

CHARAKTERYSTYKA FIZYCZNO-CHEMICZNO-GEOLOGICZNA  
OSADÓW DENNYCH JEZIORA RZUNO

JAN TROJANOWSKI<sup>1</sup>, JANUSZ BRUSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pomorska Akademia Pedagogiczna, Zakład Chemii Środowiskowej, 76-200 Słupsk, ul. Arciszewskiego 22

<sup>2</sup> Gimnazjum, 83-425 Dziemiany, ul. Wyzwolenia 20

KOMUNIKAT

Keywords: Rzuno lake, bottom sediments, physical properties, chemical composition.

CHEMICAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENT  
TOP LAYER IN RZUNO LAKE

Physical analysis of the 15-cm top layer of the Rzuno lake bottom sediments showed that their properties changed adequate by depth. They changed from granular structure, in the lakes shallow parts, to amorphous structure, in the lakes deeper parts, from light color to almost black and from loose to gelatinous consistence.

Chemical investigation of this lake bottoms sediments showed that their main components is silica (more than 50% of dry matter of sediments), therefore these bottom sediments were classified as silicate sediments. Organic matter was another essential component of these sediments. The content of organic matter increased adequate by depth from 7% to 36%.

The investigated sediments exhibited small contents of nitrogen (about 0.6%), with predominance of organic nitrogen. They make up are characterized by small phosphorus contents (about 0.06%), with similar amount of inorganic and organic phosphorus.

The content of metals (Ca, Mg, Fe, Al, Mn) was also small in the investigated sediments. Correlation analysis showed that iron ions precipitate phosphate phosphorus from water and accumulate it in sediments.

The material deposited in bottom sediments of Rzuno lake in mainly of an autochthonous origin.

The chemical composition of bottom sediments of Rzuno lake, as well as its comparison with other lakes, show that this lake is moderately eutrophic.

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

Analiza fizyczna 15 cm warstwy osadów dennych jeziora Rzuno wykazała, że ich charakter zmieniał się wraz z głębokością, od struktury ziarnistej, w płytszych partiach jeziora, do struktury amorficznej w głębszych partiach, od barwy jasnej do prawie czarnej i od konsystencji sypkiej do galaretowatej.

Badania chemiczne osadów dennych tego jeziora wykazywały, że głównym składnikiem jest krzemionka ponad 50% suchej masy osadu, dlatego też osady te zakwalifikowano do osadów krzemianowych. Drugim istotnym składnikiem była materia organiczna, której zawartość wzrastała wraz z głębokością, od około 7% do 36%.

Badane osady charakteryzują się niską zawartością azotu (około 0,6%), przy czym dominującą formę stanowi azot organiczny. Charakteryzują się również niską zawartością fosforu (około 0,06%), przy podobnej ilości fosforu organicznego i nieorganicznego.

Zawartość metali (Ca, Mg, Fe, Al, Mn) jest również niewielka. Analiza korelacyjna wykazała, że jony żelaza odgrywają istotną rolę w akumulacji fosforu fosforanowego w osadach dennych badanego jeziora.

Materiał odkładany w osadach dennych badanego jeziora jest głównie pochodzenia autochtonicznego. Skład chemiczny osadów dennych jeziora Rzuno, jak również analiza porównawcza z innymi jeziorami wskazują, że jest to umiarkowanie eutroficzne jezioro.

## WSTĘP

Wzmoczone procesy eutrofizacji wód są determinowane między innymi czynnikami antropogenicznymi, w tym rolniczym użytkowaniem gruntów położonych w zlewni. W konsekwencji spływów powierzchniowych obserwuje się zwiększenie stężenia składników biogenicznych oraz zanieczyszczeń w wodach jezior. W rezultacie nasilenia procesu eutrofizacji, obserwuje się obok zmian w toni wodnej również zmiany ilościowe oraz jakościowe osadów dennych jezior.

Osady dennie dostarczają wiele cennych informacji o aktualnym stanie jezior oraz ich przeszłości. Tempo nagromadzania osadów, ich struktura fizyczna i skład chemiczny zależą od wielu czynników, a przede wszystkim od właściwości zlewni. Przedmiotem wielu podejmowanych badań są procesy akumulacji ładunku substancji biogenicznych oraz zanieczyszczeń spływających ze zlewni do wód jezior [5, 11, 33]. Osady dennie odgrywają istotną rolę w procesie eutrofizacji nie tylko ze względu na usuwanie substancji biogenicznych, ale też na ich recyrkulację. Uwalnianie tych substancji z osadów jest procesem bardzo skomplikowanym i uzależnionym od wielu czynników [1, 3, 23]. Stwierdzono, że przynajmniej 20% azotu organicznego z osadów powraca do wód [15]. Ilości uwalnianego fosforu mogą osiągać wartości od kilku do kilkudziesięciu  $\text{mg m}^{-2}$  [13]. Biorąc pod uwagę fakt, że 90% ogólnej ilości fosforu i azotu w całym ekosystemie zdeponowanych jest w osadach dennych [13, 14], to w sprzyjających warunkach atmosferycznych i miktycznych stanowią istotne źródło substancji biogenicznych dla strefy trofogenicznej.

Osady dennie wpływają na przebieg wielu procesów zachodzących w specyficznych warunkach wodnych [2, 7]. Stanowią one ponadto środowisko życia wielu organizmów bentonicznych, których działalność ułatwia przemiany i obieg materii między dnem a tonią wodną i dlatego są ważnym składnikiem ekosystemów jeziornych [34].

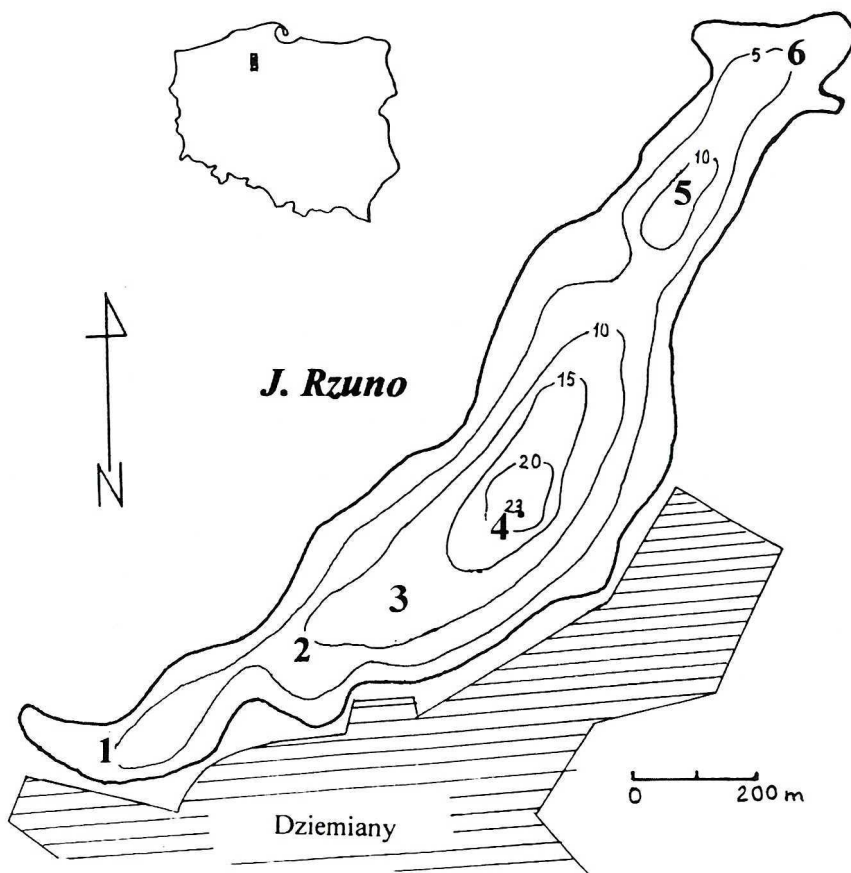
Celem prezentowanej pracy była charakterystyka chemiczna osadów dennych jeziora Rzuno w oparciu o wybrane wskaźniki oraz określenie wpływu zlewni na ich poziom w osadzie. Jezioro to nie doczekało się dotychczas żadnego opracowania w literaturze naukowej. Prowadzone były jedynie sporadyczne badania rutynowe przez placówki ochrony środowiska [8].

## CHARAKTERYSTYKA JEZIORA

Jezioro Rzuno jest niewielkim zbiornikiem znajdującym się na terenie Pojezierza Kaszubskiego. Ma ono charakter rynnowy i położone jest w wąwozie. Po zachodniej stronie jeziora brzegi, pokryte lasem, wznoszą się na około 30 m ponad poziom zwierciadła wody. Na wzniesieniach po stronie południowo-wschodniej znajduje się miejscowość Dziemiany (Rys. 1). W części północno-wschodniej jeziora również rozciąga się las.

Dane limnometryczne jeziora Rzuno podano w tabeli 1. Jezioro Rzuno ma wydłużony kształt o osi przebiegającej w kierunku północno-zachodnim. Jest to jezioro

głębokie o średniej głębokości 7,9 m i maksymalnej 23,0 m w środkowej części jeziora. Jezioro to jest silnie stratyfikowane [34].



Rys. 1. Batymetria i rozmieszczenie stanowisk poboru prób (1–6) na jeziorze Rzuno  
Location of sampling stations (1–6) and batymetric in Lake Rzuno

## MATERIAŁY I METODY

Badania prowadzono na sześciu stanowiskach kontrolnych w roku 1999 i 2000. Stanowiska badawcze rozmieszczone były wzdłuż osi jeziora (Rys. 1). Próby osadów dennych do badań pobierano przy pomocy czepaka Ekmana, po trzy próby z każdego stanowiska.

Wodę nadosadową ostrożnie zlewano. Wodę interstycjalną oddzielono odsączając świeży osad przez gazę młyńską. W pozostałym osadzie oznaczono wilgotność i poddano go suszeniu w temperaturze pokojowej. Próby do oznaczeń związków fosforu i azotu przechowywano w temp. 4°C w szczelnie zamkniętych pojemnikach.

Tabela 1. Cechy limnologiczne jeziora Rzuno opisane przez IRŚ w Olsztynie  
Limnometric characteristics of Lake Rzuno (after IRŚ in Olsztyn)

Właściwości jeziora The lake's characteristics	Wartości Values
Powierzchnia (ha) Area	34,8
Objętość (tys. m <sup>3</sup> ) Volume	2753,4
Głębokość maksymalna (m) Maximal depth	23,0
Średnia głębokość (m) Mean depth	7,9
Wskaźnik głębokościowy Index of depth	0,34
Maksymalna długość (m) Maximal length	1610
Maksymalna szerokość (m) Maximal width	325
Wydłużenie Elongation	4,9
Długość linii brzegowej (m) Shor line of lake basin	4130
Współrzędne geograficzne: Geographic coordinates:	
szerokość N – latitude N	54°00,9'
długość E – longitude E	17°46,4'
wysokość n.p.m. (m) Altitude above sea level	152,3

W pobranych próbach osadów dennych, po wysuszeniu, wykonano analizy poszczególnych składników.

Węglały oznaczono metodą objętościową w oparciu o wydzielający się dwutlenek węgla w wyniku traktowania osadu roztworem kwasu solnego (HCl) [10]. Substancję organiczną oznaczono jako stratę przy prażeniu naważek wysuszonego osadu w temp. 450°C [20]. Zawartość węgla organicznego określano dwoma sposobami. Pierwszy – utleniając węgiel organiczny przy pomocy dwuchromianu potasu [10], drugi – mnożąc stratę przy prażeniu przez współczynnik 0,47 [21, 22]. Krzemionkę i nierozpuszczalne składniki oznaczono przez stapianie osadów z bezwodnym węglanem sodu i bezwodnym węglanem potasu w stosunku 1 : 1. W roztworze po oddzieleniu krzemionki oznaczono kompleksometrycznie wapń, magnez, żelazo i glin. W celu oznaczenia fosforu ogólnego próbę mineralizowano w mieszaninie kwasu siarkowego(VI) i chlorowego(VII), a następnie oznaczono metodą spektrofotometryczną przy pomocy molibdenianu amonu w obecności kwasu askorbinowego jako reduktora [6]. Fosfor fosforanowy oznaczano spektrofotometrycznie po wytrząsaniu osadów z mieszaniną H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i NH<sub>4</sub>F, a następnie po ogrzaniu reszty w roztworze NaOH [6]. Azot ogólny oznaczono metodą Kiejldahla [10]. Azot amonowy oznaczono spektrofotometrycznie metodą indofenolową, a azot azotanowy stosując kwas dwufenylosulfonowy również spektrofotometrycznie.

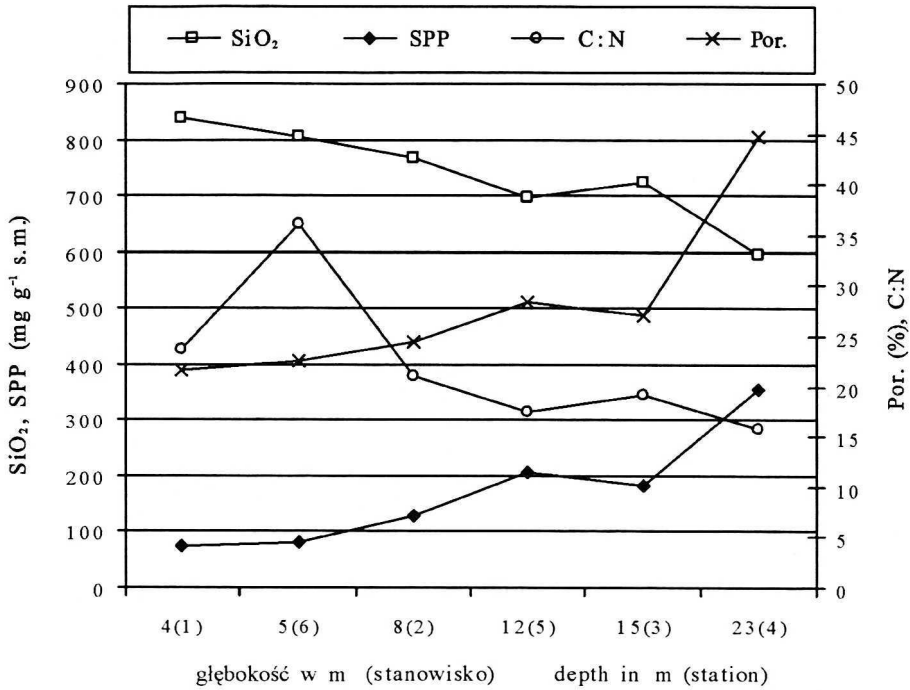
Skład granulometryczny oznaczono w oparciu o metodę areometryczną w modyfikacji Prószyńskiego oraz metodą sitową i frakcjonowania [19]. Zawartość poszczególnych frakcji jak i składników chemicznych podano w gramach lub miligramach na 1 gram suchej masy osadu dennego ( $\text{g g}^{-1}$  s.m. lub  $\text{mg g}^{-1}$ s.m.).

## WYNIKI I ICH DYSKUSJA

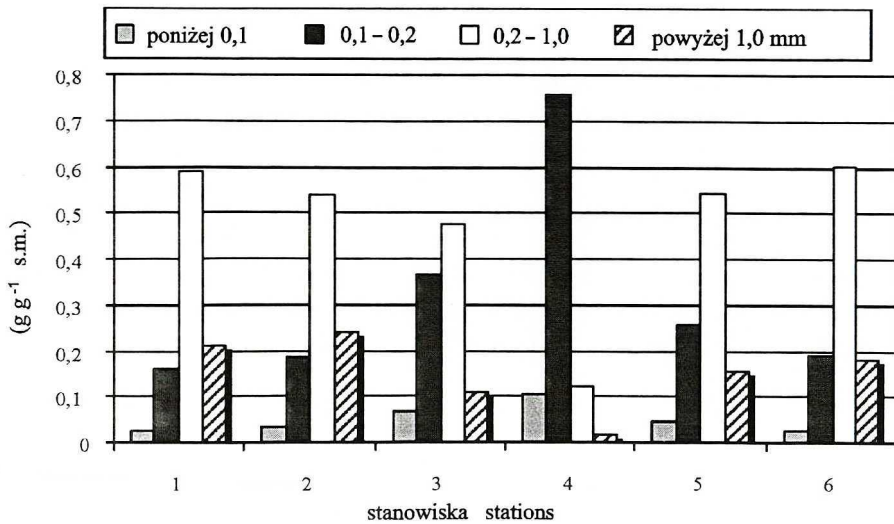
Głównym składnikiem badanych osadów jeziora Rzuno są krzemiany (od 54,8% na stanowisku 4 do 86,2% na stanowisku 1). Rozkład zawartości  $\text{SiO}_2$  w zależności od głębokości jeziora obrazuje rysunek 2. Wraz z głębokością jeziora zmienia się również wilgotność osadów dennych. Osady ze stanowiska 4 o największej głębokości charakteryzują się najwyższą wilgotnością 73,5%, a ze stanowiska 1 – najniższą 25,2%. Korelacja między zawartością krzemionki i wilgotnością w badanych osadach była bardzo silna ( $r = -0,92$ , przy poziomie istotności 0,05 i  $n = 34$ ). Z dokonanych obserwacji wynika, że struktura osadów dennych jeziora Rzuno zmienia się z głębokością jeziora. Osady litoralowe (st. 1) mają strukturę ziarnistą na skutek obecności ziaren piasku pochodzącego z abrazji brzegów. Osady w strefie sublitoralowej (st. 2 i 6) są grubogruźkowate, na stokach basenu (st. 3) – drobnogruźkowate, a w obrębie najgłębszych partii dna (st. 4 i 5) mają strukturę amorficzną. Przyczyny zmieniającej się struktury są bardzo złożone. Składają się na nie: różny skład chemiczny osadów i odmienny stopień rozkładu materii organicznej, która sama jest elementem bardzo złożonym.

W porównaniu z innymi jeziorami o zbliżonej eutrofizacji [29] jezioro Rzuno charakteryzowało się wysoką zawartością krzemionki i w związku z tym większą część dna tego jeziora pokrywają osady piaszczyste. Osady do około 10 m głębokości jeziora (st. 1, 2 i 6) charakteryzowały się dominującym udziałem cząstek o rozmiarach 0,2–1,0 mm – przeciętnie  $0,65 \text{ g g}^{-1}$ s.m. suchej masy osadu (Rys. 3). W związku z tym gęstość właściwa ( $d$ ) osadów dennych na tych stanowiskach była najwyższa i oscylowała w przedziale od  $1,523$  do  $1,868 \text{ g cm}^{-3}$  (Rys. 4). Porowatość tych osadów była niska i wynosiła średnio 24% (Rys. 2). Znacznie mniejszą zawartością cząstek o tych rozmiarach charakteryzują się osady jeziora Jamno (ok.  $0,45 \text{ g g}^{-1}$ s.m.), jeziora Gardno (ok.  $0,50 \text{ g g}^{-1}$ s.m.) [33]. Jedynie na stanowisku 4 cząstki o tych rozmiarach stanowiły zaledwie 17% ogólnej masy, natomiast dominowały cząstki o rozmiarach 0,1–0,2 mm i udział ich przekraczał 70% (Rys. 3). Na stanowiskach 1, 2 i 6 frakcje badanych osadów, zawierające cząstki o tych rozmiarach, stanowiły około 11%, a mniejsze niż 0,1 mm, typowe dla ilów, stanowiły około 3%. Na przykład osady dennie jezior Klasztorne Duże i Małe [29] zawierają półtora razy więcej formy ilastej niż osady jeziora Rzuno. Jedynie na stanowisku 4, o największej głębokości, osady dennie charakteryzują się wysoką zawartością części ilastej (około  $0,70 \text{ g g}^{-1}$ s.m. cząstek o wymiarach od 0,1–0,2 mm). Wykazują one również największą porowatość ogólną (około 45%) i najmniejszą gęstość właściwą  $1,018 \text{ g cm}^{-3}$ . Natomiast porowatość osadów z płytszych stanowisk (1, 2 i 6) wynosi średnio 23% (Rys. 2).

Barwa badanych osadów wyraźnie zmienia się wraz z głębokością. Osady litoralowe (st. 1) cechują się kolorami jasnymi; przeważa kolor żółty i popielaty. Substancja organiczna, zabarwiająca zazwyczaj osady na czarno, ulega w tej strefie bądź to szybkiemu rozkładowi w dobrze natlenionych wodach, bądź też w procesie falowania sflukiwaniu w dolne partie jeziora. Im głębiej, tym barwa osadów stawała się ciemniejsza,



Rys. 2. Zawartość krzemionki (SiO<sub>2</sub>), strata po prażeniu (SPP) i porowatość (Por.) oraz stosunek węgla organicznego do azotu (C : N) w osadach dennych jeziora Rzuno  
The content of silica (SiO<sub>2</sub>), loss on ignition (SPP), porosity (Por.) and organic carbon to nitrogen ratio (C : N) in bottom sediments of Lake Rzuno



Rys. 3. Granulometryczna charakterystyka osadów dennych jeziora Rzuno (średnica ziarna podana w mm)  
Granulometric characteristics of bottom sediments in Lake Rzuno (diameter of grain in mm)

od ciemnozielonej na stanowisku 2 oraz 6 i oliwkowej na stanowisku 3 oraz 5 do prawie czarnej na stanowisku 4. W najgłębszych miejscach gromadzi się najwięcej materii organicznej [26]. Ze względu na okresowy brak tlenu w tych miejscach, w osadzie zachodzą procesy redukcji powodujące obniżanie się potencjału redox. Obecne na dnie zredukowane związki żelaza, występujące prawdopodobnie w postaci siarczku żelaza(II), są obok substancji organicznej główną przyczyną ciemnego zabarwienia osadów.

Wraz ze wzrostem głębokości zmieniała się konsystencja osadów dennych badanego jeziora. Osady litoralowe (st. 1) były sypkie a sublitoralowe (st. 2 i 6) bardziej zwarte. Natomiast osady z głębokości poniżej 10 m (st. 3 i 5) miały konsystencję galaretową, a z najgłębszych miejsc (st. 4) – mazistą. Osady te charakteryzowały się również największą wilgotnością (odpowiednio 53 i 73%). Z kolei wilgotność osadów litoralowych wynosiła średnio 16% a sublitoralowych 27%.

Prezentowane właściwości fizyczne osadów dennych jeziora Rzuno wskazują, że osady występujące poniżej 10 m głębokości (st. 3, 4 i 5) można zaliczyć do typu gyttii organicznej [13].

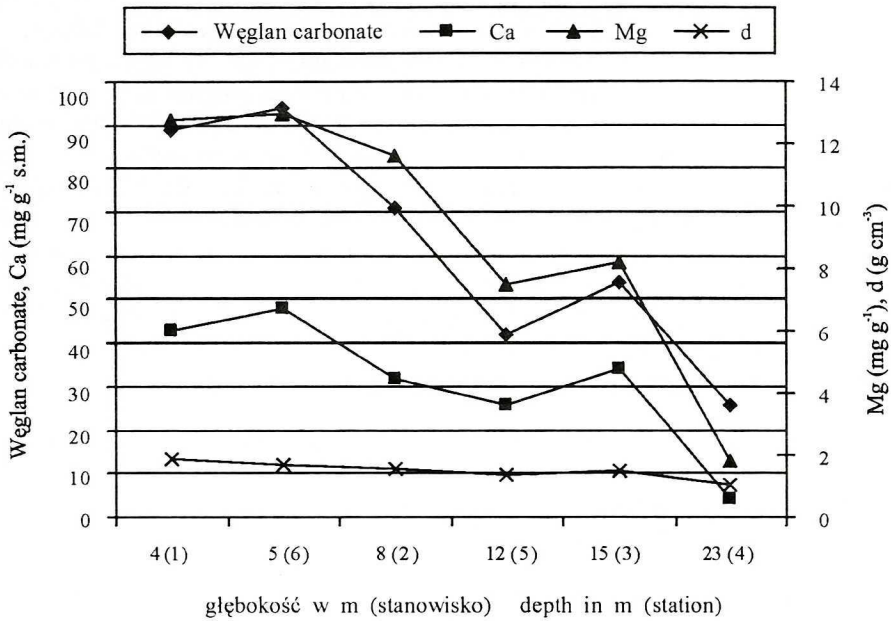
Pod względem cech fizycznych, tj. barwy, konsystencji i struktury, osady dennego jeziora Rzuno nie odbiegają w istotny sposób od osadów większości jezior, znanych z literatury [4, 5, 12, 24, 28].

Analiza chemiczna osadów dennych jeziora Rzuno wykazała różnice w zawartości analizowanych składników chemicznych w poszczególnych rejonach tego akwenu. Niewątpliwie przyczyną zróżnicowania osadów dennych w poszczególnych strefach jeziora przede wszystkim jest troficzny typ jeziora, ukształtowanie misy jeziornej, charakter zlewni.

Zgodnie z klasyfikacją M. Stangerberga [25] omawiane osady można zaliczyć do typu krzemianowego ponieważ zawartość  $\text{SiO}_2$  przekraczała  $500 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  (Rys. 2). Dla porównania w jeziorach Sukiel [27] i Gardno [33] występują również osady typu krzemianowego, natomiast w jeziorach Kortowskie [26] i Klasztorne Małe [9] – osady typu mieszanego.

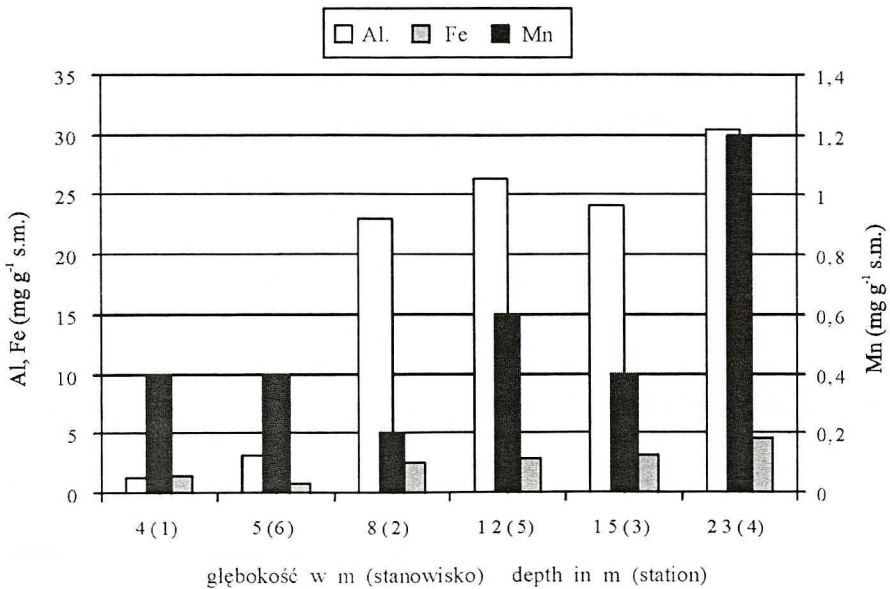
Strata po prażeniu (SPP) określająca w przybliżeniu zawartość materii organicznej [20] oscylowała od 63 na st.1 do  $368 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  na stanowisku 4 (Rys. 2). Materia organiczna była drugim co do wielkości składnikiem osadów dennych jeziora Rzuno i średnia jej zawartość wynosiła  $172 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  (Tab. 2). Na większości obszaru jeziora, do głębokości około 8 m (st. 1; 2 i 6), koncentracja materii organicznej była stosunkowo niska i wynosiła średnio  $94 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  Natomiast w rejonach o większej głębokości (st. 3, 4 i 5) strata po prażeniu była wysoka i średnio wynosiła  $280 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  Akumulacja materii organicznej w głębszych partiach jeziora jest faktem znanym i opisanym w literaturze [24, 28, 32], szczególnie gdy różnice w głębokości poszczególnych części jeziora są znaczne. Wówczas tworzący się osad powoli zsuwa się w głębsze miejsca, gdzie tempo mineralizacji materii organicznej jest znacznie wolniejsze niż w miejscach płytkich, ze względu na niższą temperaturę i mniejszą koncentrację tlenu.

Jednym z najbardziej reprezentatywnych i statycznych składników materii organicznej jest węgiel organiczny ( $C_{\text{org}}$ ). Zawartość  $C_{\text{org}}$  oznaczanego metodą dwuchromianową, jako  $\text{ChZT}_{\text{Cr}}$ , była o około 10% wyższa od zawartości tego składnika uzyskanej z obliczeń w oparciu o współczynnik przeliczeniowy 0,47 [24, 26] do straty po prażeniu. Średnia zawartość tego składnika w osadach na stanowiskach 1, 2 i 6 wynosiła  $57 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$ , a na stanowiskach 3, 4 i 5 –  $150 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  Pod względem koncentracji



Rys. 4. Zawartość węglanów, wapnia (Ca) i magnezu (Mg) oraz gęstość właściwa (d) osadów dennych jeziora Rzuna

The content of carbonate (Węglan), calcium (Ca), magnesium (Mg) and the specific density (d) of bottom sediments in Lake Rzuno



Rys. 5. Zawartość glinu (Al), żelaza (Fe) i manganu (Mn) w osadach dennych jeziora Rzuno

The content of aluminium (Al), iron (Fe) and manganese (Mn) in bottom sediments of Lake Rzuno



węgla organicznego (średnio 90 mg g<sup>-1</sup>s.m., Tab. 2) osady dennego jeziora były podobne do osadów dennych umiarkowanie eutroficznego jeziora Szczytno Małe [28], natomiast znacznie mniejsze niż w silnie eutroficznym jeziorze Wierzyko [12] czy też politroficznym jeziorze Klasztorne Małe [9].

Tabela 2. Średnie wartości chemicznych składników (w mg g<sup>-1</sup> suchej masy z wyjątkiem wilgotności i stosunku C:N) jeziora Rżuno. X<sub>min</sub> – wartość najmniejsza, X<sub>max</sub> – wartość najwyższa, X – wartość średnia, S – odchylenie standardowe, X<sub>d</sub> – wskaźnik zmienności  
Mean values of chemical components (in mg g<sup>-1</sup> dry matter except humidity and ratio C:N) in Lake Rżuno. X<sub>min</sub> – least value, X<sub>max</sub> – greatest value, X – mean value, S – standard deviation, X<sub>d</sub> – index of variation

Parametr Parameter	X <sub>min</sub>	X <sub>max</sub>	$\bar{X}$	S	X <sub>d</sub>
Wilgotność (%) Humidity	12,6	75,8	48,9	3,93	8,0
SiO <sub>2</sub>	548	862	736	65,3	8,8
Strata po prażeniu Loss on ignition	63	368	172	21,2	12,3
C <sub>org</sub>	30	190	90	9,2	10,2
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	18,1	97,2	68,1	14,6	21,4
T-N	1,34	15,81	5,43	0,82	15,2
NH <sub>4</sub> -N	0,15	2,51	0,72	0,11	14,3
NO <sub>3</sub> -N	0,05	0,89	0,20	0,04	20,0
N <sub>org</sub>	1,13	12,40	4,51	0,76	16,9
T-P	0,06	1,41	0,57	0,06	10,5
PO <sub>4</sub> -P	0,03	0,68	0,28	0,04	14,3
P <sub>org</sub>	0,03	0,73	0,29	0,04	13,8
Ca	3,2	54,4	31,5	4,4	14,2
Mg	1,3	13,2	9,3	1,0	10,7
Al	1,2	35,4	17,7	2,1	11,7
Fe	0,5	5,4	2,6	0,24	9,2
Mn	0,33	1,48	0,95	0,11	11,6
C : N	14,1	38,3	22,2	2,34	10,5

Januszkiewicz [9] badając osady dennego jeziora stwierdził, że zachodzące w nich przemiany chemiczne powodują znacznie szybszy ubytek węgla organicznego niż azotu organicznego. Jak podaje Lityński i in. [17] podczas rozkładu substancji organicznych, przy stosunku C : N mniejszym od 17, następuje uwalnianie mineralnych związków azotowych (łącznie z amoniakiem) do toni wodnej. W badanym jeziorze stosunek C : N był wyższy od 17, jedynie na stanowisku 4 wynosił 15,8, a na pozostałych stanowiskach stosunek ten był wyższy i wynosił średnio 23,5 (Rys. 2). Wielkość tego stosunku zmniejszała się wraz z głębokością jeziora. Zatem w centralnej części jeziora Rżuno, o największej głębokości, w osadach dennych zachodzą procesy degradacji materii organicznej, którym towarzyszy wydzielanie amoniaku. Główną przyczyną tego zjawiska jest występujący na tej głębokości deficyt tlenowy, który stwierdzili Trojanowski i Bruski [34].

Badane osady dennego jeziora są ubogie w węglany CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Zawartość tego składnika nie przekraczała 100 mg g<sup>-1</sup>s.m. (od 18,1 na stanowisku 4 do 93,2 mg g<sup>-1</sup>s.m. na stanowisku 5, rysunek 4). Porównywalną koncentrację węglanów obserwował Januszkiewicz [11]

w osadach dennych jeziora Grabowskiego. Natomiast wyższą zawartość węglanów obserwowano w jeziorze Łętowskim do  $230 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  [30] i w jeziorze Lubiatowskim [16] – średnio  $110 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  Bardzo dużą zawartość węglanów mają osady dennie jeziora Jasień, gdzie Korzeniewski [15] w części litoralnej stwierdził obecność węglanu wapniowego wynoszącą  $745\text{--}939 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  Koncentracja węglanów w badanych osadach zmniejszała się wraz z głębokością jeziora (Rys. 4).

Węglany w osadach dennych jeziora Rzuno występują głównie w postaci węglanu wapnia i magnezu. Istnieje bardzo wyraźna dodatnia korelacja pomiędzy zawartością węglanów a ilością wapnia (Ca) i magnezu (Mg) charakteryzująca się współczynnikiem korelacji 0,86 (przy  $n = 34$ , i poziomie istotności 0,05). W związku z tym zmienność występowania tych metali w osadach jest podobna jak węglanów (Tab. 2). Ogólnie zawartość wapnia i magnezu w osadach dennych jeziora Rzuno jest bardzo mała. Najwyższą średnią zawartość związków wapnia obserwowano na stanowiskach 1 i 6 (odpowiednio  $43$  i  $48 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$ , rysunek 4). Na tych stanowiskach obserwowano największą ilość mięczaków, których skorupki wzbogacają osady w wapń. W miarę wzrostu głębokości zawartość wapnia maleje i na stanowisku 4 osiągał wartość  $4 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  Podobną zawartość wapnia obserwowano w jeziorze Gardno [33] a znacznie większą w jeziorze Szczytno Małe  $130 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  [32].

Zawartość związków magnezu w badanych osadach wykazuje dość wyraźną korelację ze związkami wapnia ( $r = 0,81$ ,  $n = 18$ , poziom istotności 0,05). Średnia zawartość tego składnika wynosiła  $9,3 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  (Tab. 2) i była podobna jak w jeziorze Sukiel [26], ale znacznie wyższa niż w jeziorach Szczytno Małe [32] i Gardno [33].

Udział glinu (Al) w osadach dennych badanego jeziora jest przeciętny i wynosi średnio  $17,7 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  (Tab. 2). Koncentracja jego wzrastała wraz z głębokością jeziora (Rys. 5), ponieważ zwiększała się zawartość minerałów ilastych, które jak wiadomo są uwodnionymi krzemianami glinu i żelaza [5]. Koncentracja związków żelaza (Fe) była sześciokrotnie mniejsza niż glinu, ale zmieniała się podobnie. Średnia zawartość tego składnika wynosiła  $2,6 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  i wskazywała na znacznie mniejszy jego udział niż w osadach dennych jezior Szczytno Małe i Łętowskie [28]. Przestrzenne rozmieszczenie związków manganu (Mn) w osadach dennych jeziora Rzuno było podobne jak związków żelaza i glinu (Rys. 5).

Ze względu na rolę jaką odgrywają azot i fosfor w procesie eutrofizacji, podczas badań szczególną uwagę zwrócono na zawartość i wzajemne powiązanie tych substancji biogenicznych z innymi składnikami osadów. Osady dennie jeziora Rzuno są stosunkowo ubogie w związki azotu i charakteryzują się zawartością azotu ogólnego (T-N) w granicach  $1,34\text{--}15,81 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  (średnio  $5,4 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$ , tabela 2). Przeprowadzone badania wykazały wyraźne zróżnicowanie ilościowe w obrębie jeziora. Najwyższą zawartością azotu ogólnego ( $12,01 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$ ) charakteryzowały się osady z najgłębszego miejsca w jeziorze (st. 4), na pozostałych stanowiskach ilości te były tym mniejsze im mniejsza była głębokość jeziora (Rys. 6). Na taki rozkład związków azotowych w badanych osadach rzutował głównie azot organiczny ( $N_{\text{org}}$ ), który stanowił przeciętnie 83% azotu ogólnego, podobnie jak w osadach dennych jeziora Ontario [14]. Zatem zgromadzony azot w osadach dennych tego jeziora występuje głównie jako składnik materii organicznej pochodzenia autochtonicznego i allochtonicznego. Potwierdza to wysoka dodatnia istotna korelacja między zawartością materii organicznej i azotu ( $r = 0,86$ ,  $n = 18$ ) na poziomie istotności 0,05.

Dominującą formą nieorganiczną azotu był azot amonowy ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), szczególnie w osadach z dużej głębokości (st. 4), gdzie stanowił 16% azotu ogólnego, a jego zawartość była prawie pięciokrotnie większa niż zawartość azotu azotanowego ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Na pozostałych stanowiskach była co najwyżej trzykrotnie większa lub podobna.

Podobną koncentrację związków azotowych obserwowano w umiarkowanej eutroficznej jeziorze Szczytno Małe, ale była ona prawie dwukrotnie mniejsza niż w jeziorze Łętowskim [30].

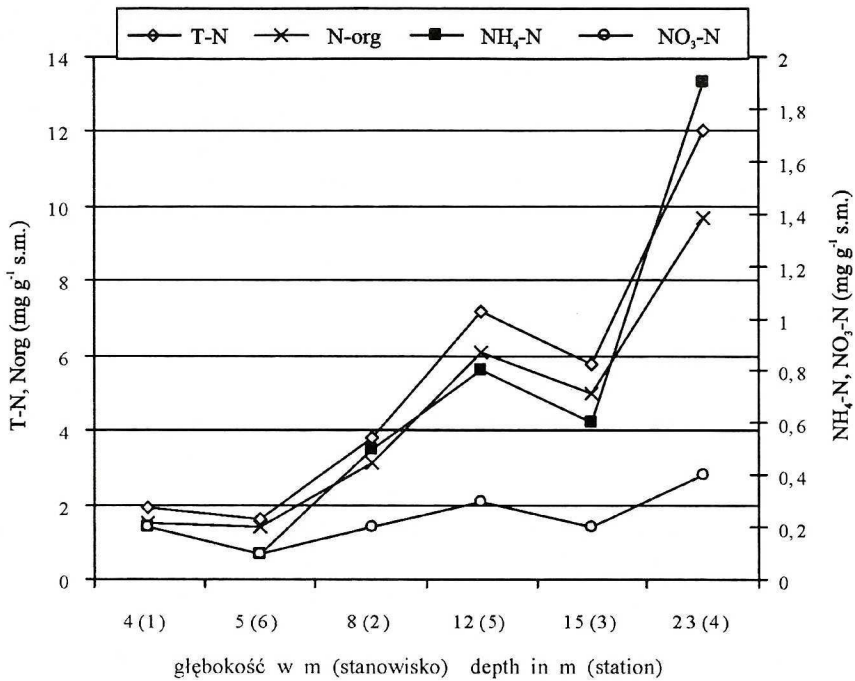
Trwałość związków fosforu zdeponowanego w osadach dennych jest uzależniona między innymi od rodzaju związków chemicznych, w których ten pierwiastek występuje w osadach. Średnia koncentracja fosforu całkowitego (T-P) w osadach dennych jeziora Rzuno wynosiła  $0,57 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$  (Tab. 2). Są to ilości charakterystyczne dla jezior o umiarkowanej trofii. Najbardziej bogate w związki fosforu były osady ze stanowiska 4 (średnio  $1,24 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$ ), a najmniej zawierały ich osady z stanowisk 1, 2 i 6 (przeciętnie  $0,15 \text{ mg g}^{-1}\text{s.m.}$ , rysunek 7). Udział fosforu organicznego ( $\text{P}_{\text{org}}$ ) i fosforanowego ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) w fosforze ogólnym był podobny, z niewielką przewagą  $\text{P}_{\text{org}}$  (około 55%) na stanowiskach 1, 4 i 5. Największy udział fosforanów (60%) obserwowano na stanowisku 2. Koncentracja fosforanów w badanych osadach ściśle korelowała z zawartością żelaza ( $r = 0,78$ ,  $n = 18$ , poziom istotności 0,05) ponieważ prawdopodobnie tworzyły się nierozpuszczalne fosforany żelaza oraz część fosforu fosforanowego ulegała absorpcji na koloidalnych cząsteczkach związków żelaza.

Zawartość związków fosforowych w osadach dennych jeziora Rzuno była prawie dwukrotnie mniejsza niż w jeziorach silnie eutroficznych [11, 31]. Wydaje się, że przyczyną niskiej zawartości związków azotowych i fosforowych w badanych osadach jest brak punktowych źródeł zanieczyszczenia oraz pól uprawnych w pobliżu jeziora. Jedynie 32% linii brzegowej styka się z zamieszkałymi działkami miejscowości Dziemiany. Pozostała część to lasy i nieużytki. Jezioro nie posiada żadnego dopływu ani odpływu.

## WNIOSKI

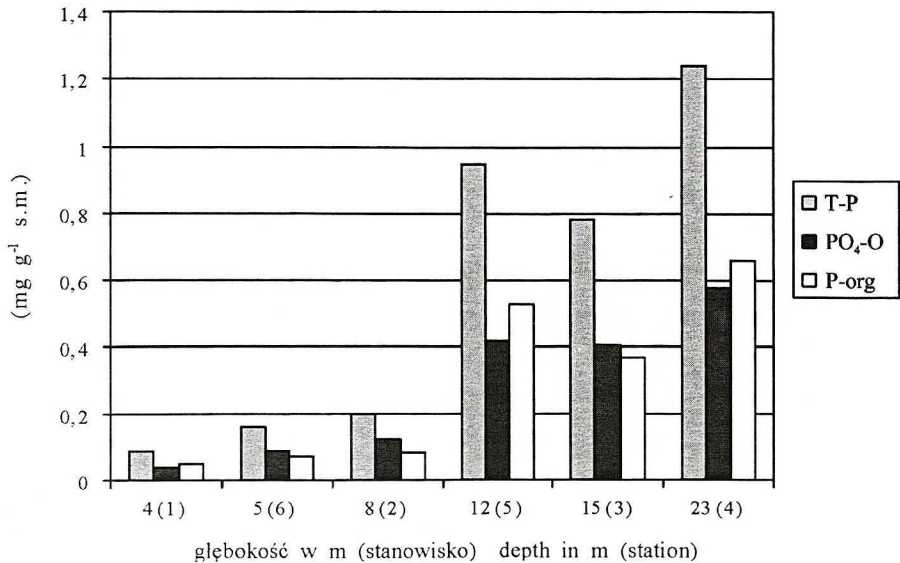
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono:

- Zróznicowanie we właściwościach fizycznych i w składzie chemicznym osadów dennych jeziora Rzuno w zależności od głębokości. Inaczej przedstawia się proces kształtowania osadów strefy brzegowej (litoralu i sublitoralu), a inaczej profundalu. Im większa głębokość jeziora tym osady zawierały więcej materii organicznej, węgla organicznego, związków azotu i fosforu, glinu, żelaza oraz manganu.
- Badane osady należą do osadów typu krzemianowego.
- Osady denne z głęboczka (st. 4) charakteryzowały się procesami mineralizacji organicznego azotu zachodzących z uwalnianiem do toni wodnej związków azotowych, łącznie z amoniakiem.
- Dodatnia wysoka korelacja pomiędzy ilością fosforu ogólnego a zawartością żelaza świadczy, że związki żelaza w sposób istotny uczestniczą w procesie strącania i sedymentacji połączeń fosforowych.
- Azot zdeponowany był w osadach głównie w formie związków organicznych.



Rys. 6. Zawartość związków azotowych w osadach dennych jeziora Rzuno (T-N azot ogólny, N-org azot organiczny, NH<sub>4</sub>-N azot amonowy, NO<sub>3</sub>-N azot azotanowy)

The content of nitrogen compounds in bottom sediments of Lake Rzuno (T-N total nitrogen, N-org organic nitrogen, NH<sub>4</sub>-N ammonium nitrogen, NO<sub>3</sub>-N nitrate nitrogen)



Rys. 7. Zawartość związków fosforowych w osadach dennych jeziora Rzuno (T-P fosfor ogólny, PO<sub>4</sub>-P fosfor fosforanowy, P<sub>org</sub> Fosfor organiczny)

The content of phosphorus compounds in bottom sediments of Lake Rzuno (T-P total phosphorus, PO<sub>4</sub>-P phosphate phosphorus, P<sub>org</sub> organic phosphorus)

- Badane osady charakteryzują się stosunkowo niską zawartością węglanów, wapnia i żelaza.
- Przeważająca większość materiału odkładanego w osadach dennych tego jeziora jest pochodzenia autochtonicznego, głównie dlatego, że jezioro to nie posiada żadnych dopływów.
- W oparciu o skład chemiczny osadów dennych, a głównie zawartości azotu i fosforu, jezioro Rzuno należy zaliczyć do jezior umiarkowanie eutroficznych.
- Wpływ czynników antropogenicznych na omawiane jezioro jest jeszcze w chwili obecnej stosunkowo niewielki.

## LITERATURA

- [1] Austin E.R., G.F. Lee: *Nitrogen release from lake sediments*, J. Wat. Pollut. Fed., **45**, 5, 870–879 (1973).
- [2] Boström B., J. M. J. M. Andersen, S. Fleischer, M. Jansson: *Exchange of phosphorus across the sediment – water interface*, Hydrobiologia, **170**, 229–244 (1988).
- [3] Edmondson W. T.: *Changes in the oxygen deficit of Lake Washington*, Verh. Int. Ver. Limnol., **16**, 153–158 (1966).
- [4] Gawrońska H.: *Skład chemiczny osadów dennych Jeziora Bęskiego*. Zesz. Nauk ART., Olsztyn, **17**, 35–43 (1989).
- [5] Gołębiowski R.: *Osady denne jezior Raduńskich*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, s. 89, Gdańsk 1976.
- [6] Graca B., J. Bolałek: *Temporal variations in phosphorus species in the surface layer of bottom sediments from the Gulf of Gdańsk – preliminary research*, Oceanol. Stud., **4**, 55–66 (2000).
- [7] Hedges J. I., J. H. Stern: *Carbon and nitrogen determinations of carbon-containing solids*, Limnol. Oceanogr., **29**, 657–663 (1984).
- [8] Janczak J.: *Atlas jezior Polski*, Inst. Meteor. Gospod. Wod., Cz. II, Poznań. 1997.
- [9] Januszkiewicz T.: *Skład osadów głębinowych grupy jezior na Pojezierzu Kaszubskim*, Roczn. Nauk Rol., **92**, 67–80 (1970).
- [10] Januszkiewicz T.: *Studia nad metodyką analizy chemicznej składu współczesnych osadów dennych jezior*, Zesz. Nauk. ART., Olsztyn, **8**, 3–30 (1978).
- [11] Januszkiewicz T.: *Chemistry of recent sediment of Grabowskie Lake in Kaszubian Lakes District in northern Poland*, Pol. Arch. Hydrobiol., **27**, 319–336 (1980).
- [12] Januszkiewicz T.: *Chemical characteristics of recent sediments of Lake Wierzycko*, Pol. Arch. Hydrobiol., **26**, 475–493 (1980).
- [13] Kajak Z.: *Eutrofizacja jeziora*, PWN, Warszawa 1990.
- [14] Kemp A. L. W., A. Mudrochova: *Distribution and forms of nitrogen in a Lake Ontario sediment core*, Limnol. Oceanogr., **17**, 855–867 (1972).
- [15] Korzeniewski K.: *Hydrochemical study of a springwater lake on the example of the lake Jasień*, Pol. Arch. Hydrobiol., **15**, 153–176 (1968).
- [16] Korzeniewski K., H. Ratajczyk, J. Trojanowski, Cz. Trojanowska: *Osady denne jeziora Lubiatowskiego*, [w:] *Rezerwat przyrody – Jezioro Lubiatowskie*, Koszaliński Ośrodek Naukowo-Badawczy w Koszalinie, 45–53 (1979).
- [17] Lityński T.: *Żyzność gleby i nawożenie*, PWN Warszawa 1971.
- [18] Mirowski Z., J. Rytelski: *Gleboznawstwo z podstawami geomorfologii, mineralogii i petrografii*, Cz. 2, Olsztyn 1981.
- [19] Mortimer C. H.: *Chemical exchanges between sediments and water in the Great Lakes – speculations on probable regulatory mechanisms*, Limnol. Oceanogr., **16**, 387–404 (1971).
- [20] Pazdro K., S. Stanisławski, J. Beldowski, K. Emeis, T. Leipe, J. Pempowiak: *Variations in organic matter bound in fluffy layer suspended matter from the Pomeranian Bay (Baltic Sea)*, Oceanol., **43**, 405–420 (2001).
- [21] Pempkowiak J., M. Grylicki, M. Marko-Narloch: *Correlations between major components of the Baltic surface sediments*, Proc. 16<sup>th</sup> Baltic Oceanogr. Conf. Inst. Mar. Res., Kiel, **2**, 833–842 (2000).

- [22] Persson J., P. Jonsson: *Historical development of laminated sediments – an approach to detect soft sediment ecosystem changes in the Baltic Sea*, Mar. Poll. Bull., **40**, 122–134 (2000).
- [23] Ryding S., H. Borg: *Chemical studies of superficial sediments in lake Lilla Ullevijfjorden*, Int. Rev. Ges. Hydrobiol., **61**, 581–593 (1976).
- [24] Shindler D.: *Exchange of nutrients between sediments and water 15 years of experimental eutrophication*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., **44** (Suppl. 1), 26–46 (1987).
- [25] Starmach K., S. Wróbel, K. Pasternak: *Hydrobiologia*, PWN, Warszawa 1978.
- [26] Tadajewski A.: *Chemizm osadów dennych jeziora Kortowskiego*, Zesz. Nauk WSR Olsztyn, **19**, 58–72 (1965).
- [27] Tadajewski A.: *Chemizm osadów jeziora Sukiel i uwagi o jego faunie dennej*, Zesz. Nauk. WSR Olsztyn, **21**, 47–63 (1966).
- [28] Trojanowski J.: *Sorption properties of bottom sediments of Szczytno Male and Lętowo Lakes*, Pol. Arch. Hydrobiol., **34**, 149–161 (1987).
- [29] Trojanowski J.: *Skład chemiczny i właściwości fizyczne osadów dennych jezior Klasztorne Male i Klasztorne Duże*, Słup, Pr. Mat. Przyrod. (praca w druku).
- [30] Trojanowska Cz., J. Trojanowski, H. Ratajczyk: *Osady denne a sadzowa hodowla pstrągów w jeziorze Lętowskim*, Pol. Arch. Hydrobiol., **29**, 659–670 (1982).
- [31] Trojanowska Cz., J. Trojanowski, H. Ratajczyk: *Charakterystyka chemiczna osadów dennych jeziora Gardno*, Słup, Prace Mat. Przyrod., **9b**, 193–208 (1993).
- [32] Trojanowski J., Cz. Trojanowska, H. Ratajczyk: *Chemical characteristics of bottom sediment top layer in Szczytno Male Lake*, Pol. Arch. Hydrobiol. **32**, 99–112 (1985).
- [33] Trojanowski J., Cz. Trojanowska, H. Ratajczyk, M. Krzyżanowska, R. Reinert: *Wybrane właściwości fizykochemiczne osadów dennych jezior przyziemskich w 1987 r.*, Słup, Prace Mat. Przyrod., **9b**, 261–291 (1993).
- [34] Trojanowski J., J. Bruski: (praca w druku) *Thermal and oxygenic characteristic of Rżuno Lake (Kaszuby Lakeland)*, Arch. Ochr. Środ. **28**, 81–95.