



Zmiany wartości wskaźników jakości wody wraz z głębokością przy ujęciu wody pitnej ze zbiornika Dobczyce

*Andrzej Bogdał, Agnieszka Policht-Latawiec, Sabina Kołdras
Uniwersytet Rolniczy, Kraków*

1. Wstęp

Niezwykle istotnym problemem na całym świecie jest zła jakość wód powierzchniowych przeznaczonych do spożycia. Duże ich zanieczyszczenie powoduje znaczną śmiertelność, szczególnie wśród dzieci poniżej piątego roku życia [13]. Państwa położone nad największymi rzekami (północne Chiny, środkowe i wschodnie Stany Zjednoczone, obszary graniczne Indii i Pakistanu) mają ograniczoną możliwość wykorzystania wód powierzchniowych do picia ze względu na ich złą jakość [20]. O tym, że istniejący problem jest poważny, świadczy podpisana w 2000 roku Deklaracja Milenijna Organizacji Narodów Zjednoczonych. Państwa członkowskie, w tym również Polska, zobowiązały się do 2015 roku spełnić 8 założonych w deklaracji celów (The Millennium Development Goals). Jeden z nich dotyczy ochrony środowiska naturalnego i zapewnienia obywatelom stałego dostępu do czystej wody pitnej.

Zbiorniki wodne sprzyjają polepszeniu klarowności wody, a także poprawie niektórych cech chemicznych wody, co w technologii uzdatniania wody jest bardzo ważne. Spełniają one również rolę urządzeń do wstępnego oczyszczania wody oraz zmniejszają zakres wahań wartości wskaźników jakości w stosunku do wody pobieranej bezpośrednio z rzeki. Natomiast do wad magazynowania wody w zbiornikach należy zaliczyć rozmnażanie się glonów oraz organizmów planktonowych, szczególnie w przypadkach dużej koncentracji azotanów i fosforanów co po-

woduje, że uzdatnianie takiej wody jest bardziej skomplikowane [7, 14, 15]. Holendrzy Breemen i in. [2] zaproponowali wybudowanie zbiornika wstępnego powyżej zbiornika głównego, co w założeniu miało ograniczyć rozwój mikroorganizmów chorobotwórczych. Jak się okazało, ze względu na około 6 tygodniowy okres przeżywalności bakterii fekalnych, zbiornik ten nie spełnił zamierzonej funkcji, gdyż czas retencjonowania w nim wody był za krótki. Zatem usuwanie patogenów przez zbiornik wstępny okazało się w tym przypadku działaniem nieefektywnym. Tym bardziej, że Autorzy ci wskazują na istnienie wewnętrznych źródeł bakterii fekalnych występujących w odchodach ptactwa wodnego bytującego w obrębie zbiornika [2]. Substancje biogenne będące wskaźnikami jakościowymi wód powierzchniowych wykorzystywanych do zaopatrzenia ludności w wodę do spożycia, zaburzają naturalną równowagę i wpływają na nadmierny przyrost biomasy [12], co w konsekwencji prowadzi do eutrofizacji zbiorników wodnych [3, 5, 6, 10].

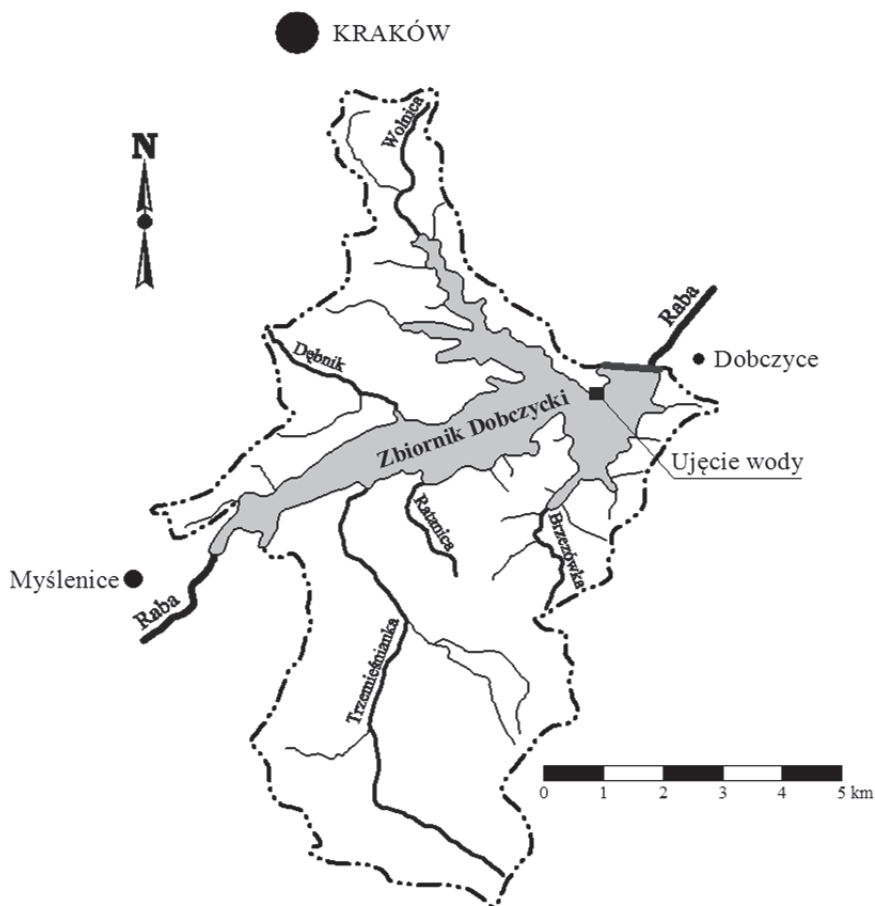
Zmiany stratyfikacji oraz cyrkulacji zachodzącej w ciągu roku, zróżnicowanie temperatur wody w przekroju pionowym i poziomym wpływa na wystąpienie zależnych od temperatury gradientów, spośród których można oprócz natlenienia wód zbiornika, wymienić także: odczyn wody, intensywność występujących w zbiorniku procesów biochemicznych czy zróżnicowanie stężeń soli mineralnych. Ponadto od dopływu ze zlewni zależy w dużej mierze zawartość substancji biogennych, których stężenia również kształtowane są przez procesy fizykochemiczne i biologiczne zachodzące w zbiorniku. Dlatego też, ważną rolę w ocenie jakości wody retencjonowanej odgrywa stały monitoring obejmujący szerokie spektrum zmian zachodzących na terenach bezpośrednio przylegających do zbiornika oraz wpływających na jakość wód dopływów zasilających zbiornik [9]. Na zmianę cech i skład chemiczny, a zatem na jakość wody w zbiorniku, może wpływać wiele czynników zależnych od uwarunkowań technologicznych i konstrukcyjnych [22], takich jak: głębokość i czas przebywania wody w zbiorniku, częstość i zakres wahań zwierciadła wody, pora roku i stan pogody, sposób eksploatacji zbiornika, przepływ wody przez zbiornik gwarantujący dobre jej mieszanie i pełną wymianę itp.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz porównawczych i statystycznych dotyczących zmian wartości wskaźników jakości wody wraz z głębokością na ujęciu wody pitnej ze zbiornika Dobczyce. Ponad-

to przeanalizowano zmienność sezonową badanych wskaźników oraz oceniono jakość i walory użytkowe wody.

2. Charakterystyka zbiornika Dobczyckiego i ujęcia wody

Zalew Dobczycki jest podgórskim zbiornikiem zaporowym o długości 12 km i średniej szerokości 1,0 km. Jest on położony 20 km na południe od Krakowa w województwie małopolskim, w powiecie myślenickim (rys. 1).



Rys. 1. Zbiornik zaporowy Dobczyce wraz z lokalizacją ujęcia wody
Fig. 1. Dobczyce reservoir with the water intake location

Zapora ziemna zbiornika jest usytuowana w 60,1 km rzeki Raby. Całkowita jego pojemność wynosi 137,9 mln m³, wyrównawcza 88,9 mln m³, a martwa 23,2 mln m³. Przy normalnym piętrzeniu na poziomie 269,9 m n.p.m., powierzchnia zalewu wynosi 915 ha, a pojemność zbiornika 112,1 mln m³ i średnia głębokość 10,2 m. Minimalne i maksymalne piętrzenie jest ustalone odpowiednio na poziomie 256,7 i 272,6 m n.p.m. Średnioroczny przepływ w przekroju Dobczyc wynosi 10,6 m³·s⁻¹, nienaruszalny 1,25 m³·s⁻¹, zaś miarodajny (Q_{0,3%}) 1560 m³·s⁻¹. Przy średnim dopływie, woda w zbiorniku wymienia się około 3 razy w roku. Ze względu na wartość współczynnika Schindlera – 6,9, który jest miarą wpływu otoczenia na jakość gromadzonej wody, zbiornik Dobczycki jest średnio podatny na degradację (II kategoria podatności).

Zlewnia Zbiornika Dobczyckiego o powierzchni około 768 km², w górnym biegu rzeki Raby położona jest na terenie Gorców, Beskidu Wyspowego i Średniego, a w dolnej części znajduje się na obszarze Pogórza Wielickiego i Wiśnickiego [8]. Pod względem geologicznym obszar Zbiornika oraz jego bezpośrednie otoczenie, znajdują się w obrębie Zachodnich Karpat Fliszowych. Teren ten charakteryzuje się płaszczowinowym stylem tektoniki, natomiast podłoże utworów fliszowych utworzone jest z serii naprzemianległych ławic piaskowców, łupków wapnistych i ilastych oraz zlepieńców, które uległy sfałdowaniu i przemieszczeniu ku północy. Zróżnicowanie ukształtowania terenów przyległych do zbiornika i całej jego zlewni, a także warunków geologicznych i glebowych znajduje swoje odzwierciedlenie w strukturze użytkowania gruntów. W zlewni tereny rolnicze stanowią około 50% całkowitej powierzchni, zaś lasy ponad 44%. W strukturze użytków rolnych, grunty orne zajmują kilka razy większą powierzchnię niż użytki zielone. Użytkowanie rolnicze jest więc niedostosowane do warunków topograficznych i przyrodniczych regionu, ponieważ dużo jest gruntów ornych, a zbyt mało użytków zielonych, co potęguje procesy erozji wodnej gleb. Łąki stanowią jeden z dominujących elementów krajobrazu terenów przyległych do zbiornika, a ich powstawanie oraz utrzymanie jest ściśle związane z działalnością człowieka i zmienia się wraz ze strukturą zatrudnienia oraz stosowanymi technikami agrarnymi. Osadnictwo w dorzeczu Raby jest typowym przykładem koncentracji zabudowy komunalnej, przemysłowej i technicznej wzdłuż rzek, dlatego obszary te mogą stanowić poważne źródło zanieczyszczenia wód ściekami komunalnymi

lub wodami odpływającymi z licznych oczyszczalni ścieków. Zagospodarowanie oraz użytkowanie terenów w najbliższym otoczeniu zbiornika, jest podporządkowane ściśle określonym regułom opracowanym dla wyznaczonych stref ochrony.

Zbiornik Dobczycki jest rezerwuarem wody wodociągowej, z której dla potrzeb mieszkańców Krakowa Zakład Uzdatniania Wody Raba jest w stanie dostarczyć 196,0 tys. m³ wody na dobę. Dlatego też w celu ochrony jakości retencjonowanych wód, zbiornik nie jest udostępniony do rekreacji, jednak prowadzona jest na nim celowa gospodarka rybacka [21]. Woda surowa pobierana jest ze Zbiornika Dobczyckiego na ujęciu wieżowym (rys. 1), które umożliwia pobór wody z trzech poziomów głębokości. Rzeczywisty pobór wody przez ujęcie wynosi około 1,0 m³·s⁻¹, gwarantowany 2,5 m³·s⁻¹, a dopuszczalny 5,5 m³·s⁻¹. Właściwości fizykochemiczne oraz biologiczne wody retencjonowanej w zbiorniku rzutują na technologię i koszty jej uzdatniania oraz na parametry jakościowe wody zdanej do picia. Na podstawie analiz wskaźników fizykochemicznych oraz hydrobiologicznych, woda pobierana jest z poziomu o najlepszej jakości, poprzez zasłonięcie pozostałych dwóch okien wlotowych dla danej pompy. Dzięki zastosowaniu pomp diagonalnych woda pompowana jest dwoma rurociągami na Zakład Uzdatniania Wody Raba [11].

3. Materiał i metody badań

Badaniami prowadzonymi w 2008 i 2009 roku objęto wybrane wskaźniki fizykochemiczne wody: temperaturę, odczyn (pH), mętność, przewodność elektrolityczną, zawiesinę ogólną, tlen rozpuszczony, stopień nasycenia wody tlenem, krzemionkę, fosforany, fosfor ogólny, a także jeden indykator biologiczny – chlorofil „a”. W odstępach tygodniowych, z trzech poziomów głębokościowych pobierano próbki wody do analiz laboratoryjnych bezpośrednio ze Zbiornika Dobczyckiego przy ujęciu wieżowym wody dla Krakowa (rys. 1). Pierwszy poziom (3,55 m poniżej lustra wody) odpowiada strefie wody dobrze nasłonecznionej, w której najczęściej obserwuje się bujny rozwój fitoplanktonu w okresie wegetacyjnym. Drugi poziom (9,65 m) o miąższości kilku metrów to metalimnion, czyli przejściowa warstwa wody pomiędzy epilimnionem a hipolimnionem, gdzie w okresie stagnacji letniej może następować gwałtowny spadek temperatury wraz z głębokością, a w okresie stagnacji

zimowej – jej podwyższenie. Trzeci poziom (15,87 m) odpowiadający hipolimnionowi charakteryzuje się tym, że nie dociera do jego wód światło słoneczne. Dzięki możliwości zastosowania trzech różnych poziomów ujmowania wody istnieje możliwość poboru tej o najlepszych parametrach jakościowych [23]. Analizy wykonano w Laboratorium Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji S.A. w Krakowie zgodnie z normami: PN-90/C-04540/01, PN-EN 25813:1997, PN-EN 27888:1999, PN-EN 25663:2001, PN-ISO 5667-4:2003, PN-EN ISO 6878:2006.

Bazę danych empirycznych poddano analizom porównawczym i statystycznym. Dla każdego badanego wskaźnika obliczono w podziale na okres pozawegetacyjny (X–III) i wegetacyjny (IV–IX) oraz rok kalendarzowy (I–XII), średnie wartości z 2008 i 2009 r. oraz z lat badań 2008–2009. Istotność statystyczną różnic pomiędzy odnotowanymi na różnych poziomach głębokości zbiornika wartościami badanych wskaźników, oszacowano nieparametrycznym testem U Manna-Whitney’a, na poziomie $\alpha = 0,05$. Do analiz statystycznych wybrano właśnie ten test, ponieważ w wielu porównywanych grupach danych nie stwierdzono normalności rozkładów (testem W Shapiro-Wilka) lub jednorodności wariancji (testem Browna-Forsythe’a), co wykluczyło możliwość zastosowania testów parametrycznych typu ANOVA lub t-Studenta. Dla wszystkich badanych wskaźników wykonano wykresy typu ramka-wąsy, na których sugestywnie przedstawiono medianę, wartości ekstremalne i percentyle 10–90%. Ocenę przydatności wód Zbiornika Dobczyckiego do zaopatrzenia ludności w celach spożywczych, wykonano zgodnie z metodyką zamieszczoną w Rozporządzeniu MŚ [17]. Wybrane parametry jakościowe badanej wody skonfrontowano również z wymogami zapisanymi w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [19]. Na podstawie stężeń fosforu ogólnego i chlorofilu *a*, wykorzystując kryteria podane przez OECD [4] oceniono stan troficzny Zbiornika Dobczyckiego.

4. Wyniki badań

W okresie badawczym 2008–2009 średnie roczne temperatury wody i wartości pH zmniejszały się wraz z głębokością – odpowiednio od 12,6 do 10,8°C i od 8,12 do 7,86. Identyczne relacje pomiędzy prze-

ciętnymi wartościami tych dwóch wskaźników fizycznych odnotowano również w poszczególnych latach, jednak w roku 2009 temperatura wody na wszystkich poziomach była wyższa w stosunku do roku poprzedniego, zaś wartości pH uległy obniżeniu (tab. 1). Największą i najmniejszą wartość pH (7,39 i 9,84) stwierdzono na poziomie 3. (rys. 2), co odpowiada odczynowi lekko oraz silnie zasadowemu. Średnio większe wartości obu wskaźników fizycznych notowano w okresie wegetacyjnym, na co wpływ miały w przypadku termiki wody wyższe temperatury powietrza, a w odniesieniu do pH większe nasilenie procesów erozyjnych w zlewni.

W poszczególnych latach i w całym okresie badawczym mętność wody wzrastała wraz z głębokością, średnio od 3,18 do 4,71 NTU. Były to więc wartości dużo większe od dopuszczalnego normatywu dla wód przeznaczonych do bezpośredniego spożycia przez ludzi – 1 NTU [19]. W przypadku próbek pobranych z 2. i 3. poziomu większą mętność odnotowano w okresie wegetacyjnym, natomiast na poziomie 1. w okresie pozawegetacyjnym. Tak duże wartości nie są odosobnione, ponieważ Bergel i in. [1] podają, że w wodociągach korzystających z ujęć wód powierzchniowych jest średnio najwięcej przekroczeń mętności dopuszczalnej (29,3%), a znacznie mniej w wodociągach korzystających z ujęć wód podziemnych (12,4%) i ujęć mieszanych (4,1%). Duża mętność w istotny sposób wpływa na skuteczność oczyszczania wody oraz zwiększa koszty koagulacji, filtracji, wymiany jonowej czy procesów membranowych. Cząstki powodujące mętność wody mogą zmniejszyć skuteczność jej dezynfekcji, chroniąc mikroorganizmy przed działaniem środka dezynfekującego i pobudzając tym samym wzrost bakterii [16].

Wartości przewodności elektrolitycznej były w wodach na poszczególnych poziomach zbiornika bardzo podobne i nie przekroczyły w 2008 i 2009 roku odpowiednio 303 i 305 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Średnio w okresie badawczym przewodność wody wyniosła 260–264 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, a wartości te były ponad 2-krotnie mniejsze od normatywu I klasy potencjału ekologicznego tj. 600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ [18], co świadczy o małym zasoleniu wód. W roku 2008 większe wartości notowano w sezonie wegetacyjnym, a w 2009 w okresie pozawegetacyjnym (tab. 1).

Tabela 1. Średnie wartości i stężenia wskaźników jakości wody Zbiornika Dobczyce
Table 1. Average values and concentration of water quality indicators Dobczyce reservoir

Wskaźniki jakości	Nr poziomu głębokości wody	Średnie arytmetyczne wartości w latach i sezonach											
		2008			2009			2008–2009					
		I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX
Temperatura [°C]	1 – 3,55 m	12,4	7,7	17,8	12,7	7,4	18,0	12,6	7,5	17,9			
	2 – 9,65 m	11,9	7,3	16,6	12,2	7,5	16,6	12,0	7,4	16,6			
	3 – 15,87 m	10,5	7,5	13,9	11,2	8,1	14,2	10,8	7,8	14,0			
pH [–]	1	8,16	7,97	8,37	8,09	7,87	8,31	8,12	7,92	8,33			
	2	8,05	7,97	8,14	7,90	7,87	7,93	7,98	7,92	8,03			
	3	7,97	7,97	7,98	7,75	7,85	7,65	7,86	7,91	7,81			
Mętność [NTU]	1	3,30	3,77	2,76	3,07	3,12	3,02	3,18	3,45	2,89			
	2	4,17	3,98	4,36	3,44	3,04	3,80	3,79	3,51	4,07			
	3	5,36	4,47	6,33	4,07	3,26	4,87	4,71	3,88	5,59			
Przewodność elektrolityczna [μS·cm ⁻¹]	1	272	266	281	251	273	229	260	269	250			
	2	271	265	281	254	275	235	262	270	253			
	3	270	266	277	258	278	238	264	271	254			
Zawiesiny ogólne [mg·dm ⁻³]	1	2,3	2,5	2,2	2,5	2,0	3,1	2,4	2,2	2,7			
	2	3,3	3,5	3,1	2,5	1,9	3,0	2,8	2,6	3,0			
	3	4,2	3,3	4,8	3,1	2,1	4,1	3,5	2,5	4,4			
Tlen rozpuszczony [mg O ₂ ·dm ⁻³]	1	8,93	10,61	7,01	10,58	11,37	9,79	9,77	10,98	8,47			
	2	8,42	10,53	6,21	9,66	11,00	8,43	9,06	10,77	7,39			
	3	7,78	10,29	5,03	8,58	10,34	6,82	8,18	10,31	5,98			

Tabela 1. cd.
Table 1. cont.

Wskaźniki jakości	Nr poziomu głębokości wody	Średnie arytmetyczne wartości w latach i sezonach											
		2008			2009			2008–2009					
		I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX	X–III	IV–IX	
Nasylenie wody tlenem [%]	1 – 3,55 m	88	99	75	106	106	107	97	103	91			
	2 – 9,65 m	82	98	66	96	104	90	89	101	78			
	3 – 15,87 m	75	96	51	83	100	69	79	98	60			
Krzemionka [mg SiO ₂ ·dm ⁻³]	1	3,1	4,1	1,8	4,2	4,7	3,8	3,6	4,4	2,8			
	2	2,9	4,0	1,8	4,3	4,5	4,0	3,6	4,3	3,0			
	3	3,2	4,2	2,3	4,6	4,4	4,8	3,9	4,3	3,6			
Fosforany [mg PO ₄ ·dm ⁻³]	1	0,036	0,047	0,024	0,045	0,055	0,035	0,041	0,051	0,030			
	2	0,039	0,045	0,032	0,049	0,052	0,045	0,044	0,049	0,039			
	3	0,042	0,047	0,036	0,062	0,051	0,063	0,052	0,054	0,050			
Fosfor ogólny [mg P·dm ⁻³]	1	0,014	0,018	0,010	0,020	0,024	0,016	0,017	0,021	0,013			
	2	0,016	0,016	0,017	0,021	0,022	0,021	0,019	0,019	0,019			
	3	0,016	0,016	0,015	0,027	0,025	0,028	0,021	0,020	0,022			
Chlorofil „a” [µg·dm ⁻³]	1	7,11	8,32	5,73	6,62	4,65	8,33	6,87	6,65	7,09			
	2	6,21	7,78	4,58	4,17	2,71	5,35	5,19	5,41	4,99			
	3	4,92	6,41	3,30	2,08	2,32	1,88	3,55	4,55	2,58			

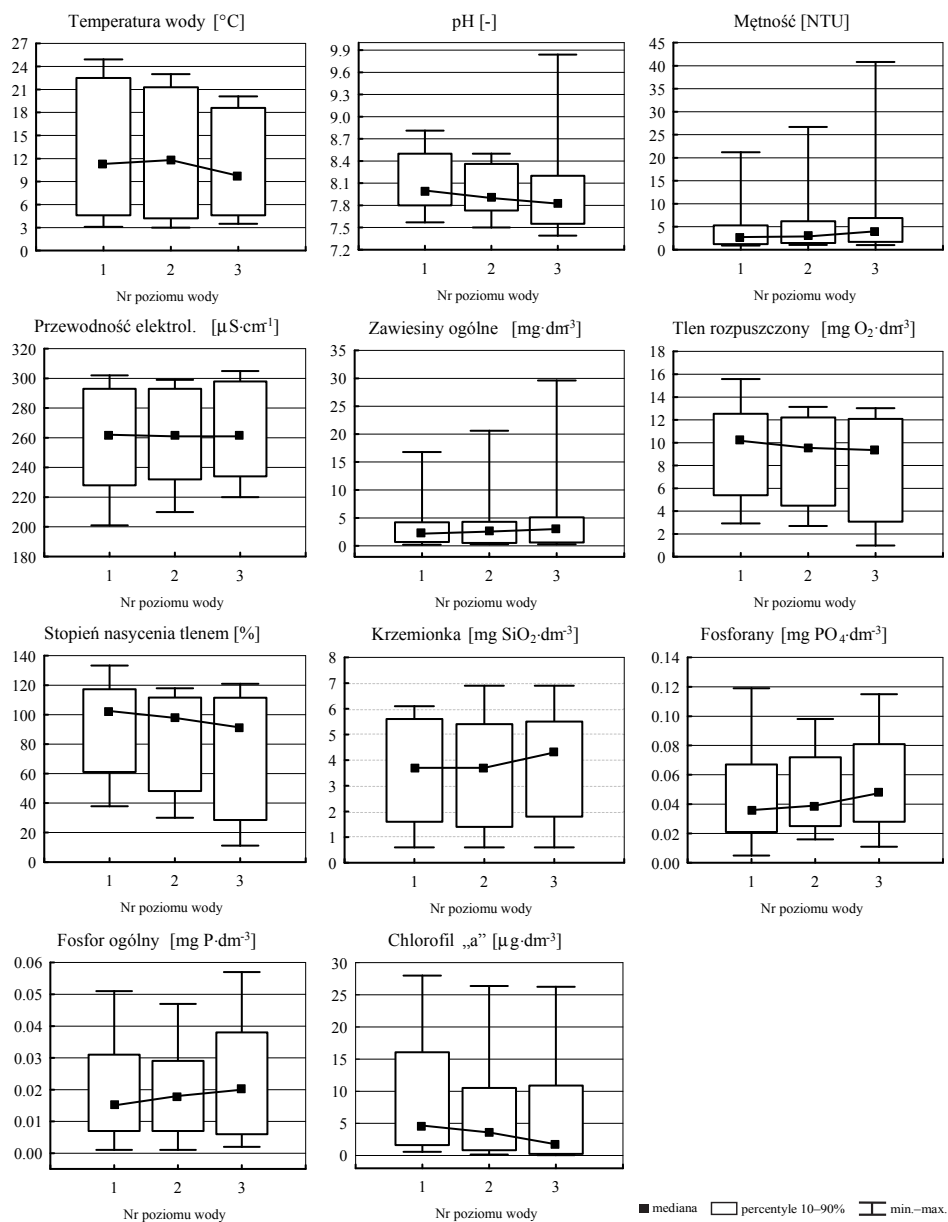
W okresie badań średnie stężenia zawiesiny ogólnej kształtowały się na dość niskim poziomie – w roku 2008 na 1., 2., i 3. poziomie głębokości wynosiły odpowiednio 2,3, 3,3 i 4,2 mg·dm⁻³ oraz 2,5, 2,5 i 3,1 mg·dm⁻³ w 2009 r. Zatem wystąpił w przypadku tego wskaźnika wzrost stężeń wraz z głębokością (tab. 1, rys. 2). W poszczególnych latach nie odnotowano jednoznacznych prawidłowości jeśli chodzi o zmiany sezonowe stężeń zawiesiny ogólnej, natomiast w latach 2008–2009 przeciętnie większe wartości stwierdzono w okresie pozawegetacyjnym (tab. 1).

Woda w zbiorniku charakteryzowała się w okresie badań bardzo zmiennymi warunkami tlenowymi, ponieważ stężenia tlenu rozpuszczonego oraz wartości nasycenia tlenem zmieniały się na kolejnych poziomach głębokości w szerokim zakresie, odpowiednio 2,92–15,59, 2,69–13,15 i 0,98–13,03 mg O₂·dm⁻³ oraz 38–133, 30–118 i 11–121% (rys. 2).

Średnie wartości obu wskaźników tlenowych malały wraz z głębokością od 9,77 do 8,18 mg O₂·dm⁻³ i od 97 do 79%. Dużo większe stężenia tlenu rozpuszczonego i wartości nasycenia wody tlenem notowano w okresie pozawegetacyjnym (tab. 1), na co wpływ miały niższe temperatury powodujące wzrost rozpuszczalności tlenu w wodzie.

Krzemionka występująca w wodzie powierzchniowej poddawanej procesom uzdatniania, może być przyczyną niskiej efektywności węgla aktywnego w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych [24]. W przypadku wody retencjonowanej w Zbiorniku Dobczyckim, w roku 2008 średnie stężenia krzemionki zawierały się w granicach 2,9–3,2 mg SiO₂·dm⁻³, w roku 2009 zmieniały się w zakresie 4,2–4,6 mg SiO₂·dm⁻³, a w całym okresie prowadzenia badań mieściły się w przedziale od 3,6 do 3,9 mg SiO₂·dm⁻³. Nie zaobserwowano konkretnych trendów zmian zawartości krzemionki w wodzie wraz z głębokością zbiornika, natomiast generalnie większe stężenia notowano w okresie pozawegetacyjnym (tab. 1).

Stężenia fosforanów rozpuszczonych w wodzie były w okresie prowadzonych badań nieduże i na kolejnych poziomach głębokości zawierały się odpowiednio w granicach 0,005–0,119, 0,016–0,098 i 0,011–0,015 mg PO₄³⁻·dm⁻³ (rys. 2). Generalnie wraz z głębokością średnie zawartości PO₄³⁻ wzrastały – w 2008 rok od wartości 0,036 do 0,042 mg PO₄³⁻·dm⁻³, a w 2009 r. od 0,045 do 0,062 mg PO₄³⁻·dm⁻³. Stwierdzono również, że przeciętnie większe stężenia wystąpiły w okresie pozawegetacyjnym (tab. 1).



Rys. 2. Statystyki opisowe wartości badanych wskaźników jakości wody w zbiorniku Dobczyce w latach 2008–2009

Fig. 2. Descriptive statistics values examined indicators of quality water reservoir Dobczyce in 2008–2009

W okresie badań notowano dość niskie stężenia fosforu ogólnego, ponieważ średnie wartości w zakresie od 0,017 do 0,021 mg P·dm⁻³ oraz maksymalne w granicach 0,047–0,051 mg P·dm⁻³, nie przekroczyły dopuszczalnego normatywu dla wód I klasy potencjału ekologicznego tj. 0,09 mg P·dm⁻³ [18]. W przypadku tego wskaźnika, średnie roczne stężenia wzrastały wraz z głębokością, natomiast nie odnotowano jednoznacznej tendencji zmian sezonowych (tab. 1, rys. 2).

W przypadku chlorofilu „a” średnie roczne i sezonowe stężenia malały wraz z głębokością zbiornika, zarówno w okresie badań oraz w poszczególnych latach. Przeciętne wartości w latach 2008–2009 oraz w roku 2008 były większe w okresie pozawegetacyjnym, natomiast odwrotną tendencję odnotowano w 2009 roku na najgłębszym poziomie zbiornika (tab. 1). Średnie roczne koncentracje chlorofilu w 2009 roku (kolejno 6,62, 4,17 i 2,08 µg·dm⁻³) nie przekroczyły wartości granicznej I klasy potencjału ekologicznego, która w przypadku zbiorników stratyfikowanych o współczynniku Schindlera > 2 wynosi 7 µg·dm⁻³ [18]. Również średnie z okresu badań, w kolejnych poziomach głębokości (6,87, 5,19 i 3,55 µg·dm⁻³) spełniały wymogi maksymalnego potencjału ekologicznego. Jedynie woda z 1. poziomu cechowała się dobrym potencjałem ekologicznym (tab. 1).

Analiza statystyczna wykonana nieparametrycznym testem U Manna-Whitney’a wykazała, że woda z poziomu 1. w stosunku do 2. miała statystycznie istotnie większe wartości pH i nasycenia tlenem oraz stężenia chlorofilu „a”. Podobna relacja dotycząca tych samych trzech wskaźników wystąpiła w przypadku wód pobranych z poziomu 2. i 3, przy czym dodatkowo istotnie mniejsze wartości mętności, zawiesiny ogólnej i fosforanów odnotowano na głębokości środkowej. Najbardziej różniły się parametry wody pomiędzy najwyższym i najniższym poziomem głębokości wody w zbiorniku, ponieważ w 8 z 12 testowanych wskaźników różnice okazały się istotne: na poziomie 3. woda miała niższe pH, zawierała mniej tlenu rozpuszczonego oraz chlorofilu „a” i była w mniejszym stopniu nasycona tlenem, ponadto charakteryzowała się większą mętnością oraz zawierała większe ilości zawiesiny ogólnej, fosforanów i fosforu ogólnego (tab. 2, rys. 2).

Tabela 2. Porównanie wartości wskaźników jakości pomiędzy poziomami wody w Zbiorniku Dobczyce
Table 2. Comparison of quality indicators values between the levels of water in Dobczyce reservoir

Wskaźniki jakości	Jednostka	Mediany wartości wskaźników na poziomach głębokości wody			Wartość testu U Manna-Whitney'a (<i>U</i>) oraz prawdopodobieństwo testowe (<i>p</i>) w wariantach					
		Poziom 1	Poziom 2	Poziom 3	Poziom 1–2		Poziom 2–3		Poziom 1–3	
					<i>U</i>	<i>p</i>	<i>U</i>	<i>p</i>	<i>U</i>	<i>p</i>
Temperatura	°C	11,3	11,8	9,8	4192	0,55	4079	0,31	3659	0,14
pH	–	8,00	7,90	7,83	3173	0,00	3031	0,00	1976	0,00
Mętność	NTU	2,75	2,90	3,99	3946	0,21	3341	0,00	2676	0,00
Przewodność elektrolityczna	μS·cm ⁻¹	262	261	261	3804	0,85	3817	0,78	3526	0,69
Zawiesiny ogólne	mg·dm ⁻³	2,2	2,6	3,0	3409	0,32	2695	0,01	2250	0,00
Tlen rozpuszczony	mg O ₂ ·dm ⁻³	10,16	9,55	9,35	3844	0,13	3909	0,14	3206	0,01
Nasylenie wody tlenem	%	102	98	91	3181	0,01	3433	0,04	2481	0,00
Krzemionka	mg SiO ₂ ·dm ⁻³	3,7	3,7	4,3	4351	0,87	3832	0,09	3702	0,18
Fosforany	mg PO ₄ ·dm ⁻³	0,036	0,039	0,048	3803	0,10	3339	0,00	2750	0,00
Fosfor ogólny	mg P·dm ⁻³	0,015	0,018	0,020	3762	0,08	4206	0,50	3413	0,03
Chlorofil „a”	μg·dm ⁻³	4,66	3,61	1,75	3302	0,02	2858	0,00	1929	0,00

Pogrubiona czcionka oznacza statystycznie istotne różnice między wartościami dla $\alpha = 0,05$

Wykonana na podstawie sześciu badanych wskaźników uwzględnianych w Rozporządzeniu MŚ [18] ocena przydatności do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia wykazała, że ze względu na temperaturę, zawiesinę ogólną, przewodność elektrolityczną i fosforany woda Zbiornika Dobczyckiego kwalifikowała się na wszystkich poziomach głębokości do kategorii A1 (tab. 3) tj. do wód wymagającej prostego uzdatniania fizycznego. Natomiast na 1. poziomie walory użytkowe w miesiącach okresu wegetacyjnego obu lat badań obniżały wartości pH, które pozwoliły zakwalifikować wodę do kategorii A2 – woda wymagająca typowego uzdatniania fizycznego i chemicznego. Niskie nasycenie tlenem na dwóch pierwszych poziomach głębokości w sezonie wegetacyjnym 2008 r. spowodowało, że woda musiała być poddana wysokosprawnemu uzdatnieniu fizycznemu i chemicznemu, właściwemu dla wód kategorii A3. Z tych samych względów woda z poziomu 3. nie spełniała wymagań dla wód powierzchniowych wykorzystywanych do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia.

Zakresy wartości przewodności elektrolitycznej odnotowane na kolejnych poziomach głębokości zbiornika wyniosły odpowiednio: 201–302, 210–299 i 220–305 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (rys. 2), a więc nie przekroczyły wartości dopuszczalnej dla wód przeznaczonych do bezpośredniego spożycia przez ludzi – 2500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ [19]. Za wyjątkiem próbki pobranej we wrześniu 2008 r. z 3. poziomu głębokości, badane wody miały pH mieszczące się w dopuszczalnym zakresie wartości tj. 6,5–9,5 [19]. Na każdym poziomie głębokości mętność wody w prawie wszystkich pobranych w okresie badawczym próbkach (rys. 2) przekraczała dopuszczalną wartość 1 NTU [19] – wyjątkiem była jedna próbka pobrana w czerwcu 2008 r. z poziomu 1., w której odnotowano mętność wody na poziomie 0,92 NTU.

Wykorzystując kryteria troficznosci podane przez OECD [4], na podstawie średnich stężeń fosforu ogólnego, które wyniosły dla kolejnych poziomów głębokości odpowiednio 0,017, 0,019 i 0,021 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, można uznać wody Zbiornika Dobczyckiego za mezotroficzne. Potwierdzają to również średnie koncentracje chlorofilu „a” – odpowiednio 6,87, 5,19 i 3,55 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-1}$, natomiast maksymalne stężenia tego wskaźnika jakościowego (odpowiednio 27,97, 26,35 i 26,23 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-1}$) spełniają tylko wymogi stawiane wodzie eutroficznej (tab. 1, rys. 2).

Tabela 3. Ocena przydatności wód powierzchniowych Zbiornika Dobczyce do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia

Table 3. Evaluation of surface water reservoir suitability of Dobczyce population to supply water intended for drinking water

Wskaźniki jakości	Nr poziomu głębokości wody	Kategorie* wód w latach (I–XII) oraz miesiącach okresu pozawegatyjnego (X–III) i wegetacyjnego (IV–IX)								
		2008			2009			2008–2009		
		I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX	I–XII	X–III	IV–IX
Temperatura	1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
pH	1	A1	A1	A2	A2	A1	A2	A1	A1	A2
	2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
Zawiesiny ogólne	1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
Przewodność elektrolityczna	1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
Nasycenie wody tlenem	1	A3	A2	A3	A1	A1	A1	A2	A1	A2
	2	A3	A2	A3	A1	A1	A1	A3	A1	A3
	3	NON	A3	NON	A3	A1	NON	NON	A1	NON
Fosforany	1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1

* kategorie wód według Rozporządzenia MŚ [17]

A1	woda wymagająca prostego uzdatniania fizycznego
A2	woda wymagająca typowego uzdatniania fizycznego i chemicznego
A3	woda wymagająca wysokosprawnego uzdatniania fizycznego i chemicznego
NON	woda nie spełniająca wymagań normowych

5. Wnioski

Na podstawie analizy danych hydrochemicznych dotyczących Zbiornika Dobczyckiego, można sformułować następujące wnioski:

1. W profilu pionowym malały średnie roczne wartości temperatury wody, pH, nasycenia wody tlenem oraz stężenia tlenu rozpuszczonego i chlorofilu „a”. Natomiast wraz z głębokością wzrastała mętność i przewodność elektrolityczna oraz stężenia zawiesiny ogólnej, fosforanów i fosforu ogólnego.
2. Wyraźny i statystycznie istotny trend malejący wartości wskaźników wraz z głębokością zbiornika stwierdzono w przypadku pH, nasycenia wody tlenem i chlorofilu „a”.
3. Większe wartości temperatury wody i pH notowano w sezonie wegetacyjnym, a tlenu rozpuszczonego, stopnia nasycenia wody tlenem i fosforanów w okresie pozawegetacyjnym. W przypadku pozostałych 7 badanych wskaźników tendencje były na poszczególnych głębokościach zróżnicowane.
4. Średnio w okresie badawczym, woda gromadzona w Zbiorniku Dobczyckim na głębokości 3,55 i 9,65 m zaliczała się odpowiednio do wód kategorii A2 i A3, a więc wymagała odpowiednio typowego lub wysokosprawnego uzdatniania fizycznego i chemicznego. Natomiast z uwagi na niskie nasycenie tlenem w okresie wegetacyjnym, woda na poziomie 15,87 m nie odpowiadała normatywom.
5. Niezależnie od głębokości, odczyn i zasolenie odpowiadało wymaganiom stawianym wodzie przeznaczonej do bezpośredniego spożycia przez ludzi, natomiast mętność wody była stale nieodpowiednia.
6. Średnie roczne stężenia fosforu ogólnego kwalifikują wody retencjonowane w zbiorniku jako mezotroficzne, natomiast przeciętne i maksymalne koncentracje chlorofilu „a” pozwalają uznać wody odpowiednio za mezotroficzne lub eutroficzne.
7. Ze względu na stosunkowo duże różnice w wartościach badanych wskaźników, aby pozyskać dla celów wodociągowych lepszą jakościowo wodę surową, należy ją umiejętnie pobierać z różnych głębokości – generalnie w okresie pozawegetacyjnym z poziomu najpłytszego, w sezonie wegetacyjnym z poziomu średniego, a z poziomu najniższego w przypadku wystąpienia większych stężeń chlorofilu „a” na dwóch pierwszych poziomach głębokości zbiornika.

Literatura

1. **Bergel T., Pawelek J., Rulka Z.:** *Mętność wody dostarczanej przez systemy wodociągowe województwa małopolskiego*. Ochrona Środowiska, 31, 4, 61–64 (2009).
2. **Breemen van L.W.C.A., Ketelaars H.A.M., Hoogenboezem W., Medema G.:** *Storage reservoirs – a first barrier for pathogenic micro-organisms in the Netherlands*. Wat. Sci. Tech. 37, 2, 253–260 (1998).
3. **Camargo J.A., Alonso Á., de la Puente M.:** *Eutrophication downstream from small reservoirs in zbiornikach mountain rivers of Central Spain*. Water Res., 39, 3376–3384 (2005).
4. **Chelmicki W.:** *Woda. Zasoby, degradacja, ochrona*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2002.
5. **Ejankowski W., Lenard T.:** *Trophic State Of A Shallow Lake With Reduced Inflow Of Surface Water*. Archives Of Environmental Protection. 40(3), 3–11 (2014).
6. **Holas J., Holas M., Chour V.:** *Pollution by phosphorus and nitrogen in water streams feeding the Zelivka drinking water reservoir*. Wat. Sci. Tech. 39, 12, 207–214 (1999).
7. **Kanownik W., Kowalik T., Bogdał A., Ostrowski K.:** *Quality Categories of Stream Water Included in a Small Retention Program*. Pol. J. Environ. Stud. Vol. 22, No. 1 (2013), 159–165 (2013).
8. **Kondracki J.:** *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2013.
9. **Łagosz T.:** *Zadania i funkcje gospodarcze zbiornika*. [W:] Starmach J., Mazurkiewicz-Boroń G. (red.) *Zbiornik Dobczycki*. Ekologia – eutrofizacji – ochrona. ZBW PAN Kraków, 11–13 (2000).
10. **Mazurkiewicz-Boroń G.:** *Czynniki kształtujące procesy eutrofizacyjne w podgórskich zbiornikach zaporowych*. Suplementa a Acta Hydrobiologia, vol. 2 – ZBW PAN, Kraków 2002.
11. **Nachlik E.:** *Identyfikacja i ocena oddziaływań antropogenicznych na zasoby wodne dla wskazania części wód zagrożonych nieosiągnięciem celów środowiskowych*. Monografia 318, Inż. Środ., Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
12. **Nowacka A., Włodarczyk-Makuł M., Panasiuk D.:** *Charakterystyka wybranych parametrów jakości wody zasilającej ZUW Goczałkowice*. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 14, 4, 385–396 (2011).
13. **Oki T., Kanae S.:** *Global Hydrological Cycles and World Water Resources*. Science, 313, 1068–1072 (2006).

14. **Pawełek J., Grenda W.:** *Gospodarowanie wodą ujmowaną z Rudawy dla potrzeb wodociągu krakowskiego przy wykorzystaniu zbiorników ujściowych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 1, 219–228 (2011).
15. **Pęczuła W., Suchora M.:** *Analiza przyczyn występowania złej jakości wody w zbiorniku retencyjnym w Kraśniku w pierwszych latach jego funkcjonowania*. Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ., 54, 321–332 (2011).
16. **Reczek L., Siwiec T., Skiba I.:** *Ocena korelacji wzajemnej podstawowych jednostek mętności*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 6, 211–215 (2002).
17. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 listopada 2002 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody powierzchniowe wykorzystywane do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia (Dz. U. 2002 Nr 204, poz. 1728).
18. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 listopada 2011 roku w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Dz. U. 2011 Nr 257, poz. 1545).
19. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. 2007 Nr 61, poz. 417 z późn. zm.).
20. **Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., Hofstetter T.B., Johnson C.A., Gunten U., Wehrli B.:** *The Challenge of Micropollutants in Aquatic Systems*. Science, 313, 1072–1077 (2006).
21. **Starmach J., Jelonek M.:** *Specjalistyczna gospodarka rybacka – jeden z czynników ochrony jakości wody*. [W:] Starmach J., Mazurkiewicz-Boroń G. (red.) *Zbiornik Dobczycki*. Ekologia – eutrofizacji – ochrona. ZBW PAN Kraków, 233–240 (2000).
22. **Wiatkowski M.:** *Ocena jakości wody zbiornika Komorów na potoku Miliówka*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 8 (2), 51–64 (2010).
23. **Zimoch I., Kłos M.:** *Zastosowanie technik komputerowych do prognozowania eutrofizacji wód powierzchniowych na przykładzie zbiornika zaporowego "Dobczyce"*. Ochrona Środowiska, 3, 73–76 (2003).
24. **Zymon W., Kurbiel J.:** *Wpływ zawartości krzemionki w wodzie na adsorpcję zanieczyszczeń na węglu aktywnym*. Ochrona Środowiska, 3, 74, 27–30 (1999).

Changes of Water Quality Indices with Depth at Drinking Water Intake from Dobczyce Reservoir

Abstract

The paper presents a comparative and statistical analysis of the changes of water quality indices values with depth on the water intake from Dobczyce reservoir. Moreover, seasonal variability of the tested indices was analysed and water quality with its usable values were assessed. Dobczyce reservoir is a 12 km long and 1.0 km wide submountain dam reservoir. The reservoir area at the maximum impoundment level (maximum water level) is 915 ha, its capacity 112.1 mln m³ and mean depth 10.2 m. It is situated 20 south of Krakow, in the malopolskie voivodship, myślenicki county. Raw water from the reservoir is collected on tower intake which makes possible water intake from three depth levels. Real water extraction on the intake is about 1.0 m³·s⁻¹, guaranteed 2.5 m³·s⁻¹ and permissible 5.5 m³·s⁻¹. The investigations conducted in 2008 and 2009 covered selected physicochemical water indices: the temperature, pH, turbidity, electrolytic conductivity, total suspended solids, dissolved oxygen, oxygen saturation, silica, phosphates, total phosphorus, as well as bioindicator – chlorophyll „a”. At weekly intervals, water samples for laboratory analyses were collected from three depth levels of the reservoir directly at the tower water intake for Krakow. Physicochemical and biological analyses, using referential methods were conducted in the Laboratory of the Municipal Waterworks and Sewer Enterprise in Krakow. For each analysed index mean values for 2008 and 2009 and for the 2008–2009 period of analyses were computed, divided into the winter (October-March) and summer (April-September) half year and for the calendar year (January-December). Statistical significance of the differences between the values of individual indices registered on various depth levels on the reservoir were estimated by nonparametric U Manna-Whitney’a significance test, on $\alpha = 0.05$. For all investigated indices box-whiskers plots were made which suggestively presented the median, extreme values and 10–90% percentiles. The assessment of Dobczyce reservoir water for drinking water supply for people was conducted following the methodology described in the Regulation of the Minister of the Environment [Dz. U. 2002 Nr 204, poz. 1728]. Selected quality parameters of the tested water were also confronted with the requirements stated in the Regulation of the Minister of Health dated 29 March 2007 on drinking water quality for people [Dz. U. 2007 nr 61, poz. 417]. Trophic state of Dobczyce reservoir was assessed on the basis of total phosphorus and chlorophyll „a” concentrations, using the criteria stated by OECD.

On the basis of data analysis it was established that mean annual values of water temperature, pH, oxygen saturation and concentrations of dissolved oxygen and chlorophyll „a” were decreasing with depth. On the other hand, in the vertical profile, turbidity, electrolytic conductivity, as well concentrations of total suspended solids, phosphates and total phosphorus were increasing. Higher water temperatures and pH values were noted in the summer half-year, whereas dissolved oxygen, oxygen saturation and phosphates in the winter half-year. On average for the investigated period, water collected in Dobczyce reservoir on the depth of 3.55 and 9.65 m was classified, respectively to A2 and A3 water category, therefore it required appropriate typical or high performance typical treatment. On the other hand, due to low oxygen saturation in the summer half-year, water on the level of 15.87 m did not meet the standards. Irrespective of the depth, pH and salinity fulfilled the requirements for water intended for direct consumption by people, whereas water turbidity was unsatisfactory all the time. Mean annual concentrations of total phosphorus qualify water collected in the reservoir as mezotrophic, while average and maximum concentrations of chlorophyll „a” allow to regard the water as respectively mezotrophic or eutrophic. Due to relatively big differences in values of the analysed indices, better quality raw water intended for running water outside the growing period supply should be skillfully collected from various depths – generally in the from the shallowest level, in the vegetation season from the middle level and from the lowest level on case higher concentrations of chlorophyll „a” and plankton occur on the first two depths of the reservoir.

Słowa kluczowe:

zbiornik wodny, jakość wody, eutrofizacja, stratyfikacja

Keywords:

reservoir, quality water, eutrophication, stratification