0.05 mg·dm⁻³; P2 – 0.03 mg·dm⁻³; P3 – 0.04 mg·dm⁻³. According to the Regulation, the obtained results of the average concentration of the analysed indicator allow to classify these waters as water quality class III-V.

Analysing the average values of nitrate nitrogen (III) it was found that the value of the indicator in the reservoir itself is lower than in the waters at the inflow and the outflow. These results are consistent with the ones of Wiatkowski (2008) obtained on the Młyny reservoir on the Julianpolka river in which the author determined that the average values of this indicator were lower in the reservoir itself than in the waters at the inflow and the outflow.

Statistical analysis performed with the Mann-Whitney U test showed that the values of the two examined indicators differed significantly between the measurement and control points (Table 2). Statistically higher values of dissolved oxygen in water and chlorides were found in point 1 (inflow) compared to point 3 (outflow).

Table 2. Importance of the water indicators' values between the measuring-control points P1 and P3 of the Przebędowo Reservoir – Mann-Whitney's nonparametric test*

Index	Unit	Median of sample points		Test probability, <i>p</i>
		Inflow (P1)	Outflow (P3)	
Dissolved oxygen DO	(mg O ₂ · dm ⁻³)	6.10	6.81	0.037
Biochemical oxygen demand BOD ₅	(mg O ₂ · dm ⁻³)	2.65	3.11	0.734
Acidification	pH	8.75	8.68	0.518
Calcium Ca	(mg · dm ⁻³)	116.00	110.00	0.786
Magnesium Mg	(mg · dm ⁻³)	14.59	13.38	0.738
Chlorides Cl	(mg · dm ⁻³)	35.00	40.00	0.020

Table 2. cont.

Index	Unit	Median of sample points		Test probability, <i>p</i>
		Inflow (P1)	Outflow (P3)	
Nitrate nitrogen (V) N-NO ₃	(mg · dm ⁻³)	1.05	0.85	0.459
Nitrate nitrogen (III) N-NO ₂	(mg · dm ⁻³)	0.05	0.02	0.387
Ammoniacal nitrogen N-NH ₄	(mg · dm ⁻³)	0.04	0.01	0.462
Sulphates (VI) SO ₄ ²⁻	(mg · dm ⁻³)	123.45	118.51	0.707
Phosphate (V) P-PO ₄	(mg · dm ⁻³)	0.05	0.07	0.653
Electrolytic conductivity EC	(μS · cm ⁻¹)	555.00	548.50	0.460

*Statistical values in red mean statistically significant differences at $p < 0.05$

4. Conclusions

1. The research has shown that the parameters characterising aerobic conditions and biogenic conditions with the exception of nitrate nitrogen (III) meet the requirements necessary to classify this reservoir as water quality class II. However, other elements, indicators of salinity and acidification do not meet the requirements necessary to classify this reservoir as water quality class II. Based on the analysis of average values of physico-chemical parameters, the ecological status of the Trojanka river at the inflow and the outflow of the reservoir does not meet the requirements necessary to classify it as water quality class II. Therefore, the ecological status of the waters of the Trojanka river was classified as below good.
2. Out of 12 tested physicochemical indicators of the Trojanka river water, the values of only 2 indices were statistically higher at the outflow from the reservoir.
3. Based on the conducted research, a great influence of the reservoir was proven, especially in the context of the concentration of dissolved oxygen at the outflow, where, concerning this indicator, the reservoir was classified as water quality class I. This situation might be influenced by located on the reservoir discharge and spillway structure with damming height of 3.8 m, which makes the oxygenation process more intensive.

4. The Przebędowo reservoir is a new one as it was commissioned in November 2014. Also, its ecosystem does not yet have its internal mechanisms that transform the excess of the biogenic compounds. This makes the reservoir susceptible to water quality fluctuations. Over the years one can expect the quality parameters to be better.

References

- Bogdał, A., Kowalik, T., Witoszek, K. (2015). Wpływ Zbiornika Goczałkowickiego na zmianę jakości wód w rzece Wiśle. *Inżynieria Ekologiczna*, 45, 124-134 (in Polish).
- Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., & Wilson, A. E. (2013). Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge*, 4(4), 10.
- Czamara, W., Czamara, A., Wiatkowski, M. (2008). The use pre-dams with plant filters to improve water quality in storage reservoirs. *Arch. Environ. Prot.*, 34, 79-89.
- Elser, J. J., Bracken, M. E., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., ... & Smith, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 10(12), 1135-1142.
- Galicka, W., Kruk, A., Zięba, G. (2007). Bilans azotu i fosforu w zbiorniku Jeziorsko. *Nauka Przyr. Technol.* 1(2), #17 (in Polish).
- Giercuskiewicz-Bajtlik, M. (1990). *Prognozowanie zmian jakości wód stojących*. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa (in Polish).
- Górniak, A. (2006). Ekosystem zbiornika Siemianówka w latach 1994-2004 i jego re-kultywacja. Publishing House of the University of Białystok, Poland (in Polish).
- Kanclerz, J., Wicher-Dysarz, J., Dysarz, T., Sojka, M., Dwornikowska, Ż. (2014). Wpływ Zbiornika Stare Miasto na jakość wody rzeki Powy. *Nauka Przyr. Technol.* 8(4), #54 (in Polish).
- Kanownik, W., Kowalik, T., Bogdał, A., Ostrowski, K., Rajda, Wł. (2011). Jakość i walory użytkowe wód odpływających ze zlewni zbiorników małej retencji planowanych w rejonie Krakowa. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu rozwojowego nr R12 001 02 sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego [Quality and utility value of water flowing from the catchment of planned small retention reservoirs near Kraków. Results of studies conducted within the R&D project no. R12 001 02 financed by the Ministry of Science and higher Education], 36 (in Polish).
- Kondracki, J. (2000). *Geografia regionalna Polski*. PWN, Warszawa (in Polish).
- Kozłowski, R., Przybylska, J., Kaleta, J. (2014). Wpływ zbiornika zaporowego Cedzyna na wybrane parametry jakości wody rzeki Lubrzanki w okresie letnim. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 19(1), 81-89 (in Polish).
- Pasternak, K. (1968). Skład chemiczny wody rzek i potoków o zlewniach zbudowanych z różnych skał i gleb. *Acta Hydrobiologica*, 10, 1-25 (in Polish).
- Pawełek, J., Spytek, M. (2005). *Substancje biogenne w dopływach zbiornika Dobczyckiego*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, PAN, 4/2005 99-113 (in Polish).

- Pawełek, J., Spytek, M. (2008). *Stężenie związków biogenych w wodzie potoków dopływających do zbiornika Dobczyńskiego*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, PAN, 5/2008 179-190 (in Polish).
- Pęczęła, W., Suchora, M. (2011). Analiza przyczyn występowania złej jakości wody w zbiorniku retencyjnym w Kraśniku w pierwszych latach jego funkcjonowania. *Prz. Nauk. Inż. Środ.* 54, 321-332 (in Polish).
- PN-91 C-04537-09:1973 Woda i ścieki. Badania zawartości związków fosforu. Oznaczanie fosforanów ogólnych metodą kolorymetryczną lub ekstrakcyjno-kolorymetryczną.
- PN-C-04576-08:1982 Woda i ścieki. Badania zawartości związków azotu. Oznaczanie azotu azotanowego metodą kolorymetryczną z salicylanem sodowym.
- PN-EN 1899-2:2002 Jakość wody. Oznaczanie biochemicznego zapotrzebowania tlenu po n dniach (BZTn) - Część 2: Metoda do próbek nierozcieńczonych.
- PN-EN 26777:1999 Jakość wody. Oznaczanie azotynów. Metoda absorpcyjnej spektrometrii cząsteczkowej.
- PN-EN 27888:1999 Jakość wody. Oznaczanie przewodności elektrycznej właściwej.
- PN-EN 25813:1997 Jakość wody. Oznaczanie stężenia tlenu rozpuszczonego.
- PN-EN ISO 9963-1:2001 Jakość wody. Oznaczanie zasadowości. Część 1: Oznaczanie zasadowości ogólnej i zasadowości wobec fenoloftaleiny.
- PN-ISO 7150-1:2002 Jakość wody. Oznaczanie azotu amonowego. Część 1. Manualna metoda spektrometryczna.
- PN-ISO 9280: 2002 Jakość wody. Oznaczanie siarczanów(VI) - Metoda grawimetryczna z chlorkiem baru
- PN-ISO 9297:1994 Jakość wody. Oznaczanie chlorków - Metoda miareczkowania azotanem srebra w obecności chromianu jako wskaźnika (Metoda Mohra).
- PN-ISO 8288:2002 Woda i ścieki – badania zawartości metali metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej - Oznaczanie cynku, miedzi, ołowiu, kadmu, niklu, kobaltu, żelaza i manganu w wodzie z zastosowaniem wstępnego zagęszczenia metodą chelatowania i ekstrakcji.
- Przybyła, Cz., Kozdrój, P., Sojka, M. (2014). Ocena jakości wód w lateralnych zbiornikach Jutrosin i Pakosław w pierwszych latach funkcjonowania [Assessment of water quality in the Jutrosin and Pakosław lateral reservoirs in the first years of their operation]. *Inżynieria Ekologiczna*, 39, 123-135 (in Polish).
- Puczyńska, I., Skrzypski, J. (2009). Integracja działań biologicznych i technicznych jako podstawa intensyfikacji procesów samooczyszczania się zbiorników zaporowych (na przykładzie zbiornika Sulejowskiego) [Integration of biological and engineering measures as the basis for intensification of self-purification in dam reservoirs (based on the Sulejowski reservoir)]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 16(S2), 221-23 (in Polish).
- The Regulation of the Ministry of Marine Economy and Inland Navigation of 11 October 2019 on the classification of the ecological status, ecological potential and chemical status, method of classifying the status of a body of surface water, as well as environmental quality standards for priority substances.
- Saunders, D. L., & Kalff, J. (2001). Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers. *Hydrobiologia*, 443(1), 205-212.

- Szczykowska, J., Siemieniuk, A., Wiater, J. (2013). Problemy ekologiczne zbiorników małej retencji na Podlasiu. *Ekonomia i Środowisko*, 4(47) (in Polish).
- Wiatkowski, M. (2008). *Wstępne wyniki badań jakości wody dopływającej i odpływającej ze zbiornika Psurów na rzece Prośnie*. W: Meteorologia, hydrologia, ochrona środowiska – kierunki badań i problemy. Red. A. Dubicki. Monogr. IMGW: 407-414.
- Wiatkowski, M. (2010). Zmiany wybranych wskaźników jakości wody rzeki Prośny przepływającej przez zbiornik Psurów. *Proc. ECOpole 4(2)*, 495-500.
- Wiatkowski, M. (2010). Ocena jakości wody zbiornika Komorów na potoku Milikówka. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, 8(2), 51-64 (in Polish).
- Wicher, J. (2004). *Akumulacja rumowiska w nizinnych zbiornikach wodnych*. Maszynopis. Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej UP, Poznań (in Polish).
- Wicher-Dysarz, J., Kanclerz, J. (2012). Funkcjonowanie małych zbiorników nizinnych z wydzieloną częścią wstępną na przykładzie zbiorników Jezioro Kowalskie i Stare Miasto. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 14(1), 885-897 (in Polish).

9. Oświadczenia kandydata oraz współautorów

Poznań, dnia 4. 06. 2024r.

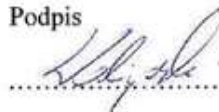
Mgr inż. Błażej Waligórski
Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie
Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu
ul. Chlebowa 4/8, 61-003 Poznań
blazej.waligorski@wody.gov.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. *Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), 2021 s.: 767-788.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, przeprowadzeniu badań terenowych oraz interpretacji wyników, napisaniu i redakcji manuskryptu, przygotowaniu odpowiedzi w procesie recenzji artykułu, co stanowi 60 % całej pracy.

Podpis



Poznań, dnia 4.06.2024 r.

Dr hab. inż. Mariusz Korytowski
Pracownia Melioracji i Kształtowania Środowiska,
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
mariusz.korytowski@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. *Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebudowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, 2021 s.: 767-788. Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na wskazaniu metodyki, nadzorze merytorycznym, pomocy w przygotowaniu odpowiedzi w procesie recenzji artykułu, co stanowi 15 % całej pracy.

Podpis


Poznań, dnia 04.08.2014r.

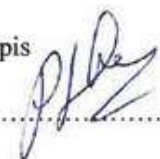
Prof. UPP dr hab. inż. Piotr Stachowski
Pracownia Melioracji i Kształtowania Środowiska,
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
piotr.stachowski@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. *Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), 2021 s.: 767-788.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na wskazaniu metodyki oraz interpretacji danych, co stanowi 10 % całej pracy.

Podpis



.....

Poznań, dnia 24.06.2024

Prof. UPP dr hab. inż. Krzysztof Otremba
Pracownia Rekultywacji,
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
krzysztof.otremba@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. *Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), 2021 s.: 767-788.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji artykułu oraz pomocy w realizacji końcowej edycji tekstu, co stanowi 10 % całej pracy.

Podpis


Poznań, dnia 26.06.2024

Mgr inż. Karolina Kraczkowska
Pracownia Melioracji i Kształtowania Środowiska,
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Stachowski P., Otremba K., Kraczkowska K. *Assessment of the Impact of a Dammed Reservoir on Groundwater Levels in Adjacent Areas Based on the Przebędowo Reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), 2021 s.: 767-788.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na przygotowaniu streszczenia artykułu, co stanowi 5 % całej pracy.

Podpis

Karolina Kraczkowska

Poznań, dnia 4.06.2024r.

Mgr inż. Błażej Waligórski
Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie
Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu
ul. Chlebowa 4/8, 61-003 Poznań
blazej.waligorski@wody.gov.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Zydrón A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. *The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, 2020, s.: 324-346.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, przeprowadzeniu badań terenowych oraz interpretacji wyników, napisaniu i redakcji manuskryptu, przygotowaniu odpowiedzi w procesie recenzji artykułu, co stanowi 60 % całej pracy.

Podpis



.....

Poznań, dnia 4.06.2024r.

Dr hab. inż. Mariusz Korytowski
Pracownia Melioracji i Kształtowania Środowiska,
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
mariusz.korytowski@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Zydróż A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. *The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, 2020, s.: 324-346.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na wskazaniu metodyki, pomocy w interpretacji wyników badań oraz nadzorze merytorycznym, co stanowi 10 % całej pracy.

Podpis



Poznań, dnia 4.06.2024r.

Prof. UPP dr hab. inż. Adam Zydrón
Pracownia Gospodarki Przestrzennej
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
adam.zydron@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Zydrón A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. *The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, 2020, s.: 324-346.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na interpretacji danych oraz pomocy w realizacji końcowej edycji tekstu, co stanowi 10 % całej pracy.

Podpis


Poznań, dnia 4.06.2024

Prof. UPP dr hab. inż. Daniel Liberacki
Pracownia Melioracji i Kształtowania Środowiska
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
daniel.liberacki@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Zydroń A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. *The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, 2020, s.: 324-346.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na wsparciu z zakresu opracowania metodyki badań, konsultacjach dotyczących dyskusji wyników oraz sformułowania wniosków, co stanowi 10 % całej pracy.

Podpis



Poznań, dnia 11.06.2024

Dr hab. inż. Michał Fiedler
Pracownia Geodezji
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
michal.fiedler@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Zydrón A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. *The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, 2020, s.: 324-346.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na pomocy w realizacji końcowej edycji tekstu oraz przygotowaniu pracy do druku, co stanowi 5 % całej pracy.

Podpis



Poznań, dnia 4.06.2024

Prof. UPP dr hab. inż. Rafał Stasik
Pracownia Hydrologii i Zasobów Wodnych
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
rafal.stasik@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Korytowski M., Zydrón A., Liberacki D., Fiedler M., Stasik R. *The water balance in a dammed reservoir – a case study of the Przebędowo reservoir. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 22, 2020, s.: 324-346.* Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał interpretacji wyników oraz pomocy w sformułowaniu wniosków, co stanowi 5 % całej pracy.

Podpis



Poznań, dnia 4.06.2024 r.

Mgr inż. Błażej Waligórski
Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie
Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu
ul. Chlebowa 4/8, 61-003 Poznań
blazej.waligorski@wody.gov.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Janicka E. *The Influence of the Przebędowo Reservoir on the Water Quality of the Trojanka River in the First Years of its Functioning. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 23, 2021, s.:151-167* (<http://dx.doi.org/10.54740/ros.2021.010>). Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, wskazaniu metodyki, przeprowadzeniu badań terenowych oraz interpretacji wyników, napisaniu i redakcji manuskryptu, przygotowaniu odpowiedzi w procesie recenzji artykułu, co stanowi 85 % całej pracy.

Podpis



.....

Poznań, dnia 4.06.2024

Dr inż. Ewelina Janicka
Pracownia Hydrologii i Zasobów Wodnych
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Piątkowska 94, 60-649 Poznań
ewelina.janicka@up.poznan.pl

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

Waligórski B., Janicka E. *The Influence of the Przebędowo Reservoir on the Water Quality of the Trojanka River in the First Years of its Functioning. Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska), Volume 23, 2021, s.:151-167* (<http://dx.doi.org/10.54740/ros.2021.010>). Mój indywidualny udział w jej powstawaniu polegał na współdziałaniu w tworzeniu koncepcji artykułu, przeprowadzeniu obliczeń i analiz statystycznych oraz pomocy w sformułowaniu wniosków, co stanowi 15 % całej pracy.

Podpis


.....

Oświadczenie autora pracy doktorskiej o jej oryginalności, samodzielności jej przygotowania i o nienaruszeniu praw autorskich


Błażej Waligórski

Niniejszym oświadczam, że przedłożoną pracę doktorską pt.: „Ocena funkcjonowania zbiornika zaporowego w pierwszych latach eksploatacji na przykładzie obiektu Przebędowo”.

Napisałem samodzielnie, tj.

- nie zleciłem opracowania pracy lub jej części innym osobom,
- nie przepisałem pracy lub jej części z innych opracowań i prac związanych tematycznie z moją pracą,
- korzystałem jedynie z niezbędnej konsultacji,
- wszystkie elementy pracy, które zostały wykorzystane do jej realizacji (cytaty, ryciny, tabele, programy itp.), a nie będące mojego autorstwa, zostały odpowiednio zaznaczone oraz zostało podane źródło ich pochodzenia,
- praca nie była wcześniej podstawą nadania stopnia doktora innej osobie

Mam świadomość, że złożenie nieprawdziwego oświadczenia skutkować będzie niedopuszczeniem do dalszych czynności przewodu doktorskiego lub cofnięciem decyzji o nadaniu mi stopnia doktora oraz wszczęciem postępowania dyscyplinarnego.

26.06.2024 
Data i podpis autora

Oświadczenie promotora pracy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data

21.06.2024

Podpis promotora rozprawy



**Oświadczenie autora o zgodności
elektronicznej wersji pracy z jej formą wydrukowaną**

Błażej Waligórski

Niniejszym oświadczam, że załączona, wydrukowana wersja mojej pracy doktorskiej pt.: „Ocena funkcjonowania zbiornika zaporowego w pierwszych latach eksploatacji na przykładzie obiektu Przebędowo”, jest zgodna z plikiem w wersji elektronicznej, znajdującym się na załączonym nośniku, przeznaczonym do sprawdzenia w systemie antyplagiatowym.

26.06.2025 
Data i podpis autora