
JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE, BIOLOGY AND BIOECONOMY

wcześniej – formerly
Annales UMCS sectio EE Zootechnica

VOL. XL (2)

2024



<https://doi.org/10.24326/jasbb.2024.5487>

Katedra Hydrobiologii i Ochrony Ekosystemów, Wydział Biologii Środowiskowej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Dobrzańskiego 37, 20-262 Lublin
aleksandra.bartkowska@up.lublin.pl

ALEKSANDRA BARTKOWSKA-BEKASIEWICZ ,
TOMASZ MIECZAN , MICHAŁ NIEDŹWIECKI

Ocena pośredniego oddziaływania LW Bogdanka SA na ekosystemy torfowiskowe: aplikacyjny wymiar analiz fizyczno-chemicznych i mikrobiologicznych wód

Assessment of indirect impact of LW Bogdanka SA on peatland ecosystems:
the application dimension of the analyses of the physico-chemical
and microbiological analyses of waters

Streszczenie. Analiza właściwości fizyczno-chemicznych siedliska oraz dane o wymaganiach ekologicznych poszczególnych grup organizmów umożliwiają określenie (z dużą dokładnością) aktualnego stanu środowiska. Ameby skorupkowe doskonale zachowują się w osadach biogenicznych, dlatego ich analiza daje możliwość odtworzenia historii torfowiska, w tym potencjalnych oddziaływań kopalni znajdujących się w pobliżu mokradeł. Celem badań jest analiza wpływu kopalni LW Bogdanka SA na ekosystemy torfowiskowe Poleskiego Parku Narodowego. Raz w miesiącu – od maja do listopada – na terenie Poleskiego Parku Narodowego pobierano próby wody z dwóch torfowisk. Każdorazowo analizowano parametry fizyczne i chemiczne wody oraz strukturę jakościową i ilościową ameb skorupkowych. Przeprowadzone badania wykazały, że ameby skorupkowe mają wyższą różnorodność taksonomiczną oraz wyższą liczebność i biomasę w torfowisku przy jeziorze Moszne, które charakteryzują względnie stabilne wartości parametrów fizycznych i chemicznych wody (przed wszystkim stężenie tlenu oraz związków biogenych). W Torfowisku Orłowskim wpływ działalności antropogenicznej jest bardziej widoczny ze względu na wyższe stężenie biogenów, powodujące zmiany ilościowe oraz jakościowe ameb skorupkowych.

Słowa kluczowe: antropopresja, związki biogenne, ameby skorupkowe

Cytowanie: Bartkowska-Bekasiewicz A., Mieczan T., Niedźwiecki M., 2024. Ocena pośredniego oddziaływania LW Bogdanka SA na ekosystemy torfowiskowe: aplikacyjny wymiar analiz fizyczno-chemicznych i mikrobiologicznych wód. *J. Anim. Sci. Biol. Bioecon.*, 40(2), 27–40. <https://doi.org/10.24326/jasbb.2024.5487>

WSTĘP

W południowo-wschodniej Polsce 1 maja 1990 r., ze względu na ochronę ekosystemów wodnych i torfowiskowych, utworzony został Poleski Park Narodowy (PPN). Ma on powierzchnię prawie 10 tys. ha, na której znajdują się najcenniejsze przyrodniczo elementy należące do Polesia Zachodniego. Dominują tam bagna, torfowiska oraz jeziora krasowe i równiny torfowe, zajmujące łącznie ponad 65% powierzchni parku [Obroślak i in. 2017]. W Europie tereny wodno-bagienne podlegają całkowitej ochronie, co wynika ze zwiększającego się, w efekcie nieprzemyślanej presji ze strony człowieka, zagrożenia tych siedlisk. Jest to szczególnie istotne, ponieważ umożliwiają one stabilizację fizjocenoz oraz wspomagają zaopatrywanie ich w wodę, przez co wzbogaceniu ulega mozaikowość siedliskowa, biocenotyczna i ekosystemowa [Obroślak i in. 2017].

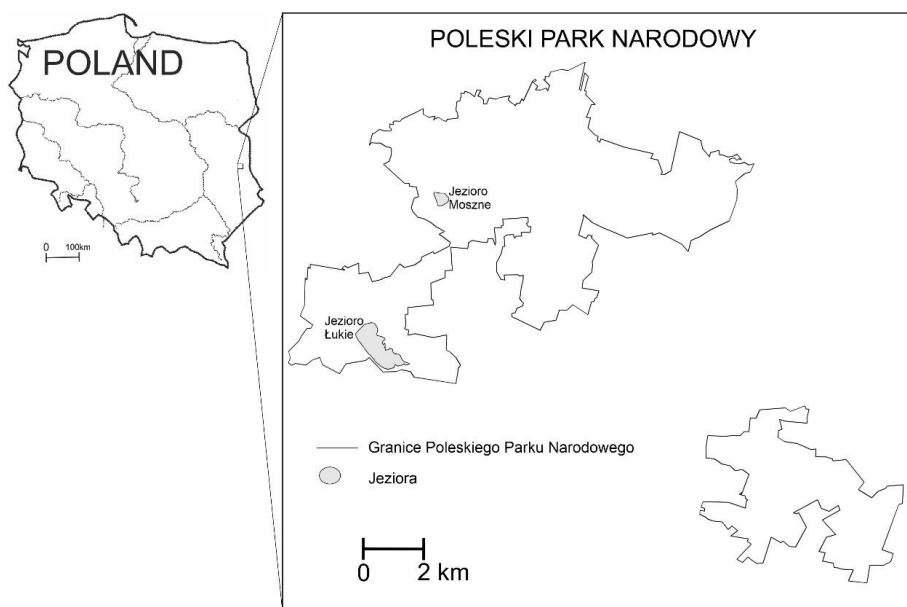
Ekosystemy torfowiskowe wykazują duże zróżnicowanie morfologiczne. Torfowiska – wysokie, przejściowe oraz niskie – są zbiornikami akumulacji biogenicznej oraz materii organicznej, która gromadzi się przez tysiąclecia i tworzy bogate w węgiel gleby, określane mianem torfu. Zmiany klimatu przyczyniają się niestety do zmniejszenia zasobów tego surowca, jak również negatywnie wpływają na kluczowe elementy ekosystemu, m.in. różnorodność biologiczną [Leifeld i in. 2019, Evans i in. 2021]. Na ekosystemy torfowiskowe wpływa także odwodnienie, w tym m.in. zabiegi melioracyjne, warunkujące w konsekwencji zmiany poziomu wód gruntowych i uwodnienia pokładów torfu, a także działalność prowadzona w sąsiedztwie obszarów chronionych, m.in. przemysł wydobywczy. Pozyskiwanie węgla kamiennego z pokładów zalegających na obszarach graniczących z PPN może powodować zaburzone funkcjonowanie ekosystemów torfowiskowych. Zwiększony dopływ biogenów i innego typu zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego może doprowadzić do wycofania się zespołów charakterystycznych dla tych siedlisk. Jedną z grup reagujących na wahania warunków środowiskowych są ameby skorupkowe (*testate amoebae*). Te mikroskopijne organizmy jednokomórkowe są bardzo dobrymi wskaźnikami stanu ekologicznego ekosystemów torfowiskowych. Dzięki wysokiej różnorodności gatunkowej i specyficznym preferencjom gatunków kluczowych są niezwykle użyteczne jako wskaźniki stanu środowiska [Evans i in. 2021].

Zasadniczym celem badań była szczegółowa analiza wpływu kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA na ekosystemy torfowiskowe Poleskiego Parku Narodowego w oparciu o analizę właściwości fizyczno-chemicznych wód oraz analizę struktury jakościowej i ilościowej ameb skorupkowych.

MATERIAŁ I METODY

Teren badań

Na terenie Poleskiego Parku Narodowego występują liczne kompleksy torfowiskowe zarówno o charakterystycznych, jak i wspólnych cechach terenu. Dlatego też badania zostały przeprowadzone na terenie dwóch torfowisk (ryc. 1): przy jeziorze Moszne (stanowisko I: 51.457706°N, 23.112484°E, pH = 3,86) oraz Torfowisku Orłowskim



Ryc. 1. Teren badan

Fig. 1. Study area

(stanowisko II: 51.410443°N, 23.098897°E, pH = 6,49). W przeszłości na torfowisku przy jeziorze Moszne istniał system rowów melioracyjnych, które służyły odwodnieniu terenu w celu jego przekształcenia na potrzeby rolnicze. Rowy te przecinały torfowisko, wpływając na obniżenie poziomu wód gruntowych i przyspieszając procesy degradacji torfu. Obecnie, w ramach działań ochronnych, wiele z tych rowów zostało zablokowanych lub zasypanych, co ma na celu zatrzymanie wody na torfowisku i przywrócenie jego naturalnych funkcji hydrologicznych. Obecność zastoisk i rozlewisk na torfowisku Moszne jest wynikiem zarówno naturalnych procesów hydrologicznych, jak i działań renaturyzacyjnych. Poziom wód gruntowych na torfowisku Moszne wykazuje sezonowe wahania, które są naturalnym zjawiskiem w tego typu ekosystemach. Torfowisko Orłowskie charakteryzuje się obecnością licznych zastoisk i rozlewisk, które są efektem zarówno naturalnych procesów hydrologicznych, jak i działań renaturyzacyjnych. Poziom wód gruntowych na Torfowisku Orłowskim wykazuje sezonowe wahania, które są typowe dla tego typu ekosystemów. Monitoring hydrologiczny prowadzony na torfowisku wskazuje na stopniową stabilizację poziomu wód gruntowych, co jest korzystne dla zachowania torfowiska w dobrym stanie ekologicznym [OTOP 2024]. Wybrane stanowiska prezentują różną siłę oddziaływania kopalni LW Bogdanka SA. Torfowisko Moszne (torfowisko wysokie), zlokalizowane w centrum Poleskiego Parku Narodowego, jest również bardziej oddalone (30 km) od centrum przemysłu wydobywczego, z kolei Torfowisko Orłowskie (powierzchnia 671,73 ha, torfowisko przejściowe) zlokalizowane jest w niewielkiej odległości (20 km) od kopalni LW Bogdanka SA.

METODY BADAŃ

Raz w miesiącu, od maja do listopada, na terenie Poleskiego Parku Narodowego z torfowiska przy jeziorze Moszne oraz z Torfowiska Orłowskiego przy jeziorze Łukie pobierano próby wody (głębokość 40–50 cm, ze środkowej części zbiorników biogenicznych – według wytycznych dla monitoringu siedlisk w obszarach naturalnych). Zgodnie z czasem realizacji projektu dla każdego stanowiska uzyskano po 7 prób, co łącznie dało 14 próbek porównawczych dla każdego parametru fizyczno-chemicznego i dla zespołów ameb skorupkowych. Każdorazowo analizowano parametry fizyczne i chemiczne wody: temperaturę, przewodnictwo elektrolityczne, pH, stężenie tlenu, chlorofil *a*, TN (azot całkowity), N-NH₄, N-NO₃, P-PO₄³⁻, TP (fosfor ogólny), TOC (całkowity węgiel organiczny), DOC (rozpuszczalny węgiel organiczny). Pobrane próby wody transportowano w chłodniach przenośnych (4°C) i analizowano po dotarciu do laboratorium. Próbkę przeznaczoną do oznaczeń wrażliwych na temperaturę i światło (np. chlorofil *a*, DOC) przechowywano w ciemności oraz w odpowiednich pojemnikach z materiałów nieinterakcyjnych. Pomiaru pH dokonano z wykorzystaniem pehametru, który kalibrowano przed każdorazowym użyciem za pomocą buforów wzorcowych (pH 4, 7 i 10), a średni błąd pomiarowy nie przekraczał $\pm 0,1$ jednostki pH. Analizę temperatury, przewodnictwa elektrolitycznego, pH oraz stężenia tlenu (DO) przeprowadzono przy użyciu miernika wieloparametrowego (YSI 556MPS). Biogeny, chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), biologiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT) oraz zawiesinę ogólną (TSS) oznaczono metodą spektrofotometryczną. Oznaczenia wykonano przy użyciu spektrofotometru (SPECORD-40), stosując certyfikowane materiały referencyjne oraz wzorce kalibracyjne, aby zweryfikować poprawność pomiarów. Stężenie P-PO₄³⁻ oznaczono metodą kolorymetryczną, N-NH₄ z wykorzystaniem analizatora FIA. Stężenie chlorofilu *a* zmierzono, korzystając z analizy spektrofotometrycznej, po wcześniejszym sporządzeniu ekstraktów [Golterman 1969]. Ekstrakty przygotowywano w roztworze alkoholu (90%), a pomiary wykonano w standardowych warunkach laboratoryjnych z użyciem odpowiednich filtrów. Ogólna zawartość węgla organicznego (TOC) została oznaczona przy wykorzystaniu rozkładu nadsiarczanu potasu za pomocą analizatora O/I Corporation Model 700. Systematycznie pozyskiwane wyniki zapisywano oraz gromadzono w celu wykonania analizy porównawczej.

Jednocześnie na tych samych stanowiskach pobierano próby wody do analizy ilościowej i jakościowej ameb skorupkowych. Probę wody o objętości 5 l przefiltrowywano przez siatkę planktonową (10 μm). W warunkach laboratoryjnych określono liczebność i skład gatunkowy ameb z wykorzystaniem metody Utermöhl [1931]. Biomasę pierwotniaków obliczono, stosując następujący przelicznik: 1 $\mu\text{m}^3 = 1,1 \times 10^{-7}$ μgC [Gilbert i in. 1998].

Analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu współczynników korelacji liniowej, aby określić zależności pomiędzy liczebnością ameb skorupkowych a zmiennymi środowiskowymi. Dla potwierdzenia istotności statystycznej przyjęto poziom istotności $p < 0,05$. Przed wykonaniem testów korelacyjnych zweryfikowano normalność rozkładu danych przy użyciu testu Shapiro-Wilka. Do porównania średnich wartości parametrów pomiędzy dwoma torfowiskami zastosowano test t-Studenta dla prób niezależnych ($p < 0,05$). Analizy wykonano w programie Statistica 13.3 (StatSoft Inc.).

WYNIKI

Właściwości fizyczne i chemiczne wód torfowiskowych

Analiza parametrów fizycznych oraz chemicznych wody wykazała, że torfowisko Moszne (stanowisko I, pH = 4,08) charakteryzowało się niższym pH niż Torfowisko Orłowskie (stanowisko II, pH = 6,8). Torfowisko Moszne stanowi środowisko silnie kwaśne, przy czym Torfowisko Orłowskie charakteryzuje się pH zbliżonym do obojętnego. W przypadku przewodnictwa elektrolitycznego zaobserwowano, że poziom tego parametru był istotnie wyższy na stanowisku II (od 208 $\mu\text{S cm}^{-1}$ do 281 $\mu\text{S cm}^{-1}$) niż na stanowisku I (od 107 $\mu\text{S cm}^{-1}$ do 210 $\mu\text{S cm}^{-1}$). W sezonie letnim w torfowisku Moszne odnotowano jedne z niższych stężeń tego parametru, natomiast w wodzie z Torfowiska Orłowskiego w tych samych miesiącach występowały najwyższe stężenia przewodnictwa elektrolitycznego (tab. 1, 2).

Tabela 1. Właściwości fizyczne i chemiczne wody torfowiskowej z torfowiska przy jeziorze Moszne w poszczególnych miesiącach (maj–listopad)

Table 1. Physical and chemical parameters of peatland water from peatland near Lake Moszne by month (May–November)

Właściwości Parameters	Torfowisko przy jeziorze Moszne/ Peatland near Lake Moszne						
	Miesiąc/ Month						
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
T (°C)	10	14,7	18	16,1	16,1	6,5	3,1
pH	4,43	4,2	3,53	3,99	3,86	4,5	4,1
Cond. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	194	122	137	109	107	221	210
O ₂ (%)	22,6	78	58,5	47,6	53,2	54,3	49,2
N _{tot} (mg l ⁻¹)	2,91 2	3,531	2,911	2,335	2,571	2,157	2,044
P _{tot} (mg l ⁻¹)	0,11 5	0,012	0,053	0,031	0,066	0,046	0,074
Chl <i>a</i> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	37,7 9	35,65	39,55	55,12	39,86	44,38	37,45
ChZT (mg l ⁻¹)	178	244	216	206	232	222	210
BZT (mg l ⁻¹)	103	147	129	122	139	133	125
TSS (mg l ⁻¹)	510	790	740	665	740	690	615
TOC (mg l ⁻¹)	77	112	98	93	106	101	95

T – temperatura, pH – odczyn badanego środowiska, Cond. – przewodnictwo elektrolityczne, O₂ – stężenie tlenu, N_{tot} – azot ogólny, P_{tot} – fosfor ogólny, Chl *a* – chlorofil *a*, ChZT – chemiczne zapotrzebowanie na tlen, BZT – biologiczne zapotrzebowanie na tlen, TSS – zawiesina ogólna, TOC – ogólna zawartość węgla organicznego
 T – temperature, pH – reaction of the studied environment, Cond. – electrolytic conductivity, O₂ – dissolved oxygen concentration, N_{tot} – total nitrogen, P_{tot} – total phosphorus, Chl *a* – chlorophyll *a*, COD – chemical oxygen demand, BOD – biological oxygen demand, TSS – total suspended solids, TOC – total organic carbon

Tabela 2. Właściwości fizyczne i chemiczne wody torfowiskowej z Torfowiska Orłowskiego w poszczególnych miesiącach (maj–listopad)
 Table 2. Physical and chemical parameters of peatland water from Orłowskie Peatland by month (May–November)

Właściwości Parameters	Torfowisko Orłowskie/ Orłowskie Peatland						
	Miesiąc/ Month						
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
T (°C)	14,5	17,5	15,1	15,9	7,9	4,3	14,5
pH	7,2	5,99	6,28	6,23	7,65	7,3	7,2
Cond. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	234	208	256	281	213	209	234
O ₂ (%)	61,8	62,5	27,4	22,2	30,2	26,45	16,8
N _{tot} (mg l ⁻¹)	2,211	3,476	2,722	2,151	1,682	1,765	2,211
P _{tot} (mg l ⁻¹)	0,044	0,186	0,089	0,238	0,088	0,124	0,044
Chl <i>a</i> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	34,36	51,34	23,20	48,65	27,34	30,27	29,49
ChZT (mg l ⁻¹)	70,5	50	44	44	45	46	46,5
BZT (mg l ⁻¹)	41	34	28,6	28,2	28,8	30,5	30,2
TSS (mg l ⁻¹)	168	110	129	115	103	137	109
TOC (mg l ⁻¹)	30,5	25,6	22	21,6	21,8	23,4	23

T – temperatura, pH – odczyn badanego środowiska, Cond. – przewodnictwo elektrolityczne, O₂ – stężenie tlenu, N_{tot} – azot ogólny, P_{tot} – fosfor ogólny, Chl *a* – chlorofil *a*, ChZT – chemiczne zapotrzebowanie na tlen, BZT – biologiczne zapotrzebowanie na tlen, TSS – zawiesina ogólna, TOC – ogólna zawartość węgla organicznego

T – temperature, pH – reaction of the studied environment, Cond. – electrolytic conductivity, O₂ – dissolved oxygen concentration, N_{tot} – total nitrogen, P_{tot} – total phosphorus, Chl *a* – chlorophyll *a*, COD – chemical oxygen demand, BOD – biological oxygen demand, TSS – total suspended solids, TOC – total organic carbon

Analiza stężenia azotu ogólnego wykazała, że we wszystkich badanych miesiącach, z wyjątkiem lipca, w torfowisku przy jeziorze Moszne występowała wyższa zawartość związków azotowych. W badanych siedliskach najwyższe stężenie tego parametru odnotowano w miesiącach wiosennych oraz letnich (maj, czerwiec, lipiec, sierpień). Wyższe stężenie fosforanów (praktycznie we wszystkich badanych miesiącach) odnotowano w wodzie z Torfowiska Orłowskiego, wyjątek stanowiły wyniki w maju oraz sierpniu. Ogólne stężenie związków biogennych było wyższe w wodach na stanowisku II (tab. 1, 2).

Stężenie chlorofilu *a* w wodzie z torfowiska przy jeziorze Moszne było wyższe (od 35,6 do 55,12 $\mu\text{g l}^{-1}$) niż w wodzie z Torfowiska Orłowskiego (od 23,2 do 51,34 $\mu\text{g l}^{-1}$). Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oraz biologiczne zapotrzebowanie na tlen było istotnie wyższe na stanowisku I (ChZT: od 178 do 232 mg l⁻¹, BZT: od 103 do 147 mg l⁻¹) niż na stanowisku II (ChZT: od 44 do 70,5 mg l⁻¹; BZT: od 28,2 do 41 mg l⁻¹). Stężenie TSS w torfowisku przy jeziorze Moszne osiągało od 510 do 790 mg l⁻¹ (najwyższe stężenie odnotowano w czerwcu, najniższe w maju). W Torfowisku Orłowskim parametr ten

osiągał od 103 do 168 mg l⁻¹ (najwyższe stężenie odnotowano w maju, najniższe we wrześniu). Pozostałe analizowane parametry przyjmowały wyższe stężenia dla torfowiska przy jeziorze Moszne niż dla Torfowiska Orłowskiego (tab. 1, 2).

Ameby skorupkowe – bogactwo gatunkowe i liczebność

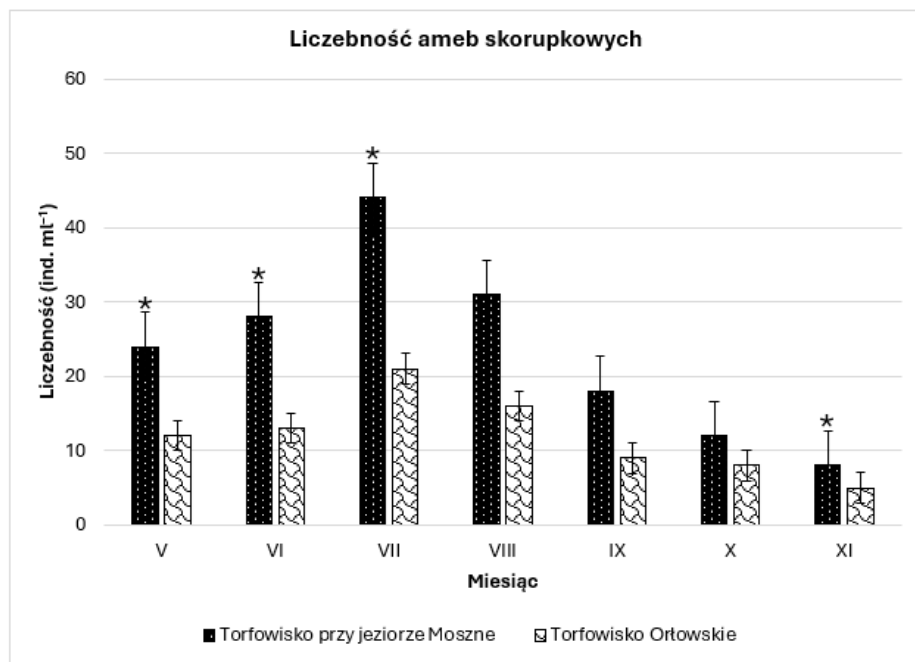
Liczba gatunków ameb skorupkowych różniła się między siedliskami. W torfowisku przy jeziorze Moszne występowało 7 taksów ameb skorupkowych, podczas gdy w Torfowisku Orłowskim oznaczono 4 taksony ameb. Na stanowisku I najwyższa liczba taksonów została odnotowana w maju oraz w lipcu, natomiast na stanowisku II w maju oraz w czerwcu. Liczba taksonów ameb w pozostałych miesiącach była zróżnicowana, lecz można stwierdzić, że najwyższa liczba występowała w badanych siedliskach w sezonie letnim, natomiast najniższa w sezonie jesiennym.

Liczebność ameb skorupkowych różniła się w zależności od siedliska. Istotnie wyższą obfitość w każdym miesiącu odnotowano w wodach z torfowiska przy jeziorze Moszne. Zagęszczenie ameb skorupkowych wzrastało od maja do lipca (od 15 do 44 osob. ml⁻¹). Następnie od sierpnia do listopada zaobserwowano stopniowy spadek liczebności (od 31 do 8 osob. ml⁻¹). W Torfowisku Orłowskim wykazano podobną zależność – mianowicie w miesiącach wiosennych (maj) i letnich (czerwiec, lipiec) występował wzrost obfitości (od 10 do 21 osob. ml⁻¹), natomiast w kolejnych miesiącach (od sierpnia do listopada) obserwowano stopniowy spadek liczebności ameb skorupkowych (od 16 do 5 osob. ml⁻¹). Zarówno na I, jak i na II stanowisku najwyższą liczebność odnotowano w lipcu (torfowisko przy jeziorze Moszne: 44 osob. ml⁻¹, Torfowisko Orłowskie: 21 osob. ml⁻¹). Najniższe zagęszczenie tych pierwotniaków zaobserwowano w listopadzie (torfowisko przy jeziorze Moszne: 8 osob. ml⁻¹; Torfowisko Orłowskie: 5 osob. ml⁻¹), co przedstawiono na rycinie 2.

Struktura dominacji ameb skorupkowych była zróżnicowana zarówno pomiędzy siedliskami, jak i w układzie sezonowym, a także pomiędzy stanowiskami. W torfowisku przy jeziorze Moszne w maju, czerwcu oraz lipcu dominowały *Nebela tinctoria*, *Arcella discoides*, *Euglypha rotunda* oraz *Hyalosphenia flavum*. W sierpniu oraz wrześniu dominowały *Arcella discoides* oraz *Hyalosphenia subulava*. W październiku oraz w listopadzie występowała głównie *Arcella discoides*. W Torfowisku Orłowskim w całym okresie badawczym dominowały *Arcella discoides*, *Arcella vulgaris* oraz *Centropyxis aculeata*.

Biomasa ameb skorupkowych

Biomasa ameb różniła się w zależności od siedliska oraz od sezonu badawczego. Wyższą biomasę ameb skorupkowych odnotowano w torfowisku przy jeziorze Moszne (od 3 do 8 µg C ml⁻¹) niż w Torfowisku Orłowskim (od 2 do 6 µg C ml⁻¹). Istotne zależności obserwowano też w przypadku czynników sezonowych w poszczególnych siedliskach. Biomasa ameb skorupkowych w torfowisku przy jeziorze Moszne w maju oraz w czerwcu nie różniła się (6 µg C ml⁻¹). Natomiast w lipcu oraz w sierpniu zaobserwowano jej istotny wzrost (od 7 do 8 µg C ml⁻¹). W kolejnych miesiącach obserwowano spadek biomasy ameb skorupkowych (od 5 do 3 µg C ml⁻¹). W przypadku Torfowiska Orłowskiego biomasa tych pierwotniaków była taka sama w maju oraz czerwcu (4 µg C ml⁻¹), a także w sierpniu oraz wrześniu (6 µg C ml⁻¹). Od maja do września obserwowano również jej wzrost (od 4 do 6 µg C ml⁻¹). Następnie w październiku oraz w listopadzie nastąpił stopniowy spadek tego parametru – od 6 do 2 µg C ml⁻¹ (ryc. 3).



Ryc. 2. Liczebność ameb skorupkowych w wodach torfowiska przy jeziorze Moszne oraz Torfowiska Orłowskiego w poszczególnych miesiącach (maj–listopad). Test t-Studenta dla prób niezależnych: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

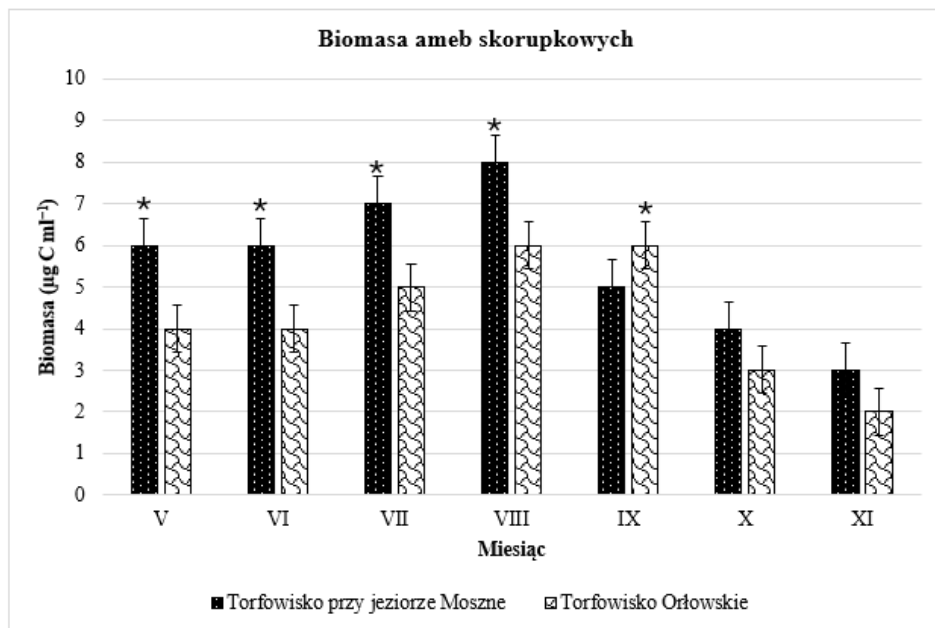
Fig. 2. Abundance of testate amoebae in the water of the Moszne Lake peatland and the Orłowskie Peatland, by month (May–November). Student's t-test for independent samples: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Analiza korelacji

Analiza korelacji wskazuje, że w torfowisku przy jeziorze Moszne wiosną oraz latem czynnikami najistotniej wpływającymi na ameby skorupkowe było pH (od $r = 0,59$ do $r = 0,61$; $p < 0,05$) oraz tlen (od $r = 0,53$ do $r = 0,42$; $p < 0,05$). Jesienią natomiast odnotowano korelację między amebami skorupkowymi a tlenem ($r = 0,51$, $p < 0,05$). Wiosną w Torfowisku Orłowskim odnotowano dodatnią korelację pomiędzy amebami skorupkowymi a związkami biogennymi ($r = 0,59$; $p < 0,05$), tlenem ($r = 0,62$; $p < 0,05$) i chlorofilem *a* ($r = 0,45$; $p < 0,05$). Latem oraz jesienią czynnikami wpływającymi najistotniej były związki biogenne – od $r = 0,51$ do $r = 0,45$; $p < 0,05$ (tab. 3).

DYSKUSJA

Działalność antropogeniczna może powodować nieprawidłowe funkcjonowanie ekosystemów torfowiskowych. Objawia się to przede wszystkim różnicami w strukturze i różnorodności mikroorganizmów, które reagują na zmieniające się warunki środowiskowe [Booth 2010]. Jedną z grup mikroorganizmów, u których obserwowano zmiany



Ryc. 3. Biomasa ameb skorupkowych. Test t-Studenta dla prób niezależnych: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Fig. 3. Biomass of testate amoebae. Student's t-test for independent samples: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Tabela 3. Współczynniki korelacji liniowej pomiędzy amebami skorupkowymi w wodzie a zmiennymi środowiskowymi w poszczególnych miesiącach badawczych (maj–listopad)
Table 3. Linear correlation coefficients testate amoebae in water and environmental variables by study month (May–November)

Miesiąc/ Month	Torfowisko przy jeziorze Moszne Peatland near Lake Moszne					Torfowisko Orłowskie Orłowskie Peatland			
	Właściwości/ Parameters								
	pH	O ₂	Chl <i>a</i>	N-NH ₄	N-NH ₃	O ₂	Chl <i>a</i>	N-NH ₄	N-NH ₃
V	0,59	0,53				0,62	0,45	0,59	
VI	0,53	0,57						0,51	0,47
VII	0,64	0,54			0,32			0,44	
VIII	0,69	0,48	0,37	0,32				0,47	0,43
IX	0,61	0,42	0,39					0,5	0,43
X								0,47	
XI		0,51						0,45	

Puste pola oznaczają brak istotnej statystycznie korelacji w danym miesiącu

Empty fields indicate a lack of statistically significant correlation for the given month

ilościowe i jakościowe, wywołane wahającymi się parametrami środowiskowymi, są ameby skorupkowe. Jak wynika z danych literaturowych, istotny wpływ na strukturę i występowanie ameb skorupkowych w torfowiskach mają pH oraz poziom wody gruntowej (DWT) [Mitchell 2008]. W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano zmiany ilościowe oraz jakościowe ameb skorupkowych w poszczególnych sezonach. W miesiącach wiosennych oraz letnich liczebność ameb skorupkowych systematycznie wzrastała zarówno w wodach z torfowiska przy jeziorze Moszne, jak i w wodach z torfowiska Orłowskiego. Niemniej jednak liczebność tych mikroorganizmów była istotnie wyższa w torfowisku przy jeziorze Moszne. Stabilne warunki tlenowe oraz niższe stężenie biogenów w wodzie z tego torfowiska w porównaniu z wodą z torfowiska Orłowskiego, powodują, że torfowisko przy jeziorze Moszne stanowi lepsze środowisko życia dla pierwotniaków. Wahania parametrów fizycznych i chemicznych wody w torfowisku Orłowskim, które wpływają na pierwotniaki, powodowane mogą być zarówno zmianami klimatycznymi, jak również działalnością antropogeniczną.

Ameby skorupkowe są często głównymi drapieżnikami w zespołach mikroorganizmów torfowiskowych i najczęściej konsumują bakterie oraz heterotoficzne wiciowce [Jessey i in. 2012, Geisen i in. 2015]. Na obszarze badanych torfowisk stwierdzono łącznie występowanie 11 taksonów ameb skorupkowych, przy czym zdecydowana większość występowała w torfowisku przy jeziorze Moszne. Najliczniej reprezentowane były ameby skorupkowe należące do rodzajów *Arcella*, *Euglypha*, *Nebela* oraz *Hyalosphenia*. Szczególnie wysoki udział w ogólnej liczebności ameb osiągał rodzaj *Euglypha*. Większość z nich są to niewielkie gatunki (ok. 50 μm) i często charakteryzują się obecnością kolców na powierzchni skorupki. Mogą one stanowić dobrą bazę pokarmową dla ameb skorupkowych z rodzaju *Nebela*, których liczebność również była dość wysoka w badanym siedlisku. Gatunki ameb skorupkowych z rodzaju *Nebela* zazwyczaj występują na terenach o niskim pH oraz z przeważającym udziałem torfowców. Dominująca *Nebela tinctoria* charakteryzowała się obecnością symbiotycznych glonów wewnątrz komórki, co stanowi istotne przystosowanie do funkcjonowania w warunkach torfowisk ubogich w składniki odżywcze. Wśród obecnych gatunków ameb skorupkowych dość często występowała również *Hyalosphenia subulata* – gatunek wilgocioluby, który dzięki wrażliwości na ten czynnik jest jednym z ważniejszych wskaźników środowiskowych informujących o warunkach hydrologicznych [Booth 2010]. Istotny udział osiągały także ameby z rodzaju *Arcella*, głównie *Arcella discoides*. Gatunek ten jest często wskazywany w literaturze jako charakterystyczny dla torfowisk o wysokim i stabilnym poziomie wody [Lamentowicz i in. 2010]. Jednak, jak wykazały badania prowadzone przez Lamarre i in. [2013], *A. discoides* może również występować w siedliskach o zmiennym reżimie hydrologicznym oraz umiarkowanej zawartości jonów mineralnych. Tak szeroki zakres tolerancji ekologicznej sugeruje, że takson ten niekoniecznie wskazuje wyłącznie na optymalne warunki wodne, lecz może również przetrwać – a nawet być liczny w siedlisku o okresowych spadkach wód. Wyniki analizy zespołów ameb skorupkowych wskazują, że torfowisko przy jeziorze Moszne w badanym okresie było względnie stabilne hydrologicznie, a ewentualne zmiany w poziomie wód gruntowych zachodziły w sposób przejściowy i nie miały gwałtownego charakteru. W takim środowisku obec-

ność *A. discoides* jest zgodna z dotychczasową wiedzą o jego preferencjach siedliskowych. Z kolei występowanie tego taksonu w Torfowisku Orłowskim, gdzie poziom wód był niższy i bardziej zmienny, może wskazywać na jego zdolność adaptacyjną i szerszą tolerancję do dynamicznie zmieniających się warunków siedliskowych. Dlatego też obecność tego taksonu w Torfowisku Orłowskim, w którym poziom wody był istotnie niższy, potwierdza powyższe informacje. Poza amebami skorupkowymi z rodzaju *Arcella* w wodzie często był obecny *Centropyxis aculeata* – spotykany również w środowiskach, gdzie poziom wody jest niski. Jest to zgodne z naszymi obserwacjami oraz z badaniami prowadzonymi przez Mitchell i in. [2008], Payne i in. [2008], Swindles i in. [2009], którzy analizowali wymagania siedliskowe ameb skorupkowych. Ponadto gatunki z rodzaju *Centropyxis* są charakterystyczne dla siedlisk o wyższym stopniu żyzności i spotykane były także w torfowiskach o charakterze niskim [Mieczan i in. 2017]. Nasze obserwacje wykazały również, że w Torfowisku Orłowskim oprócz *Arcella discoides* i *Centropyxis aculeata* często występowała *Arcella vulgaris*, która także charakteryzuje się stosunkowo szerokim zakresem tolerancji ekologicznej. Obecność *Arcella discoides* może świadczyć o niestabilności hydrologicznej obiektu, a w przypadku torfowiska przejściowego wskazuje na inicjację kolejnych procesów i przemian [Lamarre i in. 2013]. Ponadto badania Jassey i in. [2011] wykazały, że gatunki tego rodzaju są często obecne w siedliskach bogatych w związki biogenne. Potwierdzają to analizy właściwości fizycznych i chemicznych, w których wyższe stężenie związków biogennych odnotowano w Torfowisku Orłowskim. Przedstawiciele gatunków z rodzaju *Arcella* wyróżniają się również wysoką tolerancją na zmiany temperatury oraz stężenia biogenów [Adamec 2011, Płachno i in. 2012].

Ameby skorupkowe dzięki umiejętności budowania trwałej skorupki i szybkiej reakcji na warunki środowiskowe są bardzo ważną grupą bioindykatorów w ekosystemach torfowiskowych [Mitchell i in. 2008, Mieczan i in. 2015]. W niniejszych badaniach ich zróżnicowanie gatunkowe oraz preferencje ekologiczne umożliwiają ocenę stanu środowiska, które zasiedlają. W przypadku bioindykacyjnego znaczenia ameb skorupkowych w torfowiskach należy szczególnie podkreślić ich wrażliwość na zmiany stężenia składników odżywczych w siedlisku. Zwiększony dopływ biogenów i innego typu zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego może doprowadzić do wycofania się grup organizmów charakterystycznych dla tych ekosystemów. Ameby skorupkowe dzięki niewielkim rozmiarom oraz szybkiej reprodukcji intensywniej reagują na zmieniające się warunki środowiska niż inne organizmy eukariotyczne i mogą dzięki temu służyć jako sygnał wczesnego ostrzegania przed nasilającymi się zmianami o charakterze antropogenicznym.

Wydaje się, że wpływ działalności antropogenicznej jest bardziej widoczny w Torfowisku Orłowskim. Jednocześnie niewątpliwym wpływ na ten stan mają coraz dynamiczniej zmieniające się warunki klimatyczne. Dlatego też niezbędne jest prowadzenie długoterminowych badań monitorujących ekosystemy torfowiskowe, które są szczególnie wrażliwe na różnego typu działania antropogeniczne, w tym zmiany klimatu.

WNIOSKI

1. Torfowisko przy jeziorze Moszne charakteryzuje się stabilnym poziomem wód gruntowych oraz niższym stężeniem biogenów, co sprzyja większej liczebności i różnorodności ameb skorupkowych.

2. Torfowisko Orłowskie wykazuje oznaki większej presji środowiskowej, m.in. zmiennego poziomu wód gruntowych oraz wyższego stężenia biogenów, co może być efektem zarówno działalności antropogenicznej, jak i zmian klimatu.

3. Ameby skorupkowe są czułymi bioindykatorami – ich liczebność i skład gatunkowy silnie korelują ze zmianami parametrów fizyczno-chemicznych środowiska (m.in. pH, stężeniem biogenów, stabilnością hydrologiczną).

4. Gatunki takie jak *Arcella discoides* czy *Centropyxis aculeata* wykazują dużą tolerancję ekologiczną, co pozwala im przetrwać i funkcjonować zarówno w warunkach stabilnych, jak również niestabilnych.

5. Systematyczny monitoring ameb skorupkowych może pełnić funkcję wczesnego ostrzegania przed degradacją ekosystemów torfowiskowych, które są wyjątkowo wrażliwe na wpływy antropogeniczne i zmiany klimatu.

Źródło finansowania: Badania realizowane w ramach Programu Strategicznego: „Razem dla bioróżnorodności” ze środków Funduszu Badań i Działań na rzecz Ochrony Środowiska na obszarze Lubelskiego Zagłębia Węglowego – Granty dla naukowców – na podstawie umowy nr 0701-2/2024/6.

Inwestor: Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA, Bogdanka, 21-013 Puchaczów.

PIŚMIENNICTWO

- Adamec L., 2011. The smallest but fastest. Ecophysiological characteristics of traps of aquatic carnivorous Utricularia. *Plant Signal Behav.* 6(5), 640–646. <https://doi.org/10.4161/psb.6.5.14980>
- Booth R.K., Lamentowicz M., Charman D. 2010. Preparation and analysis of testate amoebae in peatland paleoenvironmental studies. *Mires Peat* 7, 1–7.
- Evans C.D., Peacoc M., Baird A., Artz R., Burden A., Callaghan N., Chapman P., Cooper H., Coyle M., Craig E, et al., 2021. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 593, 548–552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Geisen S., Laros I., Vizcaino A., Bonkowski M., De Groot G.A., 2015. Not all are free-living: high-throughput DNA metabarcoding reveals a diverse community of protists parasitizing soil metazoa. *Mol. Ecol.* 24, 4556–4569. <https://doi.org/10.1111/mec.13238>
- Gilbert D., Amblard C., Bourdier G., Francez A.J., 1998. The microbial loop at the surface of a peatland: structure, functioning and impact of nutrients inputs. *Microb. Ecol.* 35, 89–93. <https://doi.org/10.1007/s002489900062>
- Golterman H.L., 1969. Methods for chemical analysis of fresh waters. IBP Handbook No. 8. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Jassey V.E., Shimano S., Dupuy C., Toussaint M.L., Gilbert D., 2011. Characterizing the feeding habits on the testate amoebae *Hyalosphenia papilio* and *Nebela tinctoria* along narrow „fen-

- bog” gradient using digestive vacuole content and ^{13}C and ^{15}N isotopic analyses. *Protist* 163, 451–464. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2011.07.006>
- Lamarre A., Magnan G., Garneau M., Boucher E., 2013. A testate amoeba-based transfer function for paleohydrological reconstruction from boreal and subarctic peatlands in northeastern Canada. *Quat. Int.* 306, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.05.054>
- Lamentowicz M., Van der Knaap P., Lamentowicz Ł., Van Leeuwen J.F.N., Mitchell E.A.D., Goslar T., Kamenik C. 2010. A near-annual palaeohydrological study based on testate amoebae from an Alpine mire: surface wetness and the role of climate during the instrumental period. *J. Quat. Sci.* 25, 190–202. <https://doi.org/10.1002/jqs.1295>
- Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S., 2019. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100. *Nat. Clim. Chang.* 9, 945–947. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- Mieczan T., Adamczuk M., Tarkowska-Kukuryk M., Pęczuł W., Pawlik-Skowrońska B., 2017. Effects of experimental addition of nitrogen and phosphorus on microbial and metazoan communities in a peatbog. *Eur. J. Protistol.* 59, 50–64.
- Mieczan T., Tarkowska-Kukuryk M., Adamczuk M., Pęczuła W., Demetraki-Paleolog A., Niedźwiecki M., 2015. Research of different types of peatbogs: relationships of biocenosis structures and physico-chemical parameters. *Pol. J. Environ. Stud.* 1, 191–198.
- Mitchell E.A.D., Charman D.J., Warner B.G., 2008. Testate amoebae analysis in ecological and paleoecological studies of wetlands: past, present and future. *Biodiv. Conserv.* 17, 2115–2137. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9221-3>
- Obroślak R., Mazur A., Józwiakowski K., Dorozhynsky O., Grzywna A., Rybicki R., Nieścioruk K., Król Ż., Gabryszuk J., Gajewska M., 2017. Using terrestrial laser scanning in inventorying of a hybrid constructed wetland system. *Water Sci. Technol.* 76, 2664–2671. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.436>
- Ogólnopolskie Towarzystwo Ochrony Ptaków (OTOP), 2024. Podręcznik renaturyzacji i ponownego nawadniania torfowisk. OTOP, Marki. <https://otop.org.pl/2024/11/22/podrecznik-renaturyzacji-i-ponownego-nawadniania-torfowisk/>
- Payne R., Charman D.J., Matthews S., Eastwood W., 2008. Testate amoebae as palaeoclimate proxies in Sürmene Ağaçbaşı Yaylasi peatland (Northeast Turkey). *Wetlands* 28, 311–323. <https://doi.org/10.1672/07-42.1>
- Plachno B.J., Łukaszek M., Wołowski K., Adamec L., Stolarczyk P., 2012. Aging of *Utricularia* traps and variability of microorganisms associated with that micro habitat. *Aquat. Bot.* 97, 44–48. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.11.003>
- Swindles G.T., Charman D.J., Roe H.M., Gheorghiu D.M., 2009. Towards reconstructing hydroclimate using testate amoebae: development of transfer functions based on surface samples from Romania. *Eur. J. Protistol.* 45, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2008.11.001>
- Utermöhl H., 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. T. 9. *Schweizerbart*, 1–38. <https://doi.org/10.1080/05384680.1958.11904091>

Abstract. Analysis of the physicochemical properties of a habitat, together with data on the ecological requirements of individual organism groups, makes it possible to determine the current state of the environment with high precision. Testate amoebae thrive in biogenic sediments, and their analysis thus provides an opportunity to reconstruct the developmental history of a peatland, including any potential impacts of nearby mining operations. The aim of this study was to assess the influence of the LW Bogdanka SA coal mine on the peatland ecosystems of Polesie National Park. Monthly water samples were collected at two peatlands within the Park from May through November. At each sampling event, we measured the water’s physical and chemical parameters and examined the qualitative and quantitative structure of the testate-amoeba community. Our results indicate that testate amoebae exhibit greater taxonomic diversity, abundance, and biomass

in the peatland adjacent to Lake Moszne, where water-quality parameters – particularly dissolved oxygen levels and concentrations of bioavailable nutrients – remain relatively stable. In contrast, the Orłowskie Peatland shows clearer signs of anthropogenic influence: elevated nutrient concentrations here correspond with both quantitative and qualitative shifts in the testate-amoeba assemblage.

Keywords: anthropopressure, biogenic compounds, testate amoebae

Otrzymano/Received: 21.01.2025
Zaakceptowano/Accepted: 20.05.2025
Opublikowano/Published: 30.06.2025