

Lilianna BARTOSZEK¹
Dorota CZECH²

PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ ZBIORNIKA ZAPOROWEGO SOLINA

W pracy dokonano oceny podatności na degradację zbiornika zaporowego Solina utworzonego na rzece San. W wyniku przeprowadzonej oceny parametrów morfometrycznych i hydrologicznych zbiornik Solina zakwalifikowano do I kategorii odporności na degradację. Przynależność do tej kategorii świadczy o wysokiej odporności zbiornika Solina na oddziaływanie jego zlewni. Decydujący wpływ na jego wysoką odporność na degradację mają takie parametry obiektu, jak: głębokość średnia, procent stratyfikacji wód, stosunek powierzchni dna czynnego do objętości epilimnionu oraz współczynnik Schindlera. W rezultacie przeprowadzonej analizy cech środowiskowych zlewni zbiornika Solina zaszeregowano do trzeciej grupy podatności na dostawę materii. Stosunkowo dużym możliwościom uruchomienia ładunku obszarowego w zlewni sprzyjają: przepływowy typ bilansowy jeziora, wysoki średni spadek terenu zlewni, niski procent obszarów bezodpływowych oraz wysoki współczynnik Ohlego. W latach 2005-2006 odnotowano kilkakrotnie wyższy ładunek rzeczywisty fosforu w stosunku do ładunku niebezpiecznego docierający ze zlewni do zbiornika. Na tej podstawie stwierdzono, że obiekt jest w bardzo dużym stopniu narażony na postępujący proces degradacji, jeśli nie nastąpi aktywizacja działań ochronnych w jego zlewni. Po zestawieniu I kategorii odporności zbiornika Solina i trzeciej grupy podatności jego zlewni na uruchomienie ładunku zanieczyszczeń uzyskano II typ układu środowiskowego zlewnia-zbiornik charakteryzujący się umiarkowanym postępowaniem procesu eutrofizacji wód, przy czym niekorzystnym warunkom panującym w zlewni przeciwstawia się wysoka naturalna odporność zbiornika zaporowego Solina na proces degradacji.

Słowa kluczowe: odporność na degradację, oddziaływanie zlewni, kategoria zagrożenia, typ układu środowiskowego

1. Wprowadzenie

W śródlądowych ekosystemach wodnych eutrofizacja jest bardzo częstym zjawiskiem. Występuje w wodach powierzchniowych, jednak w głównej mierze odnosi się do wód stojących oraz zbiorników zaporowych, które mają właściwo-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Lilianna Bartoszek, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651278, bartom@prz.edu.pl

² Dorota Czech, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

ści kumulowania materii [11]. Można wyróżnić dwa rodzaje eutrofizacji: naturalną oraz antropogeniczną. Eutrofizacja naturalna zależy od warunków geologicznych i naturalnych cech zlewni zbiornika. Proces ten, przebiegając w sposób naturalny, powoduje powolne przekształcenie jezior ubogich w składniki odżywcze, zwanych oligotroficznymi, w jeziora zasobne w te substancje – jeziora eutroficzne. Eutrofizacja antropogeniczna jest związana z działalnością człowieka. Wskutek znaczącego zwiększenia ilości doprowadzanych substancji biogenych do środowisk wodnych nastąpiło istotne przyspieszenie postępu tego procesu [5, 23].

Głównymi pierwiastkami biogennymi przyczyniającymi się do zwiększenia żyzności zbiorników wodnych i szybkiego postępu eutrofizacji są azot i fosfor. Oba te pierwiastki są bardzo istotne w życiu roślin i zwierząt, ale nie mogą występować w wodzie w nadmiernych ilościach, gdyż powodują przyspieszony, obfity rozwój glonów oraz wyższej roślinności wodnej. Substancje biogenne przedostają się do wód powierzchniowych głównie ze źródeł punktowych oraz obszarowych. Największą rolę ze źródeł punktowych odgrywają zrzuty ścieków komunalnych oraz przemysłowych niosące ogromne ładunki pierwiastków biogennych. Bardziej rozprzestrzenione, nieregularne i trudniejsze do kontrolowania są źródła obszarowe, z których najważniejsze to spływy powierzchniowe z nawożonych pól uprawnych oraz opady atmosferyczne [1, 5].

Kryterium oceny obciążenia zbiornika biogenami stanowi wielkość ładunku rzeczywistego trafiającego do zbiornika ze źródeł zewnętrznych w porównaniu z wielkością ładunku dopuszczalnego i niebezpiecznego określonego dla tego obiektu. Ładunek dopuszczalny to taka ilość dostającego się do wody azotu lub fosforu, która nie powoduje zakwitów glonów. Ładunek azotu lub fosforu, który będzie powodował przyspieszony wzrost trofii wód, określa się jako ładunek niebezpieczny [1, 11]. Intensywność wzrostu poziomu trofii wód zbiornika zależy zarówno od charakteru zlewni jako dostawcy materii, jak i od odporności na degradację samego zbiornika, na którą wpływ wywiera wiele czynników związanych z jego morfometrią i hydrologią [7, 15]. Jednak bez względu na wynik oceny odporności samego zbiornika na degradację działania w zakresie ochrony i racjonalnego wykorzystania jego zasobów wodnych nie mogą zostać zaprzestane. Ograniczenie spływów substancji organicznych i biogennych ze zlewni, zarówno ze źródeł punktowych, jak i obszarowych jest niezbędne także w przypadku, gdy zbiornik charakteryzuje się wysoką odpornością na wpływy z zewnątrz. Zabiegi rekultywacyjne przeprowadzane w obrębie zbiorników wodnych są procesem ostatecznym, złożonym technicznie oraz niezwykle kosztownym.

Celem pracy była ocena roli, jaką zlewnia zbiornika zaporowego Solina odgrywa w przyspieszeniu lub hamowaniu jego eutrofizacji oraz ocena naturalnej odporności tego zbiornika na degradację troficzną z wykorzystaniem systemu stosowanego do oceny podatności na degradację jezior.

2. Teren badań i metodyka

Teren badań

Zbiornik Solina jest największym pod względem pojemności oraz najgłębszym zbiornikiem zaporowym w Polsce (tab. 1.). Zapora zbiornika Solina jest najwyższą polską zaporą (81,8 m), co pociąga za sobą znaczną głębokość tego akwenu (maksymalna 60 m, średnia 22 m).

Tabela 1. Parametry techniczne i morfometryczne zbiornika Solina, na podstawie [12]

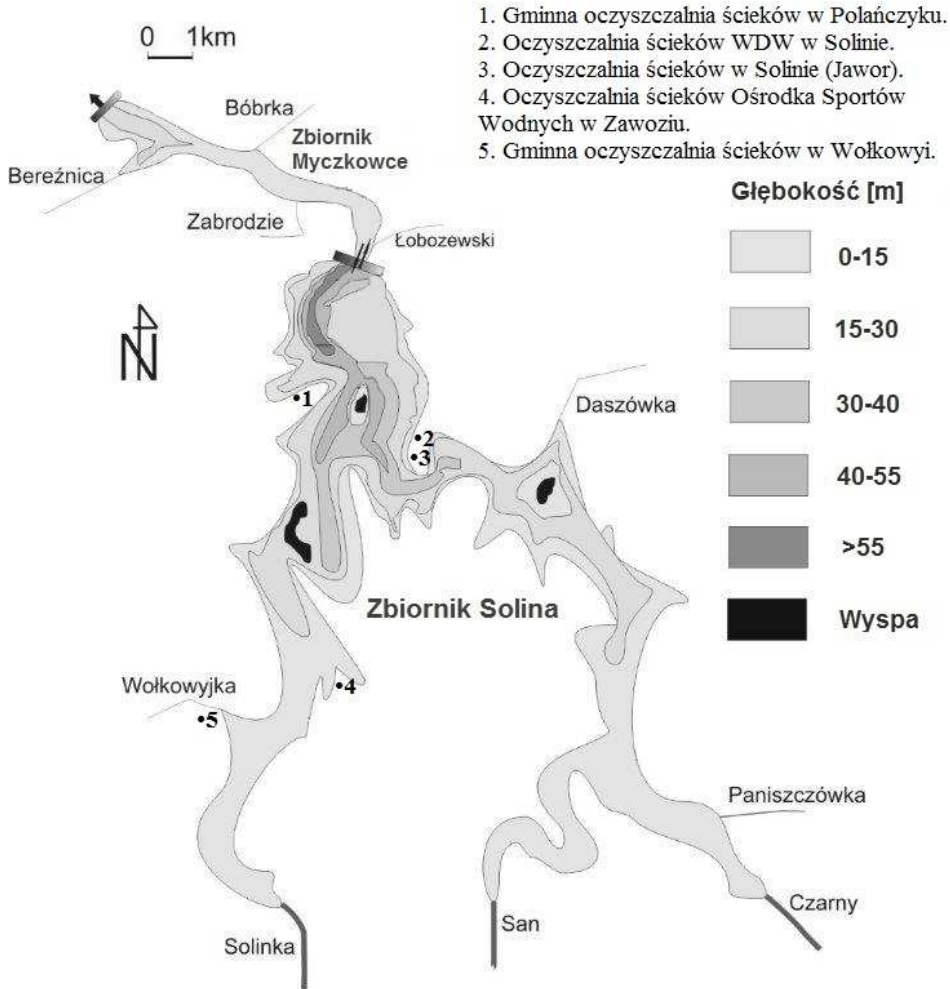
Table 1. Technical and morphometric parameters of the Solina Reservoir, based on [12]

Parametr	Jednostka	Zbiornik Solina
Długość zapory	[m]	648
Wysokość zapory	[m]	81,8
Powierzchnia zbiornika	[ha]	2200
Powierzchnia zlewni całkowitej	[km ²]	1174,5
Powierzchnia zlewni bezpośredniej	[km ²]	83,9
Objętość maksymalna	[mln m ³]	502
Głębokość średnia	[m]	22
Średni czas zatrzymania wody (czas retencji)	[d]	275
Długość linii brzegowej	[km]	150

Zbiornik Solina wraz ze zlokalizowanym poniżej zbiornikiem wyrównawczym w Myczkowcach (rys. 1.) tworzy zespół zbiorników gromadzący ok. 18% ogółu retencjonowanych wód Polski [13, 16]. Do podstawowych zadań zbiornika Solina należy retencjonowanie wody do celów energetycznych, przeciwpowodziowych, a także wyrównanie przepływu na rzece San poniżej zbiornika. Stanowi on również źródło zaopatrzenia w wodę pitną pobliskich miejscowości. Gospodarka wodami zbiornika zachodzi w warunkach przepływów normalnych oraz powodziowych. Obejmuje przedział pomiędzy rzędnymi [13]:

- minimalną – 401,50 m n.p.m., objętość 196,340 mln m³,
- normalną – 420,00 m n.p.m., objętość 472,040 mln m³,
- napiętna – 421,50 m n.p.m., objętość 503,970 mln m³.

Zbiornik Solina jest bezpośrednim odbiornikiem ścieków z kilku mechaniczno-biologicznych oczyszczalni ścieków (rys. 1.). Najwięcej ścieków przyjmuje z oczyszczalni gminnej zlokalizowanej w Polańczyku o przepustowości 900 m³/dobę (RLM 2650) oraz oczyszczalni Wojskowych Domów Wypoczynkowych (WDW) w Solinie (RLM 3363). Ilość ścieków znacząco wzrasta w sezonie turystycznym [16, 21].



Rys. 1. Zespół zbiorników zaporowych Solina-Myczkowce – rozmieszczenie głównych punktowych źródeł zanieczyszczeń

Fig. 1. The complex of the Solina-Myczkowce reservoirs – distribution of major point sources of pollution

Całkowita zlewnia zbiornika Solina zajmuje powierzchnię 1174,5 km², z czego 129 km² jest położone na terenach Ukrainy. Zlewnia bezpośrednia przylegająca do linii brzegowej zbiornika zajmuje powierzchnię 83,9 km². Zlewnia zbiornika Solina obejmuje zasadniczo zlewnie głównych jego dopływów, czyli górnego Sanu oraz Solinki, a także potoków bezpośrednio dopływających do zbiornika, tj. Czarnego, Wołkowyjki, Paniszcówki, Daszówki i Bukowieckiego [12].

Zlewnia zbiornika Solina ma charakter górski i jest jednym z najbardziej zalesionych obszarów Polski. Ponad 75% powierzchni terenu zajmują lasy (głównie górskie z przeważającym występowaniem buka i jodły). Intensywna rzeźba terenu ogranicza możliwości jego rolniczego wykorzystania, dlatego grunty orne stanowią jedynie około 4% powierzchni, a łąki i pastwiska 14%. Występujące gleby to głównie gliniaste z domieszką żwiru, piasku i kamieni, typowo górskie, wietrzeniowe [16, 22]. Teren zlewni jest słabo zaludniony. Zabudowania osadnicze znajdują się głównie w przyujściowych rejonach dopływów i w zlewni bezpośredniej wokół zbiornika. Brak jest zakładów przemysłowych. Aktywność gospodarcza na tych terenach jest skupiona głównie na działalności turystyczno-rekreacyjnej. Ośrodki wypoczynkowe, pensjonaty i gospodarstwa agroturystyczne w sezonie turystycznym (także liczne pola namiotowe) są zlokalizowane na obrzeżach zbiornika [21]. Ruch turystyczny koncentruje się głównie w najbliższym sąsiedztwie zbiornika Solina oraz na obszarze Bieszczadzkiego Parku Narodowego. Zlewnia górnego Sanu jako jeden z najcenniejszych obszarów przyrodniczych kraju w całości została objęta różnymi formami ochrony. Znajdujące się na tym terenie Bieszczadzki Park Narodowy i parki krajobrazowe wchodzi w skład Międzynarodowego Rezerwatu Biosfery „Karpaty Wschodnie”. Teren przylegający bezpośrednio do zbiornika leży w obrębie Wschodniobeskidzkiego Obszaru Chronionego Krajobrazu [21].

Metodyka

Ocenę naturalnej odporności na degradację zbiornika zaporowego Solina przeprowadzono w 2014 roku według zmodyfikowanego Systemu Oceny Jakości Jezior opracowanego przez Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska [1, 15]. Zmodyfikowany system uwzględnia 6 wskaźników, którym po ich obliczeniu przyznaje się punkty od 0 (odporność wysoka) do 3 (brak odporności na wpływ zlewni) (tab. 2.). Średnia arytmetyczna tych punktów pozwala zaliczyć obiekt do odpowiedniej kategorii odporności spośród wymienionych w tab. 3.

Tabela 2. Ocena odporności zbiornika wodnego na degradację, na podstawie [1]

Table 2. Resilience assessment to degradation of the water reservoir, based on [1]

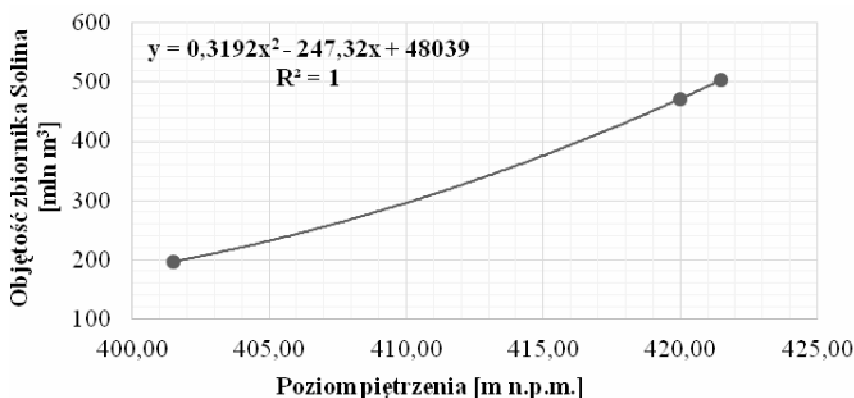
Parametry	Punktacja			
	0	1	2	3
Głębokość średnia [m]	> 10	5-10	3-5	< 3
Pojemność zbiornika [tys. m ³] do długości linii brzegowej [m]	> 5	3-5	1-3	< 1
Stratyfikacja wód [%]	> 35	20-35	10-20	< 10
Powierzchnia dna czynnego [m ²] do pojemności epilimnionu [m ³]	< 0,10	0,10-0,15	0,15-0,30	> 0,30
Intensywność wymiany wód	> 10	5-10	1-5	< 1
Współczynnik Schindlera [m ⁻¹]	< 10	10-30	30-100	> 100

Tabela 3. Kategorie odporności zbiornika wodnego na degradację, na podstawie [1]

Table 3. Resilience categories to degradation of the water reservoir, based on [1]

Średnia arytmetyczna	Kategoria	Opis
$\leq 0,8$	I	w dużym stopniu odporny na wpływ zlewni
od 0,9 do 1,6	II	średnio odporny na wpływ zlewni
od 1,7 do 2,4	III	mało odporny na wpływ zlewni
$> 2,4$	IV	praktycznie nieodporny na wpływ zlewni

Do określenia parametru „stratyfikacja wód”, czyli procentowego udziału objętości meta i hypolimnionu, w całej objętości wód zbiornika wykorzystano badania stratyfikacji termiczno-tlenowej przeprowadzone w zbiorniku Solina w 2000 roku [8]. Wyniki tych badań wykazały, że warstwa epilimnionu sięgała średnio do 6,5 m głębokości. Aby określić objętość meta i hypolimnionu oraz epilimnionu sporządzono wykres zależności pojemności zbiornika od poziomu piętrzenia (rys. 2.). Opierając się na uzyskanej zależności wyznaczono przybliżoną objętość wody w zbiorniku, w przypadku gdyby lustro wody znajdowało się na głębokości 6,5 m poniżej normalnego poziomu piętrzenia. Uzyskano tym samym przybliżoną objętość warstw meta i hypolimnionu. Założono, że maksymalny poziom piętrzenia występuje tylko w okresach śródzimowych roztopów i wiosną.



Rys. 2. Zależność pojemności zbiornika od poziomu piętrzenia, na podstawie [13]

Fig. 2. The relationship of the reservoir capacity to the level of damming, based on [13]

Bardziej złożone okazało się określenie powierzchni dna czynnego, czyli objętego zasięgiem epilimnionu ze względu na brak dostępu do dokładnej mapy batymetrycznej zbiornika Solina. Na podstawie dostępnej mapy batymetrycznej [14, 17] oszacowano, że strefy o głębokości zbiornika nieprzekraczającej 6,5 m nie będą stanowiły więcej niż 15% powierzchni całkowitej akwenu.

Rolę, jaką zlewnia zbiornika Solina odgrywa w przyspieszaniu lub hamowaniu jego degradacji, określono za pomocą systemu zaproponowanego przez Bajkiewicz-Grabowską [1]. Zgodnie z tym systemem do oceny stopnia oddziaływania zlewni jako dostawcy materii biogennej do zbiornika uwzględnia się 7 parametrów, którym przyznaje się odpowiednią ilość punktów w skali od 0 do 3 (tab. 4.). Średnia arytmetyczna z przyznaných punktów dla poszczególnych parametrów umożliwia zakwalifikowanie zlewni do jednej z czterech grup podatności (tab. 5.).

Tabela 4. Ocena podatności zlewni na dostawę materii do zbiornika wodnego, na podstawie [1]

Table 4. Susceptibility assessment of catchment for the supply of matter into the water reservoir, based on [1]

Parametry	Punktacja			
	0	1	2	3
Współczynnik jeziora (Ohlego)	< 10	10-40	40-150	> 150
Typ bilansowy jeziora	-	odpływowe	bezodpływowe	przepływowe
Gęstość sieci rzecznej [km·km ⁻²]	< 0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	> 1,5
Średni spadek zlewni [%]	< 5	5-10	10-20	> 20
Obszary bezodpływowe [%]	> 60	45-60	20-45	< 20
Budowa geologiczna zlewni	gliniasta, torfiasta	piaszczysto-gliniasta	gliniasto-piaszczysta	piaszczysta
Użytkowanie ziemi	leśna, bagienna, rolniczo-leśna, pastwiskowo-rolniczo-leśna, pastwiskowa, pastwiskowo-leśna	leśno-rolnicza, pastwiskowo-rolnicza	rolnicza, pastwiskowo-leśno-rolnicza z zabudową, leśna z zabudową	leśno-rolnicza z zabudową, pastwiskowo-rolnicza z zabudową, rolnicza z zabudową

Tabela 5. Grupy podatności zlewni na dostawę materii do zbiornika wodnego, na podstawie [1]

Table 5. Susceptibility groups of catchment for the supply of matter into the water reservoir, based on [1]

Średnia arytmetyczna	Grupa	Opis
≤ 1,0	1.	praktycznie brak możliwości dotarcia materii do zbiornika
od 1,1 do 1,4	2.	mała możliwość dostawy materii do zbiornika
od 1,5 do 1,9	3.	umiarkowana możliwość dotarcia materii do zbiornika
≥ 2,0	4.	duża możliwość dostawy materii do zbiornika

Gęstość sieci rzecznej w zlewni obliczono ze wzoru:

$$D = \frac{\sum l}{A_{zlewni}} \left[\frac{\text{km}}{\text{km}^2} \right] \quad (1)$$

gdzie: $\sum l$ – długość wszystkich cieków w zlewni zbiornika [km],
 A_{zlewni} – powierzchnia zlewni [km²].

Długości głównych dopływów zbiornika Solina, czyli rzek San i Solinka, oraz potoków Czarny, Wołkowyjka, Paniszczówka, Daszówka i Bukowiecki zaczerpnięto z literatury [3, 12]. Długości cieków będących dopływami górnego Sanu i Solinki odczytano z mapy podziału hydrograficznego Polski [18].

Średni spadek terenu zlewni obliczono, korzystając ze wzoru (2):

$$J = \frac{\Delta H}{\sqrt{A_{zlewni}}} [\text{‰}] \quad (2)$$

gdzie: ΔH – różnica wysokości zlewni [m n.p.m.],
 A_{zlewni} – powierzchnia zlewni [km²].

Średni spadek terenu obliczono nie dla zlewni bezpośredniej, lecz dla zlewni całkowitej. Zlewnia bezpośrednia stanowi zaledwie ok. 7% powierzchni zlewni całkowitej zbiornika Solina. Cały obszar zlewni zbiornika Solina ma charakter górski. Różnicę wysokości zlewni obliczono, przyjmując za wartość maksymalną wysokość Tarnicy (1346 m n.p.m.) – najwyższego szczytu polskich Bieszczadów, a za minimalną poziom lustra wody w zbiorniku przy normalnym poziomie piętrzenia (420 m n.p.m.).

Mając dane dotyczące wielkości ładunku rzeczywistego (L_{rz}) fosforu dostarczanego ze zlewni do zbiornika Solina w latach 2005-2006 [4] oraz wielkości ładunku fosforu dopuszczalnego ($L_{dop.}$) i niebezpiecznego ($L_{nieb.}$) dla tego obiektu obliczone według modelu hydraulicznego Vollenweidera [1], określono kategorię zagrożenia zbiornika (tab. 6.).

Tabela 6. Kategorie zagrożenia zbiornika wodnego, na podstawie [1]

Table 6. Threat categories of water reservoir, based on [1]

Wielkość ładunku	Kategoria zagrożenia zbiornika
$L_{rz} < L_{dop.}$	I
$L_{dop.} \leq L_{rz} < L_{nieb.}$	II
$L_{rz} \geq L_{nieb.}$	III

W wyniku zestawienia kategorii odporności zbiorników i grup podatności zlewni można wyodrębnić cztery typy układów środowiskowych zlewnia-zbiornik o różnym postępie naturalnej eutrofizacji (tab. 7.).

Tabela 7. Typy układów środowiskowych zlewnia-zbiornik wodny o różnym postępie naturalnej eutrofizacji, na podstawie [1]

Table 7. Types of the environmental systems 'catchment-water reservoir' with different progress of natural eutrophication, based on [1]

Kategoria odporności zbiornika	Grupa podatności zlewni	Typ układu	Charakterystyka układu zlewnia-zbiornik	Postęp naturalnej eutrofizacji
I lub II	1. lub 2.	I	zbiornik jest odporny na wpływ zlewni, a zlewnia jest mało aktywna w dostarczaniu materii	istnieje szansa utrzymania niskiego poziomu trofii wód
I lub II	3. lub 4.	II	duże możliwości uruchamiania ładunku obszarowego w zlewni są zrównoważone wysoką naturalną odpornością zbiornika	postęp eutrofizacji powinien być umiarkowany
III lub IV	1. lub 2.	III	małym możliwościom uruchamiania ładunku obszarowego w zlewni towarzyszy mała odporność zbiornika	wzrost aktywności w zlewni może spowodować szybki postęp eutrofizacji
III lub IV	3. lub 4.	IV	warunki naturalne zlewni i zbiornika są niekorzystne	szybki postęp eutrofizacji

3. Wyniki i dyskusja

Oporność na degradację zbiornika zaporowego Solina

W wyniku przeprowadzonej oceny parametrów morfometrycznych i hydrologicznych zbiornika Solina uzyskano średnią punktów 0,5, co kwalifikuje analizowany obiekt do I kategorii odporności na degradację (tab. 8.). Przynależność do tej kategorii świadczy o wysokiej odporności zbiornika Solina na oddziaływanie zlewni. Najbardziej korzystnie z punktu widzenia odporności na degradację prezentują się takie parametry obiektu, jak: głębokość średnia, procent stratyfikacji wód, stosunek powierzchni dna czynnego do objętości epilimnionu oraz współczynnik Schindlera.

Główną rolę odgrywa tu głębokość zbiornika, pozostałe parametry są z nią pośrednio związane. Znaczącą głębokość ma strefa o charakterze jeziornym rozpościerająca się od miejsca wymieszania wód dopływających z obydwu odnóg zbiornika, aż do zapory (głębokość od 40 do 60 m). Głębokość w górnej części zbiornika (w pobliżu ujść rzek San i Solinka oraz potoków Czarny i Wołkowyjka) w zależności od poziomu piętrzenia sięga do 15 m. Stratyfikacja na ogół nie występuje (stosunkowo duża prędkość przepływu wody powoduje prawdopodobnie jej zaburzenie).

Tabela 8. Ocena naturalnej odporności na degradację zbiornika zaporowego Solina

Table 8. Assessment of natural resilience to degradation of the Solina Reservoir

Parametr	Jednostka	Wartość wyznaczona dla zbiornika Solina	Liczba punktów
Głębokość średnia	[m]	22	0
Pojemność zbiornika /długość linii brzegowej	[tys. m ³ · m ⁻¹]	3,35	1
Procent stratyfikacji wód	[%]	74,1	0
Powierzchnia dna czynnego/objętość epilimnionu	[-]	0,035	0
Intensywność wymiany wody w roku	[-]	1,3	2
Współczynnik Schindlera	[m ⁻¹]	2,38	0
Średnia liczba punktów		0,5	
Kategoria odporności zbiornika		I	

Występowanie stratyfikacji termicznej, czyli termicznego uwarstwienia wód wypełniających zbiorniki wodne, jest cechą charakterystyczną dostatecznie głębokich obiektów. Termika zbiorników zaporowych jest uzależniona od ich parametrów morfometrycznych, hydrologicznych oraz sposobu użytkowania. Stratyfikacja termiczna w okresie lata kształtuje się w najgłębszych miejscach słabo przepływowych zbiorników zaporowych [6]. W zbiorniku Solina stratyfikacja występuje w centralnej i w pobliżu centralnej części zbiornika [8]. Ze względu na zróżnicowanie przestrzenne głębokości i prędkości przepływu wody, a co za tym idzie prawdopodobnie stopnia stratyfikacji, oraz dane dotyczące tylko punktowych badań stratyfikacji w zbiorniku Solina procent stratyfikacji wód na poziomie 74,1 mógł być przypuszczalnie zawyżony. Jednak według zastosowanego systemu oceny 0 pkt przyznaje się, gdy procent stratyfikacji jest wyższy niż 35. Im wyższy jest procent stratyfikacji wód, tym w mniejszym stopniu zachodzi krążenie substancji w zbiorniku. W związku z tym, nawet jeśli procent stratyfikacji wód w zbiorniku Solina został przeszacowany, to ze względu na tak dużą różnicę względem wartości granicznej nie powinno mieć to istotnego wpływu na końcową ocenę odporności obiektu.

Kolejny korzystnie wypadający parametr związany zarówno z głębokością, jak i stratyfikacją wód to stosunek powierzchni dna czynnego do objętości epilimnionu. Dno czynne to obszar dna leżący w zasięgu epilimnionu. Wartość tego stosunku jest więc miarą krążenia substancji biogennych pomiędzy osadami dennymi a wodą powierzchniową, w której zachodzi produkcja. Dla wód zbiorników korzystna jest jak najniższa wartość tego stosunku, czyli jest ograniczony kontakt osadów dennych z wodami epilimnionu, a co za tym idzie mniejsza możliwość wzbogacania wewnętrznego tych wód w fosforany. Woda w obrębie epilimnionu ulega mieszanemu przez wiatr nawet podczas stagnacji letniej, przez

co fosforany są łatwo rozprowadzane w strefie trofogenicznej, w której są wykorzystywane przez fitoplankton. Współczynnik Schindlera, czyli iloraz łącznej powierzchni zbiornika i zlewni całkowitej do pojemności zbiornika również powinien być jak najniższy. Według Kajaka [10] jedną z głównych cech różniących zbiorniki zaporowe od jezior jest znacznie większa powierzchnia zlewni, co skutkuje sporym obciążeniem w związku biogenne. Zlewnia całkowita zbiornika Solina zajmuje rozległą powierzchnię 1174,5 km². Dla porównania powierzchnia zlewni zbiornika Goczałkowice wynosi 522 km², zbiornika Dobczyce 770 km² [25]. Stosunkowo dużą powierzchnię zlewni równoważy wyjątkowo duża objętość zbiornika Solina, stąd niska wartość współczynnika Schindlera. Duża objętość wody w zbiorniku wpływa na rozcieńczenie zanieczyszczeń spływających bezpośrednio i za pośrednictwem dopływów z terenu zlewni.

Najbardziej niekorzystnie z punktu widzenia odporności na degradację wypadł parametr intensywności wymiany wody w roku (2 pkt). Mała intensywność wymiany wody w ciągu roku (1,3 razy) kwalifikuje obiekt do zbiorników zaporowych o charakterze limnicznym. Zbiorniki limniczne, w których woda wymienia się rzadziej niż 10 razy w ciągu roku (czas retencji wody jest dłuższy niż 36 dni), są zaliczane do zbiorników o przewadze cech jeziornych [6]. W zbiornikach zaporowych rozwój planktonu zależy nie tylko od zawartości w wodzie substancji biogennej, ale również w znacznym stopniu od czasu retencji wody. Warunki do rozwoju planktonu w szybko płynącej (zwłaszcza górskiej) rzece są niesprzyjające. Wraz ze spowolnieniem prędkości przepływu w zbiorniku zaporowym (zwłaszcza w jego strefie jeziornej) powierzchniowa warstwa wody szybciej ulega ogrzaniu, co razem z jej dostateczną żywnością oraz dużym nasłonecznieniem może stwarzać sprzyjające warunki do rozwoju planktonu. Kilka dni wystarczy, aby rozwinął się fitoplankton zbiornikowy. Niektóre organizmy zooplanktonowe potrzebują jednak nieco dłuższego czasu ok. 2 tygodni [24]. W zbiorniku Solina czas retencji wody średnio wynosi ok. 275 dni, co może niestety niekorzystnie wpływać na jego możliwości obronne przed postępem eutrofizacji.

Niekorzystnie wypadł także stosunek pojemności zbiornika do długości jego linii brzegowej (1 pkt). Im wyższa jest wartość tego ilorazu, tym odporność zbiornika wzrasta. Związane jest to z większą możliwością rozcieńczania spływających ze zlewni zanieczyszczeń poprzez bezpośrednią strefę kontaktu wody z łądem. Im głębsze i mniejsze zbiorniki pod względem powierzchni (zwłaszcza z mniej rozwiniętą linią brzegową), tym bardziej odporne na procesy przeżyźnienia.

Podatność zlewni na dostawę materii do zbiornika Solina

W rezultacie przeprowadzonej analizy cech środowiskowych charakteryzujących zlewnię zbiornika Solina uzyskano średnią wartość z przyznanych punktów wynoszącą 1,86 (tab. 9.). Wartość ta mieści się w zakresie odpowiadającym trzeciej grupie podatności. W trzeciej grupie podatności zawarto zlewnie charak-

teryzujące się umiarkowaną możliwością dostawy materii do zbiornika. Najbardziej niekorzystnie wypadły parametry: typ bilansowy jeziora, średni spadek terenu zlewni, procent obszarów bezodpływowych oraz współczynnik Ohlego.

Tabela 9. Ocena zlewni zbiornika Solina jako dostawcy materii biogennej

Table 9. Assessment of the Solina Reservoir catchment as a supplier of biogenic matter

Parametr	Jednostka	Wartość wyznaczona dla zbiornika Solina	Liczba punktów
Współczynnik zbiornika (współczynnik Ohlego)	[-]	53,39	2
Typ bilansowy jeziora	[-]	przepływowe	3
Średni spadek terenu zlewni	[‰]	27,02	3
Budowa geologiczna zlewni	[-]	piaszczysto-gliniasta	1
Sposób użytkowania terenu	[-]	pastwiskowo-leśna	0
Gęstość sieci rzecznej	[km · km ⁻²]	0,61	1
Procent obszarów bezodpływowych	[%]	< 20	3
Średnia liczba punktów		1,86	
Grupa podatności zlewni		3	

Zbiorniki zaporowe są budowane na ciekach, dlatego też zawsze będą należeć do typu przepływowego. Przepływy charakter jeziora umożliwia zarówno przyspieszony transport zanieczyszczeń z terenu zlewni za pośrednictwem dopływających cieków, jak i ich częściowy eksport z odpływem. Z punktu widzenia odporności zbiornika na degradację korzystne jest, gdy część ładunku substancji biogennej jest odprowadzana wraz z odpływem ze zbiornika i nie jest asymilowana przez fitoplankton. Miał to na względzie Vollenweider (1968), który zalecał stosować model hydrauliczny do obliczeń ładunku dopuszczalnego i niebezpiecznego fosforu w przypadku jezior przepływowych i zbiorników zaporowych, uwzględniający częstość całkowitej wymiany wody w zbiorniku [1]. Wielkości ładunków dopuszczalnych i niebezpiecznych liczone dla danego zbiornika za pomocą modelu statycznego i hydraulicznego [1] znacznie się różnią. Przykładowo, wielkość ładunku niebezpiecznego fosforu dla zbiornika Solina liczona według modelu statycznego (czyli uwzględniającego tylko głębokość średnią obiektu) wynosi 0,87 mgP · m⁻²d⁻¹, podczas gdy według modelu hydraulicznego 2,94 mgP · m⁻²d⁻¹, czyli może być kilkukrotnie wyższa dla akwenów, w których występuje eksport ładunku poza ekosystem wraz z odpływem. W przypadku zastosowania systemu do oceny zlewni zbiorników zaporowych należałoby się zastanowić nad zmodyfikowaniem tego parametru lub jego wyeliminowaniem. Typ bilansowy jeziora można zastąpić przez czas retencji wody w zbiorniku zaporowym. Można w tym celu wykorzystać podział zbiorników zaporowych na limniczne (czas retencji wody > 36 dni), reolimniczne (czas retencji < 36 dni, ale > 10 dni), superreolimniczne (czas retencji < 10 dni) [6]. Po-

nieważ najbardziej wrażliwe na wpływ zlewni są zbiorniki o długim czasie retencji wody, zbiornikom limnicznym proponuje się przyznać 3 pkt, reolimnicznym – 2 pkt, superreolimnicznym – 1 pkt.

Kolejną cechą niekorzystną w przypadku dorzecza zbiornika Solina są duże spadki terenu. W zlewni bezpośredniej występują typowe dla Bieszczad długie pasma górskie o wysokości dochodzącej do 500-750 m n.p.m., przy czym badania prowadzone od wielu lat wykazały, że zasadniczy ładunek biogenów był dostarczany do zbiornika przez główne dopływy z terenu zlewni całkowitej, a więc również z terenów wyższych partii Bieszczad [3, 12]. W znacznej części skalne, słabo przepuszczalne podłoże na obszarze zlewni charakteryzuje się ograniczoną zdolnością do zatrzymywania opadów [20]. Sprzyja to wypłukiwaniu materii skalnej i glebowej oraz ich przemieszczaniu się wraz ze spływem powierzchniowym do cieków i zbiornika.

Obszar bezodpływowy to teren w obrębie zlewni, z którego spływ powierzchniowy nie dociera do analizowanego zbiornika lub cieku zasilającego ten obiekt, lecz do małego bezodpływowego śródleśnego lub śródpolnego zbiornika, mokradła, bagna. Woda na obszary bezodpływowe jest dostarczana przez opady atmosferyczne, a odprowadzana przez parowanie. Im większa jest powierzchnia obszarów bezodpływowych w obrębie zlewni, tym mniejszy powinien być ładunek zanieczyszczeń obszarowych spływających do analizowanego obiektu. Udział obszarów bezodpływowych w zlewni zbiornika Solina oszacowano poniżej 20%.

Stosunkowo niekorzystnie wypadł również współczynnik Ohlego odzwierciedlający wielkość obszaru, z którego może być uruchomiony ładunek zanieczyszczeń obszarowych w stosunku do powierzchni samego akwenu. Cechą charakterystyczną zbiorników zaporowych jest większy (nawet kilkadziesiąt razy) stosunek powierzchni zlewni do powierzchni zbiornika w porównaniu z jeziorami, a w wyniku tego większe obciążenie związkami biogennymi [10]. O ile dużą powierzchnię zlewni w przypadku współczynnika Schindlera równoważy spora pojemność zbiornika Solina, o tyle powierzchnia obiektu nie jest znacząco duża w aspekcie jego rozległej zlewni.

W miarę korzystnie wypadły takie cechy środowiskowe zlewni, jak: gęstość sieci rzecznej, budowa geologiczna zlewni oraz sposób użytkowania terenu. Gęstość sieci rzecznej odzwierciedla możliwość przyspieszonego i bezpośredniego przemieszczania substancji organicznych i biogennych ze zlewni do zbiornika za pośrednictwem większych i mniejszych cieków. W dorzeczu górnego Sanu i Solinki większość cieków to średnie i małe potoki. Ze względu na górski charakter zlewni wszystkie te ciekę cechują nagłe wezbrania po opadach deszczu, podczas których dochodzi do wymywania materii mineralnej i organicznej z podłoża [20]. Według Płużańskiego [20] na terenie zlewni dominują gleby gliniaste z domieszką żwiru, piasku i kamieni, które według kryterium oceny (tab. 4.) powinny w umiarkowany sposób sprzyjać wymywaniu substancji. Ze względu na przeważający (>75%) udział lasów w pokryciu terenu oraz ok. 14%

łąk i pastwisk zlewnię zbiornika Solina określono jako pastwiskowo-leśną. Duże obszary leśne na terenie zlewni sprzyjają ograniczeniu transportu substancji biogennych wraz ze spływem powierzchniowym. Wielkość eksportowanych ładunków biogenów podawana w literaturze dla obszarów leśnych wynosi średnio do $0,20$ i $10,0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ (odpowiednio fosforu i azotu), podczas gdy dla obszarów użytkowanych rolniczo do $2,90$ i $26,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ (odpowiednio fosforu i azotu) [9]. Mimo że najbardziej zalesione są zlewnie Sanu i Solinki, to te duże dopływy o większej czystości mają decydujący wpływ na poziom zanieczyszczenia wód w zbiorniku (odpowiednio 67% i 21% udziału w ładunku rzeczywistym fosforu) [3].

Zagrożenie degradacją zbiornika zaporowego Solina

Porównanie wielkości obliczonego dla lat 2005-2006 ładunku rzeczywistego (L_{rz}) fosforu [4] dostarczanego ze źródeł zewnętrznych do zbiornika Solina z wielkościami ładunku dopuszczalnego ($L_{dop.}$) i niebezpiecznego ($L_{nieb.}$) wskazało na III najwyższą kategorię zagrożenia tego obiektu (tab. 10.).

W latach 2005-2006 odnotowano kilkakrotnie wyższy ładunek rzeczywisty fosforu w stosunku do ładunku niebezpiecznego docierający ze zlewni do zbiornika. Na tej podstawie stwierdzono, że obiekt jest w bardzo dużym stopniu narażony na postępujący proces degradacji, jeśli nie nastąpi aktywizacja działań ochronnych w jego zlewni. Istotnym zagrożeniem dla stanu trofii wód tego akwenu jest z pewnością nieuporządkowana gospodarka wodno-ściekowa na terenie zlewni. Podczas kontroli przeprowadzonej przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Rzeszowie w 2013 roku stwierdzono liczne nieprawidłowości, w tym wiele przypadków naruszenia warunków pozwoleń wodnoprawnych na wprowadzanie ścieków do wód na terenie zlewni zbiornika Solina, a także odprowadzania ścieków do wód powierzchniowych bez uregulowanego stanu formalnoprawnego [21]. Dopływ substancji biogennych wraz ze spływem powierzchniowym z gruntów rolnych stanowiących zaledwie kilka procent powierzchni zlewni nie powinien stanowić istotnego zagrożenia dla wód zbiornika, jednak przy niekorzystnym ukształtowaniu terenu powinien być również brany pod uwagę, podobnie jak z obszarów, na których jest prowadzony wypas zwierząt hodowlanych i eliminowany poprzez działania ochronne (tj. właściwe gospodarowanie nawozami i odpowiednią gospodarkę hodowlaną). Nie bez wpływu na jakość wód pozostają wody opadowe spływające z dróg komunikacyjnych i innych terenów utwardzonych, które zanieczyszczają ciek dopływające do zbiornika. Dlatego ważne jest zachowanie istniejących i tworzenie nowych pasów zadrzewień i zakrzewień wzdłuż dopływających do zbiornika rzek i potoków.

Tabela 10. Wielkości ładunku rzeczywistego, ładunku dopuszczalnego i niebezpiecznego fosforu (według modelu hydraulicznego Vollenweidera) oraz kategoria zagrożenia zbiornika Solina

Table 10. Amounts of real, acceptable and dangerous phosphorus loads (according to the hydraulic model by Vollenweider) and threat category of the Solina Reservoir

Rok	Ładunek rzeczywisty (\bar{L}_{rz}) $P_{całk}$ [mgP · m ² · d ⁻¹]	Ładunek rzeczywisty (\bar{L}_{rz}) średnia z 2005-2006 [mgP · m ² · d ⁻¹]	$\bar{L}_{dop.}$ [mgP · m ² · d ⁻¹]	$\bar{L}_{nieb.}$ [mgP · m ² · d ⁻¹]	Kategoria zagrożenia zbiornika
2005	9,13	9,89	1,47	2,94	III
2006	10,65				

Po zestawieniu I kategorii odporności zbiornika Solina i trzeciej grupy podatności jego zlewni na uruchamianie ładunku zanieczyszczeń uzyskano II typ układu środowiskowego zlewnia-zbiornik charakteryzujący się umiarkowanym postępowaniem procesu eutrofizacji wód (tab. 11.), przy czym niekorzystnym warunkiem panującym w zlewni przeciwstawia się wysoka naturalna odporność zbiornika zaporowego Solina na proces przeżyźnienia.

Tabela 11. Zestawienie przeprowadzonej oceny podatności na degradację zbiornika zaporowego Solina

Table 11. Summary of susceptibility assessment to degradation of the Solina Reservoir

Typ miktyczny zbiornika	Kategoria odporności na degradację	Grupa podatności zlewni	Typ układu środowiskowego zlewnia-zbiornik (postęp naturalnej eutrofizacji)	Kategoria zagrożenia zbiornika
Dymiktyczny	I	3	II (umiarkowany postęp eutrofizacji, niekorzystne warunki zlewniowe)	III $\bar{L}_{rz.} > \bar{L}_{nieb.}$

Kompleksowe badania przeprowadzone w latach 2005-2006 wykazały, że osady dennego zbiornika Solina mają głównie charakter mineralny, są zasobne w żelazo, glin i mangan, a stosunkowo ubogie w fosfor, wapń oraz substancję organiczną. Wysoka zawartość (w porównaniu z innymi zbiornikami wodnymi) żelaza, glinu i manganu w osadach dennych może mieć znaczący wpływ na retencję fosforu w depozytach ocenianego obiektu [2]. Zbiornik Solina wydaje się być bardziej odporny na procesy degradacji, nie tylko ze względu na korzystne parametry morfometryczne, ale również ze względu na skład osadów dennych.

Wysoką odporność badanego akwenu, a co za tym idzie niewielki postęp procesu eutrofizacji potwierdza przeprowadzona na podstawie wyników badań jakości wody w latach 2005-2006 ocena stanu troficznego wód zbiornika zapo-

rowego Solina. Na podstawie kryteriów stężeniowych (mineralnych i ogólnych form azotu i fosforu oraz chlorofilu „a”) oraz wartości dwóch integralnych wskaźników stanu troficznego ITS (*Index of Trophical State*) wody akwenu Solina zakwalifikowano do mezotroficznych z tendencją przejścia na początkowe stadium eutrofii [19].

Specyficzną cechą zbiorników zaporowych występującą także w przypadku zbiornika Solina są częste i duże zmiany poziomu wody, a co za tym idzie odsłanianie i zalewanie znacznych obszarów dna prowadzące do braku lub słabego rozwoju strefy litoralnej, która w jeziorach pełni rolę ochronną przed zanieczyszczeniami spływającymi ze zlewni bezpośredniej.

4. Podsumowanie i wnioski

Zbiornik Solina jest największym pod względem objętości, a także najgłębszym zbiornikiem zaporowym w Polsce położonym w urokliwym zakątku pośród niewysokich całkowicie zalesionych wzgórz. Z tego też powodu jest bardzo atrakcyjny dla turystów i wczasowiczów. Zlewnia zbiornika, rozpatrując jej naturalne cechy środowiskowe, charakteryzuje się umiarkowaną możliwością dostawy materii do akwenu. Stosunkowo dużym możliwościom uruchamiania ładu obszaru w zlewni sprzyjają: przepływowy typ bilansowy jeziora, wysoki średni spadek terenu zlewni, niski procent obszarów bezodpływowych, wysoki współczynnik Ohlego. Pokrycie rozległych terenów lasami (>75%) i w kilkunastu procentach użytkami zielonymi spowodowało zaszeregowanie jej do obszarów pastwiskowo-leśnych. Taki rodzaj pokrycia terenu charakteryzuje się hamującym oddziaływaniem na dostawę materii ze źródeł obszarowych (stanowi barierę biogeochemiczną). Pomimo niewielkiego zaludnienia tego obszaru największą presję na czystość i stan trofii wód zbiornika wydają się wywierać tereny zabudowane i zamieszkałe, a także infrastruktura rekreacyjno-turystyczna znajdujące się zwłaszcza w zlewni bezpośredniej wokół zbiornika. Z przeprowadzonej oceny parametrów morfometrycznych i hydrologicznych wynika, że zbiornik Solina cechuje się wysoką odpornością na oddziaływanie zlewni. Do parametrów w decydujący sposób wpływających na jego niezwykłą odporność na degradację należy duża głębokość, a co za tym idzie ogromna objętość wody. Przyporządkowanie do II typu układu środowiskowego zlewnia-zbiornik sugeruje, że niewielki wzrost aktywności gospodarczej w zlewni nie powinien spowodować szybkiego postępu eutrofizacji wód zbiornika Solina przy jego wysokiej naturalnej odporności. Trudno jednak przewidzieć, jak długo naturalna odporność zdoła ochronić go przed degradacją w perspektywie długoterminowej, przy założeniu znacznego rozwoju gospodarczego w jego otoczeniu i zaniechaniu działań ochronnych.

1. Zlewnia zbiornika Solina jest umiarkowanie podatna na dostawę materii organicznej i biogennej do wód akwenu. Spośród cech środowiskowych dużym

możliwościom uruchamiania ładunku zanieczyszczeń w zlewni sprzyjają przede wszystkim jej znaczna powierzchnia i ukształtowanie terenu.

2. Zbiornik zaporowy Solina charakteryzuje się wysoką naturalną odpornością na oddziaływanie zlewni. Za parametry mające decydujący wpływ na jego możliwości obronne przed degradacją należy uznać dużą głębokość obiektu i związaną z nią znaczną objętość retencjonowanej wody.
3. Zastosowany system po nieznacznej modyfikacji może być stosowany do oceny podatności na degradację zbiorników zaporowych. Uzyskany II typ układu środowiskowego zlewnia-zbiornik charakteryzujący się umiarkowanym postępem procesu eutrofizacji wód znajduje potwierdzenie w wynikach prowadzonej w ostatnich latach oceny stanu troficznego wód zbiornika zaporowego Solina.

Literatura

- [1] Bajkiewicz-Grabowska E.: Obieg materii w systemach rzeczno-jeziornych. Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2002.
- [2] Bartoszek L., Tomaszek J.A.: Relationships between phosphorus distribution and major components in the bottom sediments of the Solina-Myczkowce Reservoirs. Archives of Environmental Protection, vol. 34, no 3, 2008, pp. 151-161.
- [3] Bartoszek L., Koszelnik P., Tomaszek J.: Dynamika zmian fosforu w dopływach zbiornika solińskiego. I Kongres Inżynierii Środowiska, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, nr 11, 2002, s. 233-249.
- [4] Bartoszek L., Koszelnik P., Tomaszek J.A.: Obciążenie zewnętrzne i retencja fosforu w zbiornikach zaporowych Solina–Myczkowce. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 56, 2009, s. 5-15.
- [5] Gałczyński Ł.: Eutrofizacja wód – problem cywilizacji. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 12, 2008, s. 34-37.
- [6] Giziński A.: Środowiskowe skutki regulacji rzek. Gospodarka Wodna, nr 11, 2003, s. 470-478.
- [7] Grochowska J., Teodorowicz M.: Ocena możliwości oddziaływania zlewni na jeziora górnej Pasłęki oraz podatności tych jezior na degradację. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, vol. 5, nr 1, 2006, s. 99-111.
- [8] Gruca-Rokosz R., Tomaszek J.A.: Temperature and oxygen profiles in the Solina reservoir. Environment Protection Engineering, vol. 28, no 1, 2002, pp. 81-89.
- [9] Izydorczyk K., Frączak W., Drobnińska A., Badowska M., Zalewski M.: Zastosowanie stref ekotonowych w ograniczaniu zanieczyszczeń obszarowych, [w:] Ochrona i rekultywacja jezior, R. Wiśniewski (red.). Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń, 2010, s. 63-71.
- [10] Kajak Z.: Eutrofizacja nizinnych zbiorników zaporowych. Procesy biologiczne w ochronie i rekultywacji nizinnych zbiorników zaporowych. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1995, s. 33-41.
- [11] Kasza H.: Zbiorniki zaporowe. Znaczenie – eutrofizacja – ochrona. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2009.

- [12] Koszelnik P.: Źródła i dystrybucja pierwiastków biogennych na przykładzie Zespołu Zbiorników Zaporowych Solina-Myczkowce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [13] Kozicki Z.: Zespół Elektrowni Wodnych Solina-Myczkowce. Wydawca Agencja Paweł Janik, Zielonczyn 2011.
- [14] Krukar W.: Solina. Jezioro solińskie i jego okolica. Mapa dla każdego turysty, żeglارza i wędkarza, skala 1:25000. Wydawnictwo Ruthenus, <http://www.bieszczady.net.pl/mapasolina.php> (7 kwietnia 2014 r.).
- [15] Kudelska D., Cydzik D., Soszka H.: Wytyczne monitoringu podstawowego jezior. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1994.
- [16] Łuczyszyn J., Tomaszek J.A.: Analiza pracy oczyszczalni ścieków w Polańczyku w aspekcie ochrony zbiornika solińskiego. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 58, 2011, s. 157-170.
- [17] Mapa batymetryczna zbiornika zaporowego Solina, <http://www.city.net.pl/ptycho/grafika/sol200.jpg> (7 kwietnia 2014 r.).
- [18] Mapa podziału hydrograficznego Polski. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej – Geoportal KZGW, <http://geoportal.kzgw.gov.pl/imap/> (7 kwietnia 2014 r.).
- [19] Neverova-Dziopak E., Kowalczyk E., Bartoszek L., Koszelnik P.: Ocena stanu troficznego zbiornika zaporowego Solina. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, vol. 58, nr 2, 2011, s. 197-208.
- [20] Płuzański A.: Nutrient loads in small mountain watersheds of the Solina reservoir. *Ekol. Pol.*, no 38, 1990, pp. 337-354.
- [21] Raport z realizacji wojewódzkiego cyklu kontrolnego pt. „Ochrona wód Zbiornika Solina przed zanieczyszczeniami”. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Rzeszowie, Rzeszów 2013.
- [22] Skiba W.: San. Ocena stanu i jakości wód płynących oraz zbiornika zaporowego Solina, www.biblioteka.sanok.pl/www/pdf/sanocena.pdf (7 kwietnia 2014 r.).
- [23] Starmach K., Wróbel S., Pasternak K.: *Hydrobiologia. Limnologia*. PWN, Warszawa 1976.
- [24] Traczewska T.M.: Problemy ekologiczne zbiorników retencyjnych w aspekcie ich wielofunkcyjności. *European Symposium Anti-Flood Defences – Today's Problems*, Paris – Orleans 2012.
- [25] Zimoch I.: Symulacja wpływu oczyszczalni ścieków w Myślenicach na eutrofizację wód zbiornika Dobczyce. *Ochrona Środowiska*, vol. 81, nr 2, 2001, s. 21-24.

THE SUSCEPTIBILITY OF THE SOLINA DAM RESERVOIR TO DEGRADATION

Summary

The paper aims to assess the susceptibility of the Solina dam reservoir to degradation. Following the assessment of morphometric and hydrological parameters, the Solina reservoir situated on the River San was qualified as the first category level as for its resistance to degradation. The very fact of falling into this category proves the Solina reservoir immune to the impact of its catchment area. The parameters of the object such as the average depth, the

percentage of water stratification, the ratio of the active bottom surface to the epilimnion volume and the Schindler coefficient have a decisive influence on its resistance to degradation. Following the results of the environmental analysis the Solina reservoir catchment was verified as the third group of susceptibility. Flow balance type of the lake, the high average catchment slope, low percentage of landlocked areas as well as the high Ohle coefficient encourage relatively high activation of the area load in the catchment. The actual phosphorus load, which was several times greater than the dangerous load, reached the reservoir in 2005-2006. On these grounds it was found that the object is highly exposed to the progressive degradation process unless protective actions are taken in its catchment area. When the first category of the Solina reservoir resilience was correlated with the third group of its catchment susceptibility to mobilisation of the pollutant load, the second type of the environmental system 'catchment-reservoir' was obtained. Its key feature is a moderate progress of the water eutrophication process. Unfavourable conditions of the catchment are balanced by high natural resistance of the Solina dam reservoir to the degradation process.

Keywords: resilience to degradation, impact of catchment, threat category, type of the environmental system

Przesłano do redakcji: 31.07.2014 r.

Przyjęto do druku: 02.12.2014 r.

DOI:10.7862/rb.2014.125

