

Anna DROŹDZIK 

UNIwersytet Rolniczy w Krakowie

**SPECYFIKA KSZTAŁTOWANIA SIĘ WARUNKÓW
TERMICZNO-TLENOWYCH W ZBIORNIKU SOLINA****THE SPECIFICITY OF THE FORMATION OF THERMAL
AND OXYGEN CONDITIONS IN THE SOLINA RESERVOIR****Wstęp**

Rozpuszczalność gazów w wodzie jest determinowana m.in. jej temperaturą. Nasylenie wody tlenem jest więc zależne od bilansu tlenowego, tj. podaży tlenu oznaczającej jego dostarczanie dzięki fotosyntezie i ruchom powietrza wywołującym falowanie oraz zużycia go podczas utleniania substancji organicznych (Radwan, Kowalczyk 1979; Dojlido 1995; Lampert, Sommer 1996; Kajak 2001; Jawecki i in. 2008; Biedka, Dzienis 2009; Kasza 2009; Kostecki 2014a; Garbacz i in. 2018). Wyższa temperatura wody oznacza niższą rozpuszczalność tlenu w wodzie (Kowal 1977; Dojlido 1995; Jawecki i in. 2008; Kasza 2009; Biedka 2013; Garbacz i in. 2018). Jednocześnie wzrost temperatury wody skutkuje wzrostem tempa przemian biochemicznych i chemicznych oraz mineralizacji substancji organicznych, a także wzrostem toksyczności substancji i wrażliwości organizmów na ich działanie (Dojlido 1995; Biedka 2013).

Zróznicowanie temperatury w pionie hydrometrycznym zbiornika wodnego oznacza istnienie układu warstw termicznych, które grupują się w trzy zasadnicze piętra: epilimnion (warstwa wody ciepłej), metalimnion (inaczej termoklina, czyli warstwa skoku termicznego o największych wraz z głębokością zmianach temperatury – nawet 2°C na 1 m głębokości) i hypolimnion (warstw wody zimnej). Uwarstwienie to nazwane zostało stratyfikacją termiczną, występuje ono latem i zimą, kiedy przy wystarczającej głębokości akwenu stagnacja wody umożliwia wytworzenie i utrzymywanie się stabilnego i trwałego gradientu temperatur (Starmach 1973; Kajak 2001; Kasza 2009; Ficek 2013). W jeziorach o małych głębokościach brak jest wyraźnej strefy wody zimnej, czyli typowego hypolimnionu. Taka struktura termiczna nazywana jest niepełną stratyfikacją (Ficek 2013). W płytkich zbiornikach możliwa jest również sytuacja okresowej stratyfikacji termicznej, co pozwolił zauważyć monitoring ciągły (Ruman i in. 2013; Absalon i in. 2014). Uwar-

stwienie termiczne może się pojawiać również w obrębie samego epilimnionu (Lampert, Sommer 1996; Dorochowicz i in. 2006). Wytworzenie się termokliny stabilizuje układ warstw termicznych, co zwykle przyczynia się do pogorszenia warunków tlenowych hypolimnionu (Rybacki i in. 2016).

Wiosną i jesienią w następstwie postępującej homotermii, czyli wyrównywania temperatury, dochodzi do cyrkulacji i wymieszania się wód akwenu z jednoczesnym równomiernym rozproszaniem zawartego w zbiorniku tlenu oraz innych substancji, w tym biogennych. Tlen zazwyczaj jest doprowadzany z warstw powierzchniowych do hypolimnionu, natomiast substancje biogenne obecne w hypolimnionie uzupełniają braki w epilimnionie (Gierszewski i in. 2015).

Epilimnion cechuje się dobrym natlenieniem, temperaturą zbliżoną do temperatury otaczającego powietrza (co jest najlepiej widoczne w czasie letniej stagnacji) i zwykle niską koncentracją substancji pokarmowych systematycznie zużywanych w procesie fotosyntezy. Wody hypolimnionu mają z kolei niską temperaturę i koncentrację tlenu (czasami występują nawet warunki beztlenowe) oraz są zasobne w substancje biogenne. W wodach naddennych i interstycjalnych wodach osadowych, w następstwie braku tlenu, pojawiają się szkodliwe i toksyczne substancje (Dojlido 1995; Kasza 2009).

Duża dynamika wód w akwenach podatnych na działanie wiatru i falowanie sprzyja powstawaniu tzw. podwójnego metalimnionu. Do tej pory jednak nie zajmowano się tym zjawiskiem, dlatego mechanizm jego powstawania nie jest dokładnie poznany (Kostecki 2014b; Gierszewski i in. 2015).

Na podstawie dynamiki przepływu wody przez zbiornik zaporowy, a także warunków sprzyjających bądź niesprzyjających wykształceniu się stratyfikacji w obrębie czaszy zbiornika, dla każdego zbiornika indywidualnie wydziela się strefę rzeczną, przejściową i jeziorną (Marzolf, Robertson 2005). Wykształcaniu się typowego uwarstwienia termicznego najbardziej sprzyja mała dynamika wód, którą obserwuje się w strefie przejściowej zbiornika. Korzystna jest tutaj także dostępność światła i składników odżywczych do produkcji substancji organicznych oraz mniejsza mętność wody wynikająca ze zredukowanej prędkości przepływu (Kasza 2009; Gierszewski i in. 2015; Szłapa 2019). Należy jednak pamiętać, że z uwagi na przepływowy charakter zbiorników zaporowych, zmienny przepływ głębinowy (przez turbiny) i duże wahania poziomu wód, warstwy termiczne nie wykształcają się tak wyraźnie jak w jeziorach (Kajak 2001; Jokiel i in. 2017). Istotne jest więc tempo wymiany wody, czyli czas retencji (Kolada i in. 2018). W zbiornikach przepływowych powyżej i poniżej zapory nie zauważa się istotnych zmian temperatury, a typowe uwarstwienie termiczne nie wykształca się (Kasza 2009). Co więcej, dopływające latem wody rzeczne są zimniejsze od zbiornikowych i dlatego przepływają one przez zbiornik warstwą o zbliżonej temperaturze i gęstości, czyli metalimnionem lub nawet hypolimnionem, co również zaburza stratyfikację (Kajak 2001).

Termika wód determinuje stopień jej nasycenia gazami, w tym tlenem (Ptak, Nowak 2016a; b), dlatego warunki termiczne i tlenowe rozpatruje się zwykle łącznie (Ptak, Nowak 2017). Krzywe zmian stężenia tlenu wraz z głębokością podczas letniej stagnacji mogą przybierać postać ortogrady, klinogrady, heterogrady dodatniej i heterogrady ujem-

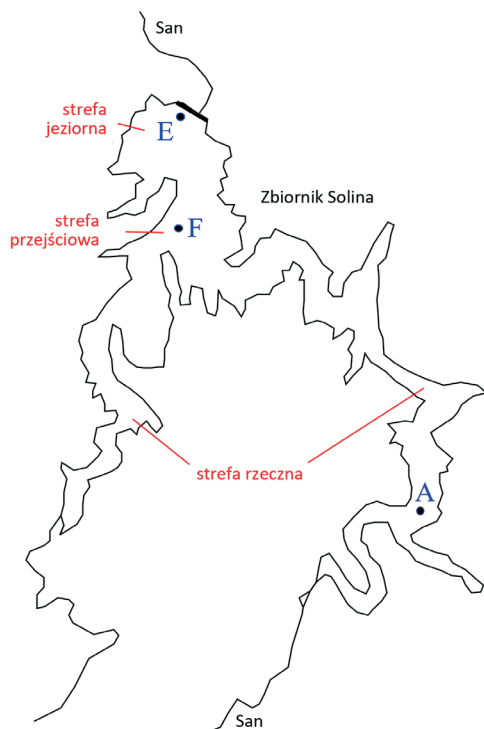
nej. Ortograda występuje w głębokich i holomiktycznych zbiornikach wodnych o niskiej produktywności (oligotroficznych), których wody są wysyczone tlenem od powierzchni do dna. Produkcja substancji organicznych jest na tyle niska, że jej rozkład odbywa się jeszcze w epilimnionie, dzięki czemu nie dochodzi do zużycia tlenu w głębszych warstwach toni wodnej. Klinograda powstaje w zbiornikach produktywnych o niskiej zawartości tlenu w hypolimnionie lub nawet jego braku, w których wraz z głębokością jego stężenie maleje. Gdy na tle klinogrady w metalimnionie widać wyraźne odchylenia stężenia tlenu, wówczas mamy do czynienia z heterogradą. Heterograda dodatnia występuje przy intensywnej fotosyntezie w metalimnionie, której następstwem jest przesylenie wody tlenem, natomiast heterograda ujemna powstaje, gdy na skutek intensywnego rozkładu materii organicznej w metalimnionie dochodzi do dużego zużycia tlenu (Lampert, Sommer 1996; Kajak 2001).

Celem badań była analiza profili termiczno-tlenowych zbiornika Solina i próba wnioskowania o ich specyfice w zbiorniku zaporowym, jako sztucznie utworzonym akwenu. Skoncentrowano się na różnicach między profilami w odniesieniu do lokalizacji punktów pomiarowo-kontrolnych (ppk) oraz terminów wykonania pomiarów. Punkty pomiarowo-kontrolne reprezentowały strefę rzeczną, przejściową i jeziorną zbiornika, natomiast terminy pomiarów obejmowały okres cyrkulacji wiosennej (homotermii) – kwiecień i okres stagnacji letniej (stratyfikacji, uwarstwienia termicznego) – sierpień.

Materiały i metody

Obiektem badawczym był zbiornik Solina. Do analiz wytypowano ppk, dla których dysponowano danymi termiczno-tlenowymi dla całego pionu hydrometrycznego w terminach umożliwiającym przeprowadzenie analizy porównawczej. Dane uzyskano z Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Rzeszowie – Delegatury w Jaśle, zgromadzone w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. Zestawienie terminów analizowanych w pracy pomiarów i oznaczeń przedstawiono w tabeli 1. Okres badawczy obejmował lata 2000-2012, jednak pomiary nie odbywały się w tym czasie w sposób regularny. Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi przez WIOŚ w Rzeszowie analizowano następujące stanowiska pomiarowe: ppk A – w rejonie ujścia Sanu i potoku Czarny, ppk F – w rejonie Polańczyka oraz ppk E – przy zaporze. Lokalizacje ppk odpowiadały kolejno strefie rzecznej, przejściowej i jeziornej. Badania prowadzono dwa razy w roku – w kwietniu i w sierpniu, co odzwierciedlało stan homotermii wiosennej i stagnacji letniej (w przypadku ppk F jednokrotnie również w maju, lipcu i wrześniu 2012 r., przy czym profil majowy analizowano łącznie z kwietniowymi, natomiast lipcowy i wrześniowy łącznie z sierpniowymi). Równoczesne pomiary temperatury oraz tlenu odbywały się co 1 m wzdłuż pionu hydrometrycznego i zależnie od jego lokalizacji wykonywane były do głębokości: 20 m – ppk A, 25 m – ppk F, 55 m – ppk E (WIOŚ w Rzeszowie).

Zbiornik Solina odznacza się skomplikowaną morfologią. Rozczłonkowanie i wielodzielny układ misy zbiornika, a także urozmaicona linia brzegowa, utrudniają



Rys. 1. Rysunek poglądowy – kształt zbiornika Solina wraz z układem stref i zaznaczonymi ppk A, F, E.

Fig. 1. Illustrative drawing – the shape of the Solina reservoir with the zone layout and marked A, F, E mcp.

jednoznaczne wyróżnienie strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej (Szłapa 2019). O wieloakwenowości jezior piszą też Gierszewski i in. (2015), Garbacz i in. (2018), zwracając uwagę na zróżnicowanie warunków i w pewnym stopniu autonomiczne funkcjonowanie poszczególnych akwenów. Subiektywny podział zbiornika na cztery części sugeruje jednak, że z powodu „izolacji” funkcjonują one nieco odmiennie. Zaznaczają się dwie quasi-rzeczne części, następnie część stanowiąca strefę przejściową oraz część przyzaporową jako strefa jeziorna. Warunki termiczno-tlenowe wydzielonych stref reprezentują odpowiednio: ppk A – strefę rzeczną, ppk F – strefę przejściową, ppk E – strefę jeziorną (rys. 1). Parametry morfometryczne zbiornika zestawiono w tabeli 2.

Zbiornik Solina posiada I kategorię odporności na degradację, tzn. ma wysoką odporność na oddziaływania zewnętrzne. Natomiast zlewnia zbiornika zaliczona została do 3 trzeciej grupy podatności na uruchamianie i dostawę ładunku materii do zbiornika, oznaczającą możliwość umiarkowaną. Dlatego nawet mimo dużego zalesienia zlewni (>75%) i niskiego odsetka gruntów rolniczych (około 18%), zbiornik jest realnie zagrożony degradacją (Bartoszek, Czech 2014).

Tabela 1. Zestawienie terminów analizowanych pomiarów i oznaczeń.

Table 1. List of terms of the analyzed measurements and determinations.

Seria pomiarowa	A - w rejonie ujścia Sanu i potoku Czarny (pomiar w latach 2000-2003)		F - na wysokości Polańczyka (pomiar w latach 2000-2012)		E - przy zaporze (pomiar w latach 2000-2009)	
	Cyrkulacja wiosenna (kwiecień)	Stagnacja letnia (sierpień)	Cyrkulacja wiosenna (kwiecień)	Stagnacja letnia (sierpień)	Cyrkulacja wiosenna (kwiecień)	Stagnacja letnia (sierpień)
1	2000-04-27		2000-04-26		2000-04-28	
2		2000-08-22		2000-08-23		2000-08-23
3	2001-04-10		2001-04-10		2001-04-09	
4		2001-08-21		2001-08-22		2001-08-23
5	2002-04-16		2002-04-16		2002-04-17	
6		2002-08-12		2002-08-12		2002-08-13
7	2003-04-24		2003-04-25		2003-04-25	
8		2003-08-25		2003-08-26		2003-08-26
9			2012-05-15		2004-04-20	
10				2012-07-04		2004-08-17
11				2012-08-07	2005-04-05	
12				2012-09-12		2005-08-05
13					2008-04-22	
14						2008-08-25
15					2009-04-20	
16						2009-08-17
Liczba analizowanych przypadków	cyrkulacja	stagnacja	cyrkulacja	stagnacja	cyrkulacja	stagnacja
	4	4	5	7	8	8
	8		12		16	
	36					

Wyniki i dyskusja

Procesy o charakterze fizycznym, chemicznym i biologicznym przebiegają zarówno w wodach płynących, jak i stojących, a ich charakter w każdym przypadku jest wypadkową wielu czynników. Gdy zachodzą one w warunkach zrównoważonych, tzn. żaden element geosystemu zlewni nie podlega zaburzeniom, ich kierunek i tempo prowadzą do naturalnego samooczyszczania wód (Kurzej i in. 2017).

Badania dotyczyły zbiornika zaporowego, czyli akwenu powstałego w sposób sztuczny, którego funkcjonowanie podlega kontroli i celowemu sterowaniu. Jakkolwiek sam zbiornik jest obiektem typowo antropogenicznym, to morfologia jego misy nawiązuje do naturalnej rzeźby terenu, a w jej obrębie zarysowują się cztery izolowane i odmiennie funkcjonujące akwenty. Należy jednocześnie pamiętać, że ustawodawca zaliczył zbiorniki

Tabela 2. Parametry morfometryczne zbiornika Solina (na podstawie: Drożdżik 2019).

Table 2. Morphometric parameters of the Solina reservoir (based on: Drożdżik 2019).

Parametr	Wartość
Spiętrzona rzeka	San
Kilometr biegu spiętrzonej rzeki [km]	325
Rok rozpoczęcia eksploatacji	1968
Pojemność [mln m ³]	502
Powierzchnia [ha]	2200
Głębokość średnia [m]	22
Głębokość maksymalna [m]	60
Wysokość piętrzenia [m]	58
Rodzaj zapory	betonowa
Czas retencji [doby]	299
Typ zbiornika ze względu na czas retencji	limniczny
Powierzchnia zlewni [km ²]	1174,5

zaporowe do śródlądowych wód płynących (Dz.U. 2017, poz. 1566), mimo że wykształcone w nich ekosystemy niejednokrotnie bardziej przypominają swym charakterem ekosystemy lenityczne. Kluczowe znaczenie ma więc strefowość zbiorników zaporowych i wynikający z niej faktyczny czas przebywania w nich wody (Picińska-Fałtynowicz, Błachuta 2012; Gierszewski i in. 2017; Kolada i in. 2018; Szłapa 2019).

W tabeli 3 pokazano zależności stężeń tlenu i temperatur podczas cyrkulacji (kwiecień) i stagnacji (sierpień) w poszczególnych strefach zbiornika (ppk A, F, E). Brak korelacji w kwietniu oraz korelacja na poziomie $r = 0,59$ w sierpniu w strefie jeziornej (wyraźnie niższa niż pozostałe) wynika najprawdopodobniej ze specyfiki pracy zapory – możliwości zrztutu wód głębinowych i powierzchniowych. Wysokie korelacje podczas stagnacji w ppk A i F wskazują, że zbiornik Solina jako duży akwen wodny potrafi wytworzyć i utrzymywać stabilne warunki. Powyższe korelacje potwierdzają współzależność obu parametrów oraz zasadność ich równoczesnej analizy.

Przebieg profili termiczno-tlenowych wynika z charakteru akwenu – zbiornik ma wyraźnie izolowane dwie strefy rzeczne oraz strefę przejściową i jeziorną, między którymi granica jest dużo bardziej intuicyjna. W przypadku zbiorników zaporowych wieloakwenowość jest ważna zwłaszcza z uwagi na poziomy przepływ wody (Gierszewski 2018). W zbiorniku Solina kształtuje się on zupełnie inaczej niż np. w zbiornikach Goczałkowice czy Klimkówka, wskazując na fakt, że zróżnicowanie cech morfometrycznych misy jeziornej warunkuje odmienną przebiegu procesów fizykochemicznych. W związku z wieloakwenowością zbiornika, zmiany przepływu nie wykazują cech ciągłości, a towarzyszące mu procesy – sekwencyjności.

Zestaw analizowanych danych pozwolił na diagnozę warunków termiczno-tlenowych w pionach hydrometrycznych wydzielonych stref zbiornika w warunkach homotermii wiosennej i stratyfikacji letniej, co umożliwiło uchwycenie zróżnicowania czasowo-

Tabela 3. Korelacje stężenia tlenu O_2 [$mg \cdot m^{-3}$] i temperatury T [$^{\circ}C$] w pionie hydrometrycznym ppk A, F i E w czasie cyrkulacji wiosennej (kwiecień) i stagnacji letniej (sierpień) (poziom istotności $\alpha = 0,05$).

Table 3. Correlations of oxygen concentration O_2 [$mg \cdot dm^{-3}$] and temperature T [$^{\circ}C$] in the hydrometric plumb of A, F and E mcp at the time of spring circulation (April) and summer stagnation (August) (significance level $\alpha = 0.05$).

Stan mas wodnych	ppk	strefa zbiornika	współczynnik korelacji (r)
Cyrkulacja (kwiecień) - homotermia	A	rzeczna	0,56
	F	przełściowa	0,66
	E	jeziorna	brak korelacji
Stagnacja (sierpień) - uwarstwienie termiczne	A	rzeczna	0,93
	F	przełściowa	0,92
	E	jeziorna	0,59

Tabela 4. Typy krzywych tlenowych w zbiorniku Solina w wieloleciu 2000-2012.

Table 4. Types of oxygen curves in the Solina reservoir in the years 2000-2012.

Seria pomiarowa	A - w rejonie ujścia Sanu i potoku Czarny (pomiary w latach 2000-2003)		F - na wysokości Polarczyka (pomiary w latach 2000-2012)		E - przy zaporze (pomiary w latach 2000-2009)	
	Cyrkulacja wiosenna (kwiecień)	Stagnacja letnia (sierpień)	Cyrkulacja wiosenna (kwiecień)	Stagnacja letnia (sierpień)	Cyrkulacja wiosenna (kwiecień)	Stagnacja letnia (sierpień)
1	O		O		O	
2		H+		H+		H+
3	K		K		K	
4		K		K		K
5	H+		O		K	
6		K		H-		H-
7	O		K		K	
8		H-		K		K
9			O		K	
10				H+		H-
11				H+	K	
12				H-		H-
13					K	
14						H-
15					O	
16						H-

Daty poszczególnych serii pomiarowych odpowiadają datom z tabeli 1.

Dates of individual measurement series correspond to the dates in table 1.

-przestrzennego. Zróżnicowanie przestrzenne temperatury i stężenia tlenu obejmowało gradienty tych parametrów w poszczególnych strefach zbiornika (ppk A, F, E) – tj. zróżnicowanie w płaszczyźnie pionowej i poziomej, natomiast zróżnicowanie czasowe obejmowało stan wód w czasie cyrkulacji wiosennej i stagnacji letniej, czyli zmienność w skali roku, a także zmiany zachodzące na przestrzeni badanych lat (w wieloleciu 2000-2012).

W tabeli 4 przedstawiono zestawienie typów krzywych tlenowych, które wytworzyły się w zbiorniku w czasie pomiarów. Jak widać miała miejsce każda z sytuacji tlenowych: wysoka zawartość tlenu i brak zmian stężenia wraz z głębokością (ortograda), wyraźnie niższa zawartość tlenu w hypolimnionie (klinograda), widoczna zmiana zawartości tlenu w metalimnionie spowodowana intensywną produkcją pierwotną (heterograda dodatnia) lub rozkładem materii organicznej (heterograda ujemna). Zaznaczyć należy, że ubytek tlenu nigdy nie wiązał się z jego deficytem i pojawieniem się warunków beztlenowych (anoksji). W latach 2000 i 2001 wystąpiły jednakowe warunki tlenowe w każdej ze stref podczas cyrkulacji i stagnacji, co świadczy o podobnym przebiegu procesów fizyczno-chemiczno-biologicznych niezależnie od strefy zbiornika. Wyniki z sierpnia (stagnacji) 2002 i 2003 r. oraz kwietnia (homotermii) 2003 r. świadczą o podobnych warunkach zaistniałych w strefie przejściowej i jeziornej. Wyrównane zawartości tlenu od powierzchni do dna (ortograda) występowały podczas cyrkulacji wiosennej. W czasie stagnacji letniej zawartość tlenu w pionach hydrometrycznych zmieniała się, a zmiany te charakteryzowała klinograda oraz heterograda dodatnia i ujemna. Brak danych monitoringowych począwszy od kwietnia 2004 r. w strefie rzecznej i przejściowej uniemożliwił dalsze porównania między strefami i prześledzenie wieloletnich zmian.

Podczas sezonu wegetacyjnego mogą pojawiać się (zwłaszcza w epilimnionie) okresy, kiedy nasycenie wody tlenem przekracza 100%. W zbiorniku Solina miało to miejsce w każdym z ppk zarówno w czasie kwietniowych, jak i sierpniowych pomiarów. Wartości przesyceń oraz głębokości do których występowały, były wyraźnie większe w okresie stagnacji w strefie przejściowej i jeziornej (ppk F nawet do 121% nasycenia i do 11 m głębokości). Może to wynikać z intensywnej fotosyntezy oraz z działania wiatru (Kowal 1977; Radwan, Kowalczyk 1979; Prus i in. 2005; Kasza 2009; Jaguś, Rzętała 2009; Bartoszek, Koszelnik 2014; Bartoszek i in. 2017). Zestawienie konkretnych terminów z wartościami i zasięgiem przesyceń zawiera tabela 5.

Na rysunku 2 przedstawiono szczegółowe wyniki pomiarów termiczno-tlenowych w poszczególnych pionach hydrometrycznych podczas homotermii wiosennej i stratyfikacji letniej. Czas występowania homotermii oraz uwarstwienia w tych samych miesiącach roku rozpatrywali również inni badacze (Radwan, Kowalczyk 1979; Gierszewski 2015; Ptań, Nowak 2016a, 2017; Gołdyn i in. 2018).

Zmiany w profilach termiczno-tlenowych podczas homotermii wiosennej (w kwietniu):

- Przebieg profilu termiczno-tlenowego związany był ściśle z terminem pomiaru i występującymi w tym czasie warunkami atmosferycznymi. W czasie homotermii wyższym temperaturom odpowiadały niższe stężenia tlenu (ppk A: 27.04.2000 r., 16.04.2002 r., ppk F: 26.04.2000 r., 16.04.2002 r., 15.05.2012 r., ppk E: 28.04.2000 r., 22.04.2008 r., 20.04.2009 r.). Brak takiej zależności wynikał z zaburzeń podczas mie-

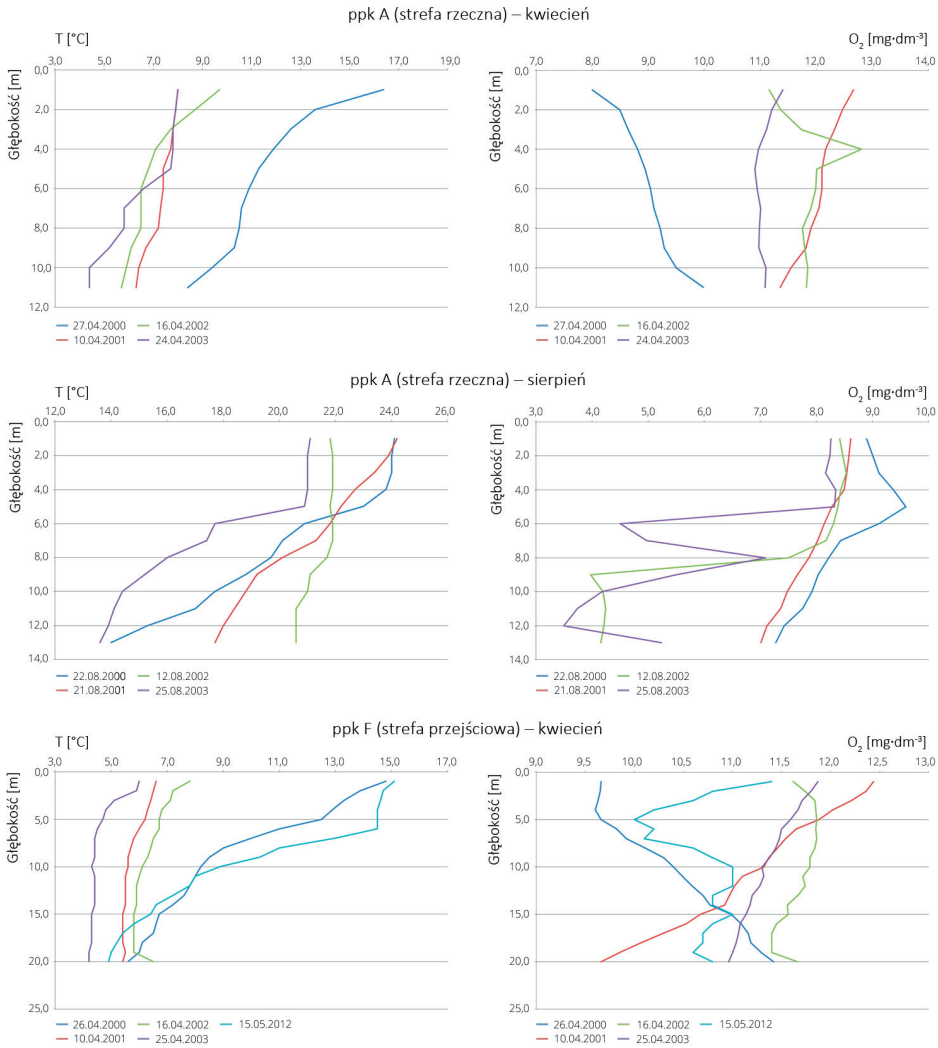
Tabela 5. Nasycenie wody tlenem przekraczające 100% w ppk A, F, E.

Table 5. The oxygen saturation of water above 100% of A, F, E mcp.

ppk	Data pomiaru	Głębokość [m]	Zakres nasycenia tlenem [%]	Średnie nasycenie tlenem [%]
A-04	2001-04-10	1-6	106,9-100,7	103,4
	2002-04-16	0,2-5	100,3-100,0	100,8
A-08	2000-08-22	1-6	106,9-102,8	108,6
	2001-08-21	1-3	103,7-101,3	102,5
	2002-08-12	0,2-6	103,4-100,1	101,9
F-04	2001-04-10	1-2	101,4-100,5	101,0
	2002-04-16	0,2	101,1	101,1
	2012-05-15	0,2-3	116,0-105,0	110,5
F-08	2000-08-23	1-5	102,8-102,2	103,0
	2001-08-22	1-4	101,0-100,0	100,5
	2002-08-12	0,2-11	118,3-107,8	117,6
	2003-08-26	0,2-5	104,3-100,3	104,1
	2012-07-04	0,2-4	114,0-102,0	112,6
	2012-08-07	0,2-6	108,0-111,0	109,9
	2012-09-12	1-9	114,0-108,0	112,2
E-04	2001-04-09	1-3	102,4-100,9	101,6
	2002-04-17	0,2-4	102,7-101,3	102,5
	2004-04-20	0,2-2	103,0-101,0	101,7
	2005-04-05	0,2-9	103,0-102,1	105,2
	2008-04-22	1-9	103,0-102,0	104,2
	2009-04-20	0,2-11	102,0-103,0	105,6
E-08	2000-08-23	1-8	103,0-103,3	103,4
	2001-08-23	1-4	101,9-100,0	101,0
	2002-08-13	0,2-9	102,9-100,1	106,3
	2003-08-26	0,2-5	105,7-103,9	103,1
	2004-08-17	4	101,0	101,0
	2005-08-05	0,2-5	104,4-102,6	105,7
	2008-08-25	0,2-6	104,0-105,0	104,3
	2009-08-17	0,2-10	111,0-103,0	108,4

szania się mas wody w czasie cyrkulacji. Wyższa temperatura związana była z pomiarami przeprowadzonymi w końcu kwietnia i jednokrotnie w maju.

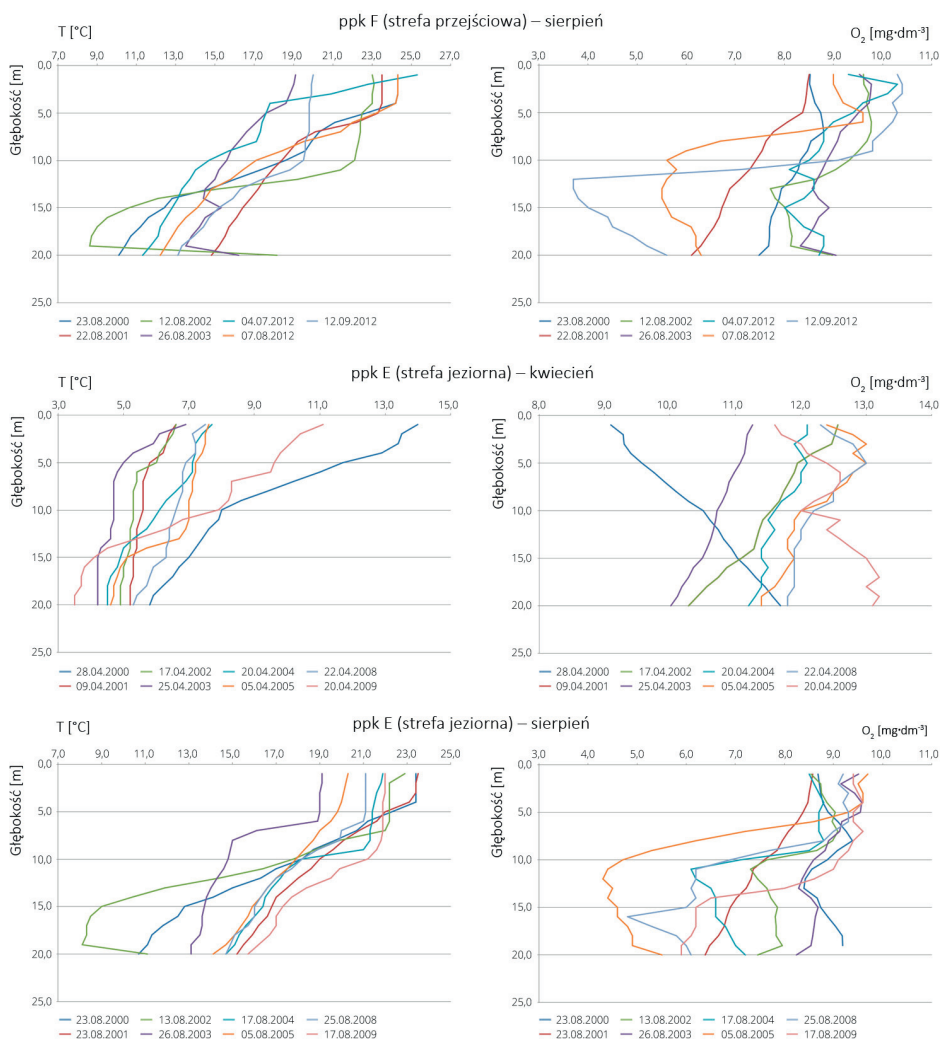
- Stężenia tlenu w strefie rzecznej (ppk A) utrzymywały się na stałym i wysokim poziomie w całym pionie hydrometrycznym (średnia to $10,9 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$), co wynikało z charakteru przepływu w tej strefie, w której występuje jeszcze ruch turbulentny, prowadzący do wyrównywania natlenienia w profilu głębokościowym. Potwierdzają to również inni badacze (Dynowska, Maciejewski 1991; Moniewski 2015; Gierszewski i in. 2017).



Rys. 2. Zmiany temperatury T [°C] i stężenia tlenu O₂ [mg · dm⁻³] w pionie hydrometrycznym ppk A, F i E w czasie cyrkulacji wiosennej (kwiecień) i stagnacji letniej (sierpień).

Fig. 2. Changes in temperature T [°C] and oxygen concentration O₂ [mg · dm⁻³] in the hydrometric plumb of A, F and E mcp during the spring circulation (April) and summer stagnation (August).

- Wzrost temperatury warstwy powierzchniowej strefy przejściowej (ppk F) widoczny był do głębokości 2, 5 oraz 6 m i oznaczał początek wykształcania się epilimnionu. Średnie stężenie tlenu w pionie strefy przejściowej wynosiło 11,0 mg O₂ · dm⁻³.
- W strefie jeziornej (ppk E) nawet w warunkach homotermii występowało zróżnicowanie termiczne – widocznie cieplejsza była warstwa powierzchniowa. Na głębokościach 20-30 m temperatura stabilizowała się na poziomie około 4°C. Zawartość tlenu



Rys. 2cd. Zmiany temperatury T [°C] i stężenia tlenu O₂ [mg · dm⁻³] w pionie hydrometrycznym ppk A, F i E w czasie cyrkulacji wiosennej (kwiecień) i stagnacji letniej (sierpień).

Fig. 2cont. Changes in temperature T [°C] and oxygen concentration O₂ [mg · dm⁻³] in the hydrometric plumb of A, F and E mcp during the spring circulation (April) and summer stagnation (August).

zawsze była wysoka, średnio w pionie wynosiła 11,7 mg O₂ · dm⁻³ (tylko jednokrotnie spadła poniżej 10 mg O₂ · dm⁻³ - 28.04.2000 r. w warstwie epilimnionu).

- Kilkakrotnie wystąpiła sytuacja, w której wraz z głębokością zawartość tlenu wzrastała (ppk A 27.04.2000 r., ppk F 26.04.2000 r., ppk E 28.04.2000 r.). Co prawda brak jest wyjaśnienia tego zjawiska w dostępnej literaturze (Gierszewski i in. 2015), jednak w badanym zbiorniku stan ten dotyczy tylko okresu cyrkulacji (kwiecień) we wszyst-

kich ppk w 2000 r., co może świadczyć o uchwyceniu w pomiarach stanu dobrego wymieszania wód i natlenienia hypolimnionu.

Zmiany w profilach termiczno-tlenowych podczas stagnacji letniej (w sierpniu):

- W okresie stagnacji letniej w zdecydowanej większości przypadków występowało wyraźne uwarstwienie termiczne. Zmiany termiki wraz z głębokością miały różny przebieg, niemniej warstwy termiczne były dobrze wykształcone. Wyjątek stanowi ppk A 12.08.2002 r., gdzie pionowy brak zróżnicowania temperatury można tłumaczyć turbulentnym charakterem przepływu wody w strefie rzecznej.
- Mimo stagnacji wody i utrzymującego się stabilnego uwarstwienia nigdy nie wystąpił deficyt tlenu. Najniższe stężenia – nieco poniżej $5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ – zanotowano tylko w czterech przypadkach (dwukrotnie w strefie rzecznej, raz w przejściowej i raz w jeziornej). Średnie w pionie hydrometrycznym stężenia tlenu dla strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej wyniosły odpowiednio: 6,9; 7,9; 7,5 $\text{mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$. Potwierdza to wnioski innych badaczy, że zbiornik Solina mimo długiego czasu retencji (299 dni), który stwarza warunki sprzyjające wykształcaniu stabilnego uwarstwienia termicznego w strefie przejściowej i jeziornej, odznacza się dobrymi warunkami tlenowymi (Szapkowski 1995; Prus i in. 2005; Prus i in. 2006; Lewkiewicz-Małysa, Macuda 2008; Koszelnik, Bartoszek 2011; Bartoszek 2015). Rozpoznane dobre warunki tlenowe można traktować jako sprzyjające unieruchamianiu fosforu w osadach dennych. Mniejsze średnie stężenie tlenu w strefie rzecznej może wynikać z jego zużycia na rozkład materii organicznej naniesionej rzeką ze zlewni.
- Pionowa zmienność temperatury i stężenia tlenu w strefie przejściowej (ppk F) i jeziornej (ppk E) wskazuje jednoznacznie na stratyfikację termiczno-tlenową typową dla jezior, o czym piszą m.in. Kostecki (2014a); Gierszewski i in. (2015); Ptak, Nowak (2016a, b); Gołdyn i in. (2018); Goszczyński (2020).
- Według Biedki (2014) w przypadku akwenów, gdzie najwięcej biogenów pochodzi z dopływów a nie z zasilania wewnętrznego, długość okresu letniej stratyfikacji, czyli trwania stabilnych warunków termiczno-tlenowych, ma mniejsze znaczenie w kontekście ich dostawy. Dotyczy to więc zbiornika Solina, w którym nie stwierdzono warunków beztlenowych inicjujących mechanizm zasilania wewnętrznego, zaś samą zlewnię zakwalifikowano do trzeciej grupy podatności na uruchamianie i dostawę materii do zbiornika. Długi czas retencji nie jest więc dodatkowym czynnikiem eutrofogennym.

Analiza współczynników zmienności obejmowała temperaturę i stężenie tlenu w czasie cyrkulacji wiosennej i stagnacji letniej w każdej ze stref zbiornika (tab. 6). Pozwoliła zauważyć rosnącą w kolejnych strefach zbiornika (od rzecznej przez przejściową do jeziornej) zmienność temperatury w pionie hydrometrycznym, zarówno w czasie homotermii (od 20,0% do 27,7%), jak i w czasie stagnacji (od 17,2% do 46,8%). W przypadku zmienności stężeń tlenu w pionie hydrometrycznym, zachodziła sytuacja odwrotna, tzn. w kolejnych strefach zbiornika zmienności malały, co znacznie wyraźniej widać w czasie stagnacji letniej (od 18,8% w strefie rzecznej do 10,6% w strefie jeziornej). Podczas cyrkulacji w strefie jeziornej wystąpiła wyższa zmienność stężenia tlenu w pionie hydro-

Tabela 6. Odchylenia standardowe (σ), średnie arytmetyczne (x) i współczynniki zmienności (V) temperatury T [$^{\circ}\text{C}$] i stężenia tlenu O_2 [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$] w pionie hydrometrycznym ppk A, F i E podczas cyrkulacji wiosennej (kwiecień) i stagnacji letniej (sierpień) w wieloleciu 2000-2012.

Table 6. Standard deviation (σ), arithmetic mean (x) and coefficient of variation (V) of temperature T [$^{\circ}\text{C}$] and oxygen concentration O_2 [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$] in the hydrometric plumb of A, F and E mcp during the spring circulation (April) and summer stagnation (August) in the multiannual period 2000-2012.

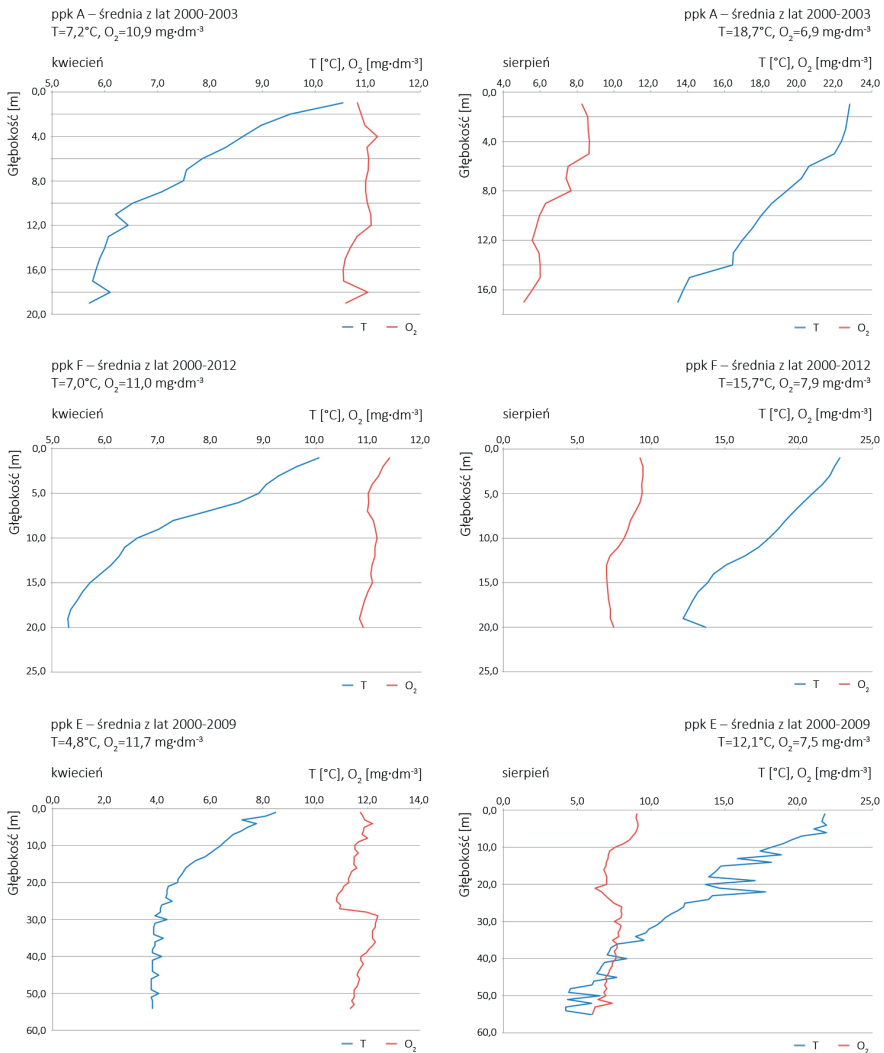
ppk	Okres badawczy	T [$^{\circ}\text{C}$]			O ₂ [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$]		
		σ	x	V [%]	σ	x	V [%]
A-04	2000-2003	1,44	7,2	20,0	0,20	10,9	1,84
A-08	2000-2003	3,22	18,7	17,2	1,29	6,9	18,8
F-04	2000-2012	1,64	7,0	23,4	0,18	11,0	1,62
F-08	2000-2012	5,06	15,7	32,2	1,06	7,9	13,4
E-04	2000-2009	1,34	4,8	27,7	0,41	11,7	3,5
E-08	2000-2009	5,67	12,1	46,8	0,79	7,5	10,6

metrycznym (3,5%) niż w pozostałych strefach (1,84% w strefie rzecznej, 1,62% w strefie przejściowej). Dużej zmienności termicznej w strefie jeziornej podczas letniej stagnacji (46,8%) towarzyszyła mała zmienność stężenia tlenu (10,6%), wskazując że hypolimnion odznacza się dużo niższą temperaturą niż nagrany epilimnion, jest dobrze natleniony i stanowi dużą objętość wód strefy jeziornej.

Na rysunku 3 przedstawiono uśrednione dla wielolecia wartości temperatur i stężeń tlenu w pionach hydrometrycznych. Średnie kwietniowe gradienty temperatur we wszystkich ppk wskazują na zapoczątkowanie okresu ogrzewania się wody (cieńsza niż w sierpniu powierzchniowa warstwa wody cieplej). Średnie stężenia tlenu wzdłuż całego pionu hydrometrycznego utrzymywały się na zbliżonym, wysokim poziomie. Sierpniowe gradienty temperatur w strefie rzecznej (ppk A) i przejściowej (ppk F) wskazują na grubszą niż w pomiarach kwietniowych warstwę wody cieplej (epilimnion). Uwarstwienie wytworzone w strefie jeziornej (ppk E) podlega nagłym zaburzeniom wywołanym pracą zapory – woda spuszcza jest raz przelewami powierzchniowymi, raz spustami dennymi.

Analizie poddano też układ warstw termicznych wykształcających się w czasie stagnacji. Prześladowano jak kształtowały się poszczególne piętra termiczne (epi-, meta- i hypolimnion), a dokładnie jaka była ich rozpiętość oraz jakie wartości średnie temperatury i stężenia tlenu w nich występowały. Wyniki zestawiono w tabeli 7.

Średnia grubość poszczególnych warstw uzależniona była ściśle od lokalizacji ppk w zbiorniku. Zmiany termiki wskazują na wyraźne powiększanie się (wzrost rozpiętości) warstwy wody zimnej (hypolimnionu) w kolejnych strefach zbiornika (strefa rzeczna 8,8 m; przejściowa 20,0 m; jeziorna 33,9 m). We wszystkich ppk średnie grubości epilimnionu były podobne (5,4 do 6,1 m), w warstwie tej średnie temperatury były na zbliżonym poziomie (21,6 do 22,7 $^{\circ}\text{C}$). O ile dla metalimnionu poszczególnych ppk temperatury średnie (w płaszczyźnie poziomej zbiornika czyli jego kolejnych strefach) malały łagodnie (od 20,9 $^{\circ}\text{C}$ w ppk A, przez 19,4 $^{\circ}\text{C}$ w ppk F, do 17,5 $^{\circ}\text{C}$ w ppk E), to w hypolimnionie



Rys. 3. Średnie w badanym wieloleciu temperatury T [°C] i stężenia tlenu O₂ [mg·dm⁻³] na poszczególnych głębokościach pionu hydrometrycznego ppk A, F i E.

Fig. 3. Mean temperature T [°C] and oxygen concentration O₂ [mg·dm⁻³] at particular depths in the hydrometric plumb of A, F, E mcp.

w związku ze znacznym zróżnicowaniem średniej grubości tej warstwy, temperatury średnie różniły się już znacznie (od 17,2°C w ppk A, przez 13,2°C w ppk F, do 10,8°C w ppk E). Średnie stężenia tlenu w poszczególnych warstwach wykazują podobną tendencję zmian w każdym ppk.

Lampert, Sommer (1996), Kajak (2001), Kasza (2009) twierdzą, że różnica temperatury między epi- i hypolimnionem podczas stagnacji może być większa niż 10°C, tymczasem

Tabela 7. Średnia rozpiętość, temperatura, stężenie tlenu oraz nasycenie wody tlenem epi-, meta- i hypolimnionu w pionie hydrometrycznym ppk A, F, E.

Table 7. Mean range, temperature, oxygen concentration and oxygen saturation of water at epi-, meta- and hypolimnion in the hydrometric plumb of A, F, E mcp.

ppk (strefa zbiornika)	warstwa*	średnia		
		rozpiętość warstwy [m]	T [°C]	O ₂ [mg·dm ⁻³]; %O ₂
A (rzeczna)	E	6,0	22,4	8,52; 100,3
	M	1,5	20,9	7,34; 84,8
	H	8,8	17,2	5,74; 60,8
F (prześciowa)	E	5,4	22,7	9,24; 108,6
	M	4,0	19,4	8,23; 91,3
	H	20,0	13,2	7,29; 70,4
E (jeziorna)	E	6,1	21,6	9,04; 104,0
	M	9,6	17,5	7,66; 81,4
	H	33,9	10,8	7,29; 66,3

*E – epilimnion, M – metalimnion, H – hypolimnion.

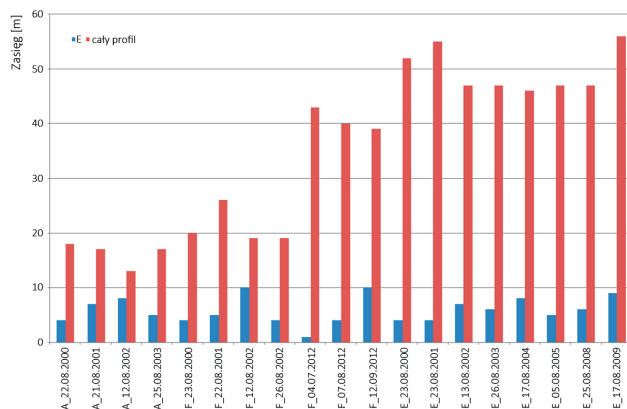
*E – epilimnion, M – metalimnion, H – hypolimnion.

Tabela 8. Różnice średniej temperatury T [°C] i średniego stężenia tlenu O₂ [mg·dm⁻³] w pionie hydrometrycznym ppk A, F i E.Table 8. Differences of mean temperature T [°C] and mean oxygen concentration O₂ [mg·dm⁻³] in the hydrometric plumb of A, F, E mcp.

ppk (strefa zbiornika)	Różnica w pionie	
	T [°C]	O ₂ [mg·dm ⁻³]
A (rzeczna)	7,6	3,7
F (prześciowa)	13,6	2,4
E (jeziorna)	14,7	2,4

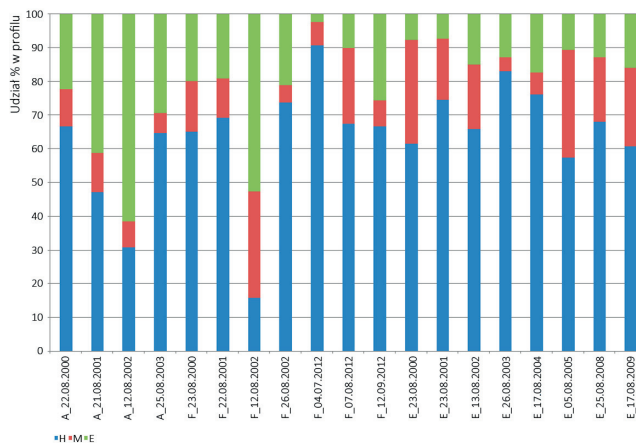
w zbiorniku Solina różnica ta sięgała nawet 14,7°C. Zmianom temperatury towarzyszyło niewielkie pionowe zróżnicowanie stężenia tlenu (do 3,7 mg O₂·dm⁻³), co świadczy o dobrych warunkach tlenowych w zbiorniku (tab. 8).

Na rysunkach 4 i 5 widać rozkład warstw termicznych w zbiorniku Solina. Zobrazowano sytuację każdego pomiaru w czasie letniej stagnacji z uwzględnieniem stref zbiornika (ppk A, F, E). Rysunek 4 przedstawia w skali bezwzględnej zasięgi poszczególnych pionów hydrometrycznych, a na tym tle zasięgi epilimnionu. Jak widać poszczególne profile głębokościowe wzrastają w miarę zbliżania się do zapory, co jest naturalną konsekwencją asymetrii przekroju podłużnego misy zbiornika (Kajak 2001; Kasza 2009). Jednocześnie jednak zasięg najbardziej nagrzewającej się warstwy – epilimnionu – utrzymuje się na zbliżonym poziomie we wszystkich ppk. Można zatem wnioskować, że przepływowość zbiornika (ruch poziomy wody) ogranicza stopień przenikania ciepła i ogrzewania się dolnych warstw wody. O wpływie stagnacji wód na absorpcję promieniowania ciepła



Rys. 4. Głębokości pionu hydrometrycznego i zasięgi epilimnionu w ppk A, F i E.

Fig. 4. The depths of the hydrometric plumb and epilimnion ranges of A, F, E mcp.



Rys. 5. Udział procentowy epi-, meta- i hypolimnionu w pionie hydrometrycznym ppk A, F i E.

Fig. 5. Percentage share of epi-, meta- and hypolimnion in the hydrometric plumb of A, F, E mcp.

nego i ogrzewanie się wody piszą m.in. Biedka, Dzienis (2009), Halaś i in. (2019). Rysunek 5 obrazuje z kolei udział procentowy poszczególnych warstw termicznych (H, M, E) w pionie hydrometrycznym. Wyraźnie widać, że warstwa wody zimnej (hypolimnion) występuje w każdym ppk zbiornika Solina, przy czym największy jego zasięg dotyczy strefy przejściowej i jeziornej.

Miejsce gwałtownych zmian temperatury w pionie oznacza występowanie warstwy metalimnionu (M), tj. skoku termicznego. Na podstawie analiz zmian temperatury w pionie każdego z ppk, określono zakres głębokościowy i grubość tej warstwy oraz średni gradient temperatury [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$], czyli jej spadek wraz z głębokością (tab. 9).

Uśrednienie wartości z pojedynczych pomiarów dla poszczególnych ppk pozwala zauważyć następujące prawidłowości: średnia temperatura metalimnionu w kolejnych

Tabela 9. Termiczno-głębokościowa charakterystyka metalimnionu (M).

Table 9. Thermal-depth characteristics of the metalimnion (M).

ppk (strefa zbiornika)	Data pomiaru	Temperatura średnia [°C]	Zakres temperaturowy [°C]	Gradient temperatury [°C·m ⁻¹]	Zakres głębokościowy [m]	Grubość [m]
A (rzeczna)	22.08.2000	22,6	23,8-20,9	1,45	4-6	2
	21.08.2001	20,2	21,3-19,2	1,05	7-9	2
	12.08.2002	21,4	21,7-21,1	0,60	8-9	1
	25.08.2003	19,3	20,9-17,7	3,20	5-6	1
F (przełściowa)	23.08.2000	22,1	24,2-20,3	1,30	4-7	3
	22.08.2001	21,2	23,3-19,2	1,37	5-8	3
	12.08.2002	15,7	22,1-9,5	2,10	10-16	6
	26.08.2003	18,1	18,6-17,6	1,00	4-5	1
	04.07.2012	21,7	25,3-17,8	2,50	1-4	3
	07.08.2012	19,3	24,2-14,8	1,04	4-13	9
E (jeziorna)	12.09.2012	18,0	19,5-16,3	1,07	10-13	3
	23.08.2000	16,3	23,4-10,7	0,79	4-20	16
	23.08.2001	19,8	23,1-17,0	0,61	4-14	10
	13.08.2002	14,9	22,0-8,5	1,50	7-16	9
	26.08.2003	16,7	18,9-15,0	1,95	6-8	2
	17.08.2004	19,5	21,3-17,5	1,27	8-11	3
	05.08.2005	17,0	19,8-14,1	0,38	5-20	15
	25.08.2008	18,2	21,0-16,0	0,56	6-15	9
17.08.2009	17,7	21,6-14,1	0,58	9-22	13	

strefach zbiornika malała (ppk A 20,9°C, ppk F 19,4°C, ppk E 17,5°C); towarzyszył temu malejący średni gradient temperatury metalimnionu (ppk A 1,58°C·m⁻¹, ppk F 1,48°C·m⁻¹, ppk E 0,96°C·m⁻¹); jednocześnie średnia grubość warstwy metalimnionu rosła (ppk A 1,5 m, ppk F 4,0 m, ppk E 9,6 m).

Wnioski

Analizy przeprowadzone na podstawie zgromadzonego zasobu danych, pozwoliły zauważyć następujące prawidłowości.

1. Zbiornik Solina odznacza się skomplikowaną morfologią. Rozczłonkowanie i wielodzielny układ masy świadczą o wieloakwenowości i częściowo autonomicznym funkcjonowaniu izolowanych części. Strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej nie da się łatwo i jednoznacznie wydzielić. Przypuszczać można, że różnice warunków w poszczególnych strefach odzwierciedlają wytypowane do analiz ppk: A, F, E.
2. Specyficzna morfometria zbiornika Solina, czyli wieloakwenowość oraz strefowość wynikająca z budowy i przepływowego charakteru, wywiera istotny wpływ na róż-

- nicowanie relacji pomiędzy temperaturą wody a zawartością tlenu rozpuszczonego w wodzie.
3. Wysokie wartości współczynników korelacji stężeń tlenu i temperatur potwierdzają współzależność obu parametrów. Synchroniczna analiza warunków termicznych i tlenowych, uzasadniona wzajemną zależnością, pozwala wykazać wpływ kształtu zbiornika na dynamikę przemieszczania się mas wodnych.
 4. Wysokie średnie stężenia tlenu podczas letniej stagnacji w pionach hydrometrycznych każdej ze stref świadczą o zdolnościach zbiornika do neutralizowania dopływających zanieczyszczeń, a więc wysokiej odporności na degradację. Zaś fakt istnienia tej sytuacji na przestrzeni lat świadczy o stabilnych i zrównoważonych warunkach zlewniowych i zbiornikowych. Niższe niż w pozostałych strefach średnie stężenie tlenu w strefie rzecznej wynika m.in. z rozkładu materii organicznej przyniesionej rzeką ze zlewni.
 5. Duży zakres zmian temperatury, przy jednoczesnym małym zakresie zmian stężenia tlenu podczas letniej stagnacji w strefie jeziornej, wskazuje na hypolimnion o dużej miąższości.
 6. W warunkach wielostrefowych, rozwiniętych zbiorników przepływowych, istotną rolę w kształtowaniu korzystnego bilansu tlenowego w okresie letniej stagnacji może odgrywać hypolimnion o dużej miąższości.

Tabele i rysunki, przy których nie zamieszczono źródeł, stanowią opracowanie własne autora artykułu.

L i t e r a t u r a

- Absalon D., Kostecki M., Łaszczycza P., Matysik M., Ruman M., 2014, Ciągły monitoring automatyczny a monitoring klasyczny – alternatywa czy dopełnienie metod oceny jakości wody, *Gospodarka Wodna*, 8, 296-299
- Bartoszek L., 2015, Krążenie fosforu między wodą naddenną a osadem w ekosystemie zbiornika zaporowego Solina, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, XXXI (62), 137-48, DOI: 10.7862/rb.2015.93
- Bartoszek L., Czech D., 2014, Podatność na degradację zbiornika zaporowego Solina, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, XXXI (61), 35-53, DOI:10.7862/rb.2014.125
- Bartoszek L., Gruca-Rokosz R., Koszelnik P., 2017, Analiza skuteczności odmulniania zbiorników wodnych Cierpisz i Kamionka jako efektywnej metody rekultywacji ekosystemów eutroficznych, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 19, 600-617
- Bartoszek L., Koszelnik P., 2014, Zagrożenie eutroficzne wód podkarpackich zbiorników wodnych Kamionka i Ozanna, [w:] *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, Z. Dymczewski, J. Jeż-Walkowiak (red.), PZITS O/Wielkopolski, Poznań, 213-229
- Biedka P., 2013, Wpływ zmian temperatury na przebieg procesów związanych z eutrofizacją jezior, *Ekonomia i Środowisko*, 2 (45), 242-254

- Biedka P., Dzienis L., 2009, Modelowanie zmian stężenia tlenu rozpuszczonego w wodach jezior, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 11, 849-860
- Dojlido J.R., 1995, *Chemia wód powierzchniowych*, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok
- Dorochowicz A., Zega A.M., Łydka J., 2006, Ocena stanu czystości Jeziora Hańcza na podstawie badań z 2005 r., *Komunikat 2/2006*, Suwałki, IOŚ WIOŚ w Białymstoku, Dział Monitoringu Środowiska
- Drożdżik A., 2019, *Specyfika przebiegu eutrofizacji i kształtowania się jakości wód w zbiornikach zaporowych*, Rozprawa doktorska, WGGiIŚ AGH, Kraków
- Dynowska I., Maciejewski M. (red.), 1991, *Dorzecze górnej Wisły. Część II*, PWN, Warszawa-Kraków, 282 s.
- Dz.U. 2017, poz. 1566 ze zm., Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne, Sejm RP, Internetowy Spis Aktów Prawnych
- Ficek D., 2013, Właściwości biooptyczne wód jezior Pomorza oraz ich porównanie z właściwościami wód innych jezior i Morza Bałtyckiego, *Rozprawy i Monografie* 23, 27-35
- Garbacz J.K., Cieściński J., Ciechalski J., Dąbkowski R., Cichowska J., 2018, Warunki termiczno-tlenowe Jeziora Charzykowskiego w latach 2014-2016, *Polish Hyperbaric Research*, 1 (62), 85-96, DOI: 10.2478/phr-2018-0007
- Gierszewski P., 2018, Hydromorfologiczne uwarunkowania funkcjonowania geosystemu Zbiornika Włocławskiego, *Prace Geograficzne IGIPZ PAN*, 268, 96-98
- Gierszewski P., Miler K., Kaszubski M., 2015, Charakterystyka stratyfikacji termicznej i chemicznej wód jeziora Ostrowite (PNBT) w roku 2015, *Journal of Education, Health and Sport*, 5 (12), 217-229, DOI: 10.5281/zenodo.35354
- Gierszewski P.J., Zakonnov V.V., Kaszubski M., Kordowski J., 2017, Transformacja właściwości wody i osadów w profilu podłużnym zbiorników zaporowych Kaskady Górnej Wołgi, *Przegląd Geograficzny* 89 (3), 391-412, DOI: 10.7163/PrzG.2017.3.3
- Gołdyn R., Messyasz B., Kowalczevska-Madura K., Cerbin S., 2018, Stan jakości wód Jeziora Durowskiego w roku 2018, *Opracowanie dla Urzędu Gminy w Wągrowcu*, Poznań
- Goszczyński J., 2020, Stan czystości Jeziora Borówno, *GIOŚ*, Bydgoszcz
- Halaś A., Czarnecka K., Piasecki K., Łaszewski M., 2019, Przestrzenne i sezonowe zróżnicowanie wybranych parametrów jakości wody w zlewni zurbanizowanej na przykładzie Potoku Służewickiego, *Przegląd Geograficzny*, 91 (1), 121-138, DOI: 10.7163/PrzG.2019.1.6
- Jaguś A., Rzętała M., 2009, Kształtowanie jakości wód zbiorników zaporowych w warunkach antropresji rolniczej, *Proceedings of ECOpole*, 3 (2), 471-476
- Jawecki B., Kowalczyk T., Malczewska B., 2008, Wpływ temperatury powietrza na natlenienie strefy eufotycznej stawu karpiego, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 9, 195-206
- Jokiel P., Marszelewski W., Pociask-Karteczka J., 2017, *Hydrologia Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 240-255
- Kajak Z., 2001, *Hydrobiologia-limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Kasza H., 2009, *Zbiorniki zaporowe. Znaczenie - eutrofizacja - ochrona*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała

- Kolada A., Pasztaleniec A., Bielczyńska A., Ochocka A., Kutyla S., Zalewska T., Panek P., 2018, Wskaźniki fizykochemiczne w ocenie stanu ekologicznego wód powierzchniowych – weryfikacja standardów środowiskowych, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa
- Kostecki M., 2014a, Changes in oxygen conditions in Pławniowice Reservoir as a result of restoration with hypolimnetic withdrawal method, *Archives of Environmental Protection*, 40, 2, 53-63
- Kostecki M., 2014b, Rekultywacja antropogenicznego zbiornika wodnego Pławniowice metodą usuwania hypolimnionu – studium limnologiczne, IPIŚ PAN, Zabrze, 60 s.
- Koszelnik P., Bartoszek L., 2011, Retencja związków biogenych w zbiornikach zaporowych górnego Sanu, [w:] *Turystyka wiejska, ochrona środowiska i dziedzictwo kulturowe Pogórza Dynowskiego*, J. Krupa, T. Soliński (red.), Związek Gmin Pogórza Dynowskiego, Dynów, 139-147
- Kowal A.L., 1977, *Technologia wody*, Arkady, Warszawa
- Kurzaj M., Wąsicki A., Susek P., 2017, Stan czystości jeziora Rudno na podstawie badań WIOŚ w Zielonej Górze zrealizowanych w latach 1991-2015, *WOŚ w Zielonej Górze*, Zielona Góra
- Lampert W., Sommer U., 1996, *Ekologia wód śródlądowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Lewkiewicz-Małysa A., Macuda J., 2008, Ocena jakości wód powierzchniowych dopływających do Zbiornika Solina, *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 25, 2, 447-452
- Marzolf G.R., Robertson D.M., 2005, Reservoirs, [w:] *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 4, 9, John Wiley & Sons
- Moniewski P., 2015, Rola zbiorników wodnych w kształtowaniu cech fizykochemicznych wód rzecznych na przykładzie Ciosenki, *Prace i Studia Geograficzne*, 58, 7-23
- Picińska-Fałtynowicz J., Błachuta J., 2012, Wytyczne metodyczne do przeprowadzenia monitoringu i oceny potencjału ekologicznego zbiorników zaporowych w Polsce, Wersja 2012, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa
- Prus T., Prus M., Prus P., Ozimek T., 2005, Charakterystyka ekologiczna zbiorników zaporowych Solina i Myczkowce na Sanie, [w:] *Ochrona środowiska, walory przyrodnicze i rozwój turystyki w dolinie Sanu*, II Konferencja Naukowo-Techniczna „Błękitny San”, Związek Gmin Turystycznych Pogórza Dynowskiego, 33-47
- Prus P., Prus M., Klekowski R.Z., 2006, Retencja pierwiastków biogenicznych oraz produkcja pierwotna i wtórna jako wskaźniki stabilności ekosystemu zbiorników zaporowych Solina i Myczkowce, III Konferencja Naukowo-Techniczna „Błękitny San”, Dubiecko, 21-22 kwietnia 2006, 163-183
- Ptak M., Nowak B., 2016a, Warunki termiczno-tlenowe Jeziora Białego Włodawskiego w półroczu letnim (2012-2015), *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B*, LXXI (1), 61-71, DOI: 10.17951/b.2016.71.1.61
- Ptak M., Nowak B., 2016b, Warunki termiczno-tlenowe Jeziora Lucieńskiego (centralna Polska), *Acta Geographica Silesiana*, 22, 59-64
- Ptak M., Nowak B., 2017, Charakterystyka wybranych parametrów fizyczno-chemicznych Jeziora Gostomie (Puszcza Notecka), *Badania Fizjograficzne. Seria A: Geografia Fizyczna*, (A 68), 139-148, DOI: 10.14746/bfg.2017.8.10
- Radwan S., Kowalczyk Cz., 1979, Chemizm trzech odmiennych troficznie jezior Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio C*, XXXIV (19), 229-260

- Ruman M., Absalon D., Matysik M., 2013, Innowacyjne rozwiązania w monitoringu jakości wód powierzchniowych, [w:] *Ekoinnowacje w Polsce*, L. Woźniak, A. Kanabrocka, M. Hejduk (red.), Izba Gospodarcza „Grono Targowe Kielce”, 72-82
- Rybacki P., Ratajczak J., Osuch E., Osuch A., 2016, Analiza procesu inaktywacji jonów fosforowych w wodzie Jeziora Durowskiego, *Inżynieria Ekologiczna*, 47, 33-39, DOI: 10.12912/23920629/62844
- Starmach K., 1973, *Wody śródlądowe. Zarys hydrobiologii*, Wydanie II poprawione, Skrypt UJ, Kraków
- Szłapa M., 2019, Warunki tworzenia i zmian morfo-dynamiki cofkowej strefy zbiornika wodnego, na przykładzie zbiornika Dobczyce na rzece Rabie, *Rozprawa doktorska, WIŚPK*, Kraków
- Szpakowski J., 1995, Jakość wód ujmowanych ze zbiorników Solina i Myczkowce, *Ochrona Środowiska*, 3 (58), 29-30

S t r e s z c z e n i e

Artykuł dotyczy problematyki kształtowania się warunków termiczno-tlenowych w zbiorniku Solina. Zbiorniki zaporowe stanowią specyficzny typ akwenów, ale mimo że wykazują cechy pośrednie wód lotycznych i lenitycznych, to przez ustawodawcę zostały jednoznacznie zdefiniowane jako wody płynące. Wieloakwenowa budowa zbiornika Solina sugeruje pewną autonomiczność funkcjonowania poszczególnych części oraz brak możliwości łatwego wydzielenia strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej. Skomplikowana morfologia wpływa na rzeczywisty czas retencji, który determinuje charakter procesów fizyczno-chemiczno-biologicznych. Roczna dynamika mas wodnych w zbiorniku obejmuje cyrkulację wód w czasie homotermii (wiosną i jesienią) i ich stagnację w czasie stratyfikacji (latem i zimą). Analiza warunków termiczno-tlenowych podczas cyrkulacji (w kwietniu) i stagnacji (w sierpniu) pozwoliła stwierdzić dobre warunki tlenowe w zbiorniku we wszystkich badanych terminach w każdej ze stref. Nigdy nie doszło do wyczerpania tlenu i powstania warunków beztlenowych. W warstwie powierzchniowej pojawiały się niejednokrotnie przesylenia wody tlenem. Zdiagnozowano każdy typ krzywej tlenowej (orto-, klino-, heterogradę dodatnią i ujemną). Warstwy termiczne były wyraźnie wykształcone, zwłaszcza w strefie przejściowej i jeziornej. Zaznaczał się głęboki hypolimnion, rosnąca ku zaporze średnia grubość metalimnionu przy jednoczesnym malejącym średnim gradiencie jego temperatury, epilimnion zaś pozostawał warstwą o zbliżonej grubości w każdej ze stref.

Słowa kluczowe: warunki termiczno-tlenowe, zbiornik Solina, pion hydrometryczny, krzywa tlenowa, warstwa termiczna.

S u m m a r y

The article deals with the issues of thermal and oxygen conditions in the Solina reservoir. Dam reservoirs are a specific type of water reservoirs because they combine the features of flowing and stagnant waters. Despite this, Polish law classifies them as inland flowing waters. The Solina reservoir is

characterized by a multi-body water structure and there is no possibility of easy and unambiguous separation of the reservoir zones (riverine zone, transitional zone and lacustrine zone). Nevertheless, selected measurement-control points included in the analysis seems to reflect spatial differences and a slight autonomy in the functioning of individual parts. The complicated structure of the reservoir affects the actual retention time, which determines the nature of the physicochemical and biological processes. The rate of water flow through the reservoir determines the absorption of solar radiation and, together with the ambient temperature, affects the temperature of the water. This, in turn, affects the solubility of oxygen in water. The annual dynamics of water masses in reservoirs of the temperate climate zone is characterized by a dimictic nature – it includes the circulation of waters during homothermia (spring and autumn) and their stagnation during stratification (summer and winter). The analysis of thermal-oxygen conditions in the Solina reservoir covered the period of circulation (April) and stagnation (August). Each type of oxygen curve was found (orthograde, clinograde, positive heterograde and negative heterograde), and the decrease in oxygen concentration was never associated with the formation of anaerobic conditions. The analysis of water saturation with oxygen allows to notice supersaturation especially in the transitional and lacustrine zone during stagnation. April measurements reflecting the state of homothermia indicate good mixing of waters and homogeneity of temperature and oxygen concentration conditions in the whole hydrometric plumb. Due to the turbulent nature of the flow, which is especially visible in the riverine zone, while in transitional and lacustrine zones, slight thermal differentiation is noticeable even then. August measurements show thermal stratification. The decrease in temperature with depth is usually accompanied by a decrease in oxygen concentration resulting from its consumption in the decomposition process. The lower average concentration of oxygen in the riverine zone results from its consumption on the decomposition of organic matter deposited by the river from the catchment area. The temperature variability in the hydrometric plumbs of successive zones of the reservoir (riverine, transitional, lacustrine) increased both during homothermia and stratification, with a simultaneous decreasing variability of oxygen concentration. The variability of both these parameters during stagnation (August) in the lacustrine zone proves a well-developed hypolimnion. All thermal layers clearly developed during the stagnation, which was best visible in the transitional zone and in the lacustrine zone. The range of the hypolimnion towards the dam increased, what is related to the increasing depth of the reservoir. The average thickness of the metalimnion also increased, while the average temperature gradient of this layer was decreasing. The surface layer of warm water – epilimnion – had a similar range in each of the zones.

Keywords: thermal-oxygen conditions, Solina reservoir, hydrometric plumb, oxygen curve, thermal layer.