

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN – POLONIA

VOL. LXXXI

SECTIO B

2026

STANISŁAW CHMIEL

<https://orcid.org/0000-0002-5821-2124>

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku

al. Kraśnicka 2D, 20-718 Lublin, Polska

stanislaw.chmiel@mail.umcs.pl

MAGDALENA KREKORA

<https://orcid.org/0000-0002-8762-2552>

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku

al. Kraśnicka 2D, 20-718 Lublin, Polska

magdalena.krekora@mail.umcs.pl

MARIUSZ PLIŻGA

<https://orcid.org/0000-0001-5296-861X>

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku

al. Kraśnicka 2D, 20-718 Lublin, Polska

mariusz.plizga@mail.umcs.pl

KRZYSZTOF STĘPNIEWSKI

<https://orcid.org/0000-0002-4992-2749>

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku

al. Kraśnicka 2D, 20-718 Lublin, Polska

krzysztof.stepniewski@mail.umcs.pl

Wpływ podłoża skalnego na hydrochemiczne zróżnicowanie
wód podziemnych w rejonie torfowiska alkalicznego
(Bagno Staw i Bagno Bubnów – Poleski Park Narodowy)*

Influence of Geological Substratum on the Hydrochemical Differentiation of Groundwater
in Alkaline Fen Area (Bagno Staw and Bagno Bubnów – Polesie National Park)

*Publikacja sfinansowana ze środków Funduszu Badań i Działań na rzecz Ochrony Środowiska na obszarze Lubelskiego Zagłębia Węglowego, Program Strategiczny „Razem dla Bioróżnorodności. Gran-ty dla Naukowców 2024”. Badania realizowano w ramach projektu „Wdrożenie systemu monitoringu hydrometeorologicznego do operacyjnego diagnozowania i zarządzania ekosystemami wodnymi PPN”.

Abstract: Alkaline fens are rare and sensitive hydrogenic ecosystems whose functioning depends on the supply of groundwater rich in calcium and bicarbonate ions. The aim of this study is to assess the influence of geological substratum on the hydrochemical differentiation of groundwater in the Bagno Staw and Bagno Bubnów area (Polesie National Park). The research was conducted in summer 2024 at nine piezometers tapping waters from peat deposits, carbonate formations, and sands. The analyses included field measurements of basic physicochemical parameters as well as laboratory determinations of ionic composition, organic matter content, and selected elements. The waters exhibited a varied degree of mineralization and redox conditions, clearly dependent on the type of aquifer. The dominant chemical water type was Ca-HCO_3 , characteristic of alkaline fens. Peat waters were distinguished by elevated concentrations of organic matter, iron, and manganese, as well as reducing conditions, whereas waters from mineral formations showed lower concentrations of these indicators. Correlation analysis and multivariate methods (CA, PCA) revealed the presence of three principal water types in the study area, corresponding to peat, carbonate formations, and sands. The results highlight the key role of geological substratum and redox processes in shaping the hydrochemistry of alkaline fens and underline the importance of chemical monitoring for their protection.

Keywords: alkaline fens type 7230; hydrochemistry; monitoring; Polesie National Park

Abstrakt: Torfowiska alkaliczne należą do unikatowych i wrażliwych ekosystemów hydrogeniczych, których funkcjonowanie zależy od dopływu wód podziemnych bogatych w jony wapniowe i wodorowęglanowe. Celem opracowania jest ocena wpływu podłoża skalnego na zróżnicowanie hydrochemiczne wód podziemnych w rejonie Bagna Staw i Bagna Bubnów (Poleski Park Narodowy). Badania przeprowadzono latem 2024 r. w dziewięciu piezometrach ujmujących wody z torfów, utworów węglanowych oraz piasków. Analizy obejmowały pomiary terenowe podstawowych parametrów fizyczno-chemicznych oraz oznaczenia składu jonowego, materii organicznej i wybranych pierwiastków w laboratorium. Wody charakteryzowały się zróżnicowanym stopniem mineralizacji oraz warunkami redoks, wyraźnie zależnymi od typu warstwy wodonośnej. Dominującym typem chemicznym były wody Ca-HCO_3 , typowe dla torfowisk alkalicznych. Wody torfowe cechowały się podwyższoną zawartością materii organicznej, żelaza i manganu oraz warunkami redukcyjnymi, natomiast wody z utworów mineralnych wykazywały niższe stężenia tych wskaźników. Analizy korelacji oraz metody wielowymiarowe (CA, PCA) wykazały istnienie trzech zasadniczych typów wód w badanym rejonie, odpowiadających torfom, utworom węglanowym i piaskom. Wyniki podkreślają kluczową rolę podłoża geologicznego i procesów redoks w kształtowaniu hydrochemii torfowisk alkalicznych oraz znaczenie monitoringu chemicznego dla ich ochrony.

Słowa kluczowe: torfowiska alkaliczne typ 7230; hydrochemia; monitoring; Poleski Park Narodowy

WSTĘP

Torfowiska alkaliczne należą do unikatowych ekosystemów hydrogeniczych strefy umiarkowanej. Ich funkcjonowanie uzależnione jest od dopływu wód podziemnych o wysokiej zawartości jonów wapniowych oraz wodorowęglanowych, które nadają środowisku charakter zasadowy. Sprzyja to występowaniu specyficznej roślinności, zdominowanej przez mchy brunatne i niskie turzycy mechowiskowe

(European Commission, 2013; Hájek i in., 2006; Herbichowa i Wołejko, 2004; Pawlikowski i Kozub, 2019; Stańko i in., 2018; Wołejko i in., 2019).

Ekosystemy te występują przede wszystkim w regionach o stabilnym reżimie wodnym i obecności skał węglanowych: Skandynawii, Rosji, Kanadzie i Europie Środkowej (European Environment Agency, 2018; Jiménez-Alfaro i in., 2014; Joosten i in., 2017; Lamers i in., 2015; Šefferova Stanova i in., 2008). W Polsce znajdują się głównie w północno-wschodniej i wschodniej części kraju, rzadziej w obrębie pasm wyżynnych i górskich (Herbichowa i Wołejko, 2004; Wołejko i in., 2019). Pomimo niewielkiej powierzchni pełnią kluczowe funkcje ekosystemowe, związane z utrzymaniem różnorodności biologicznej i retencjonowaniem wody, a także stabilizują bilans węgla oraz stanowią cenne archiwa procesów biogeochemicznych i paleohydrologicznych (Dobrowolski i in., 2016; Joosten i in., 2017).

Torfowiska alkaliczne należą do zagrożonych siedlisk hydrogenicznych, których stabilność zależy od złożonych interakcji pomiędzy warunkami hydrologicznymi, hydrogeologicznymi i biogeochemicznymi (Wołejko i in., 2019). Ze względu na swoją wyjątkową wartość przyrodniczą zostały ujęte jako siedlisko przyrodnicze 7230 *Alkaline fens* w załączniku I do dyrektywy siedliskowej, co obliguje państwa członkowskie do ich aktywnej ochrony. Typologicznie zaliczane są do trzech grup: słabo kwaśnych, neutralnych i zasadowych młak, torfowisk źródliskowych oraz torfowisk przepływowych niskich (Herbichowa i Wołejko, 2004). Funkcjonowanie torfowisk alkalicznych możliwe jest przy wysokim i względnie stabilnym poziomie wód gruntowych, utrzymującym się na powierzchni terenu lub nieznacznie poniżej. Ich ochrona wymaga zrozumienia procesów hydrologicznych i chemicznych, które warunkują ich trwałość (Stańko i in., 2018).

Ponieważ torfowiska są układami hydrogenicznymi silnie wrażliwymi na zakłócenia hydrologiczne, monitoring hydrochemiczny stanowi kluczowy element oceny ich stanu i planowania działań ochronnych. Zmiany zwierciadła wody, stopnia natlenienia, zasolenia i parametrów redukcyjnych mogą szybko i często nieodwracalnie wpływać na strukturę i funkcjonowanie ekosystemu torfowego. Analiza parametrów fizyczno-chemicznych wód pozwala identyfikować kierunki zmian środowiskowych, oceniać zakres oddziaływania czynników antropogenicznych oraz formułować podstawy naukowe dla działań renaturyzacyjnych. W przypadku Poleskiego Parku Narodowego monitoring ten ma znaczenie szczególne, ponieważ Bagno Bubnów i Bagno Staw należą do najlepiej zachowanych torfowisk alkalicznych w Polsce. Przeanalizowane w niniejszym opracowaniu wyniki badań hydrochemicznych stanowią podstawę do oceny aktualnego stanu środowiska, diagnozy procesów biogeochemicznych oraz określenia warunków funkcjonowania tych dwóch kluczowych obiektów. Monitoring hydrochemiczny stanowi bowiem podstawowe narzędzie analizy dynamiki procesów środowiskowych i oceny skuteczności działań ochronnych (Elzinga i in., 2001).

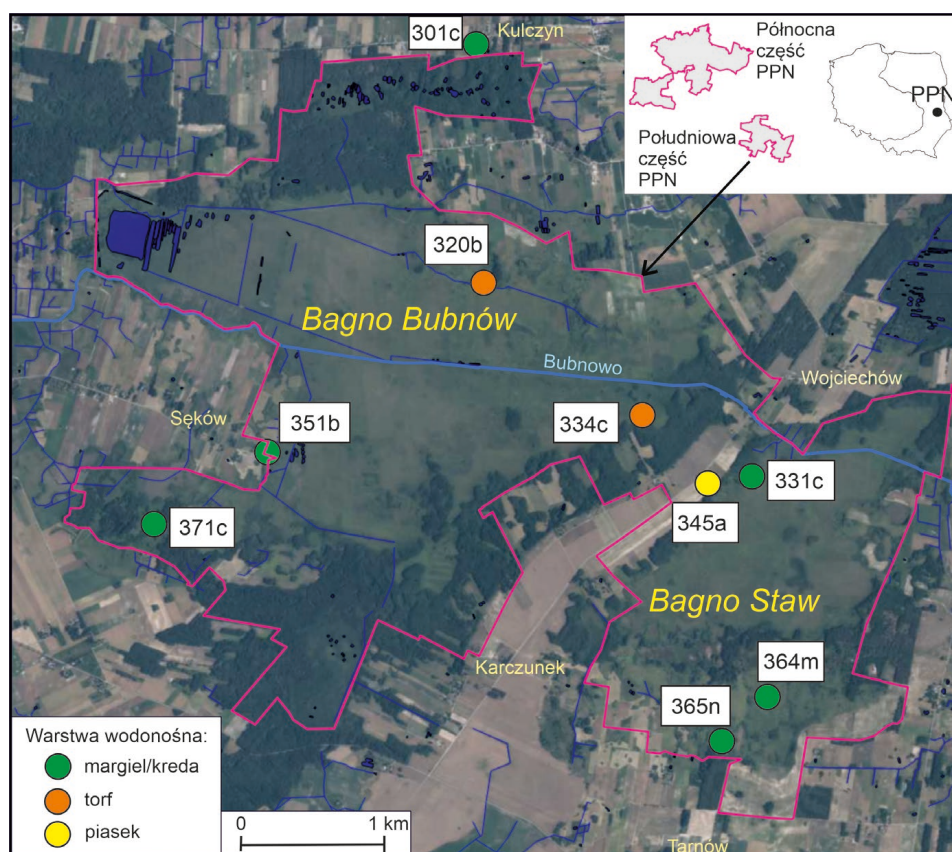
OBSZAR BADAŃ

Poleski Park Narodowy położony jest we wschodniej części Polski, w obrębie Polesia Lubelskiego – regionu o wyjątkowo złożonych stosunkach wodnych i wysokiej koncentracji ekosystemów hydrogenicznych (zob. ryc. 1). O jego szczególnej wartości przyrodniczej decyduje mozaika jezior, torfowisk i innych obszarów podmokłych, ukształtowanych w warunkach płytkiego zwierciadła wód podziemnych i ograniczonego odpływu (Chmielewski, 1989; Chmielewski i in., 2020; Hara-simiuk i in., 1998; Mazhaisky i in., 2024; Michalczyk i in., 2020; Wilgat, 1963; Wilgat i Fijałkowski, 1975; Wilgat i in., 1991). Park ma charakter enklawowy; składa się z dwóch odrębnych powierzchni: części północnej i części południowej. Zróżnicowanie litologiczne i hydrologiczne poszczególnych enklaw wpływa na przestrzenną zmienność procesów hydrogeochemicznych, czyniąc Poleski Park Narodowy naturalnym laboratorium do prowadzenia badań dotyczących funkcjonowania torfowisk. Szczególne znaczenie w części południowej mają torfowiska alkaliczne (Bagno Staw i Bagno Bubnów), rozwijające się w kontakcie z utworami węglanowymi górnej kredy i osadami czwartorzędowymi. Bagno Bubnów tworzy rozległy, kilkusethektarowy kompleks torfowiskowy o zróżnicowanej miąższości osadów organicznych i silnym powiązaniu z podłożem węglanowym. Bagno Staw jest obiektem mniejszym powierzchniowo. Obszar ten charakteryzuje się występowaniem zarówno okresowych nadmiarów wody, jak i znacznych deficytów, wynikających z warunków klimatycznych, hydrogeologicznych oraz wieloletnich oddziaływań antropogenicznych (Michalczyk i in., 2024).

Warunki klimatyczne kształtowane są przez dominującą cyrkulację mas powietrza polarno-morskiego (około 60%), które w lecie przynoszą ochłodzenie i opady, natomiast zimą ocieplenie (Kaszewski, 2008). Rzadziej notuje się napływy powietrza polarno-kontynentalnego (20%) i arktycznego (12%). Okresowo oddziałują również masy zwrotnikowe, wywołujące wzrost temperatury i opady burzowe. Średnia roczna suma opadów wynosi około 550 mm, przy znacznej przewadze opadów letnich (około 65% rocznej sumy). Pokrywa śnieżna zalega średnio przez około 75 dni. Średnia roczna temperatura powietrza wynosiła w XX w. 7,3°C; najcieplejszym miesiącem był lipiec (około 18°C), a najzimniejszym styczeń (około -4,1°C). W ostatnim okresie temperatura wzrosła o ponad 1,5°C (Kaszewski i in., 2020). Parowanie potencjalne w okresie wegetacyjnym przekracza 600 mm, a parowanie terenowe w skali roku szacowane jest na około 450 mm (Michalczyk i in., 2024). W półroczu letnim parowanie przewyższa opady, a w półroczu zimowym dominują warunki sprzyjające retencji. Taka struktura zasilania prowadzi do okresowych deficytów wodnych.

Pod względem hydrograficznym obszar badań leży w zlewni górnej Włodawki, dopływ Bugu – dorzecze Wisły. W ujęciu hydrogeologicznym leży w lubel-

sko-podlaskim regionie hydrogeologicznym (Paczyński, 1995). Na tym obszarze warunki retencjonowania wody determinowane są budową geologiczną, rzeźbą terenu, typami gleb i pokryciem terenu (Michalczyk i in., 2024; Turczyński i in., 2009). Wody podziemne występują w osadach czwartorzędowych (piaski, piaski pylaste i gliniaste) oraz lokalnie w skałach górnokredowych (opoki, margle, kreda piszcząca). Na holocenijskiej równinie akumulacyjnej dominują torfy i namuły mineralno-organiczne. Ze względu na obecność glin zwałowych, iłów i mułków infiltracja wód opadowych jest ograniczona, a płytkie zwierciadło wód podziemnych (zwykle <1 m p.p.t.) sprzyja szybkiemu odpływowi i intensyfikacji ewapotranspiracji (Michalczyk i in., 2020; Turczyński i in., 2009).



Ryc. 1. Położenie obszaru badań oraz lokalizacja punktów poboru próbek wody do analiz fizyczno-chemicznych wód – południowa część Poleskiego Parku Narodowego (badania własne)

Fig. 1. Location of the study area and sampling points for physicochemical water analyses – southern part of the Polesie National Park (Authors' own research)

Szczegółowe rozpoznanie budowy geologicznej Bagna Staw i Bagna Bubnów (Pietruczuk, 2020) wskazuje, że akumulacja biogeniczna na torfowiskach zachodziła w warunkach telmatycznych (torfy mszyste, turzycowo-trzciniowo-mszyste i turzycowo-mszyste) oraz limnicznych (gytia wapienno-detrusowa, detrusowa i wapienna). Miąższość tych serii na Bagnie Staw dochodzi do 10 m, a na Bagnie Bubnów przekracza 8 m.

METODY BADAŃ

Badania obejmowały analizę próbek wód podziemnych pobranych z dziewięciu piezometrów zlokalizowanych w rejonie Bagna Bubnów i Bagna Staw, będących częścią Poleskiego Parku Narodowego. Pobór próbek wody do analiz przeprowadzono w półroczu letnim 2024 r. Piezometry przed poborem wody były oczyszczane poprzez pompowanie słupa wody do stabilizacji temperatury wody (Temp) oraz przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW). Badania terenowe obejmowały pomiar temperatury wody, jej odczynu, PEW, stężenia tlenu (DO), potencjału redoks (ORP) i głębokości położenia zwierciadła wody podziemnej oraz pobór próbek wody do badań w laboratorium po ich uprzednim filtrowaniu przez sączek 0,45 μm . Próbkę wody do oznaczeń metali ciężkich stabilizowano kwasem azotowym, a biogenów – kwasem siarkowym.

Badania laboratoryjne obejmowały oznaczenie anionów i kationów chromatografem jonowym firmy Metrohm, model MIC-3. Do oznaczeń anionów (Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^-) wykorzystano kolumnę Metrosep A SUPP5 250, a kationów (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) – kolumnę Metrosep C2 150. Chromatograf jonowy kalibrowano wzorcami firmy Merck: wzorec wieloelementowy anionowy ICertiPur, wzorec wieloelementowy anionowy IICertiPur o stężeniu 1000 mg/l, wzorec wielopierwiastkowy kationowy VIIICertiPur o stężeniu 100 mg/l. Stężenie rozpuszczonego węgla organicznego (RWO) oraz biologicznego (BZT) i chemicznego (CHZT) zapotrzebowania na tlen oznaczono spektrometrem Pastel UV firmy Secoman. Poprawność wykonanych analiz weryfikowano certyfikowanym materiałem odniesienia Environment Canada MISSIPPI-14 oraz ION-915. Wyniki podstawowych oznaczeń sprawdzono także metodą bilansu jonowego wody.

Oznaczenia metali wykonano z wykorzystaniem spektrometru ICP-MS XSERIES 2 firmy Thermo. Przed etapem oznaczenia próbki wody roztwarzano w mineralizatorze UV. Do sprawdzenia poprawności wykonywanych analiz wykorzystano certyfikowane materiały odniesienia: EnviroMat ES-L-2 (woda o niskim stężeniu pierwiastków) oraz EnviroMat ES-H-2 (woda o wysokim stężeniu pierwiastków).

Analiza statystyczna zebranego materiału obejmowała zarówno statystykę podstawową (wartości minimalne, maksymalne, średnie, odchylenie standardowe), jak i metody wielowymiarowe (analiza składowych głównych PCA [*principal component analysis*] oraz skupień CA [*cluster analysis*]), co umożliwiło identyfikację głównych czynników kontrolujących skład chemiczny wód oraz pozwoliło na porównanie próbek wód pobranych z piezometrów ujmujących wody z utworów mineralnych i organicznych. Do analizy danych wykorzystano program Statistica 13.

WYNIKI I DYSKUSJA

W badaniach porównano parametry fizyczno-chemiczne wód podziemnych pobranych z dziewięciu piezometrów reprezentujących zróżnicowane litologicznie i geochemicznie warstwy wodonośne. Z opisu profili hydrogeologicznych wykonanych podczas instalacji piezometrów wynika, że dwa piezometry ujmowały wody z torfów (334c, 320b), sześć ze skał węglanowych (typu kreda piszcząca/margiel) z nadkładem piasek/glina (301a, 364m, 365n, 371c) i torf (331c, 351b) oraz jedna próbka z warstwy wodonośnej wykształconej w piaskach (345a).

W interpretacji wyłączono wskaźniki o wartości stężeń poniżej lub na granicy oznaczalności ($<0,001$), w tym pierwiastki śladowe (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn) oraz NO_2^- ($<0,01$). Pozwoliło to uzyskać spójny zestaw danych liczbowych, obejmujący: temperaturę wody (Temp), odczyn wody (pH), przewodność elektrolityczną właściwą (PEW), substancje rozpuszczone (TDS), aniony (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), kationy (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+), parametry tlenowe (O_2 , ORP), materię organiczną (RWO, CHZT, BZT_s), krzem, glin, żelazo i mangan (zob. tab. 1).

Tab. 1. Wartości charakterystyczne badanych wód w rejonie Bagna Staw i Bagna Bubnów (badania własne)

Tab. 1. Characteristic values of groundwater parameters in the Bagno Staw and Bagno Bubnów area (Authors' own research)

Wskaźnik / Indicator	Minimum / Minimum	Średnia / Average	Maksimum / Maximum	Odchylenie standardowe / Standard deviation
H [m p.p.t.]	0,34	1,47	3,6	1,2
Temp [°C]	11,2	12,7	15,2	1,4
pH [–]	6,83	7,25	7,67	0,27
O_2 [mg/dm ³]	1,07	2,20	4,46	1,1
ORP [mV]	–67	50	170	80
PEW [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	66	585	1126	305
RWO [mgC/dm ³]	0,6	7,0	25,9	8,7
BZT _s [mgO ₂ /dm ³]	0,7	8,1	24,2	8,4
CHZT [mgO ₂ /dm ³]	2,3	17,7	51,5	16,5

Wskaźnik / <i>Indicator</i>	Minimum / <i>Minimum</i>	Średnia / <i>Average</i>	Maksimum / <i>Maximum</i>	Odchylenie standardowe / <i>Standard deviation</i>
TDS [mg/dm ³]	70	510	741	207
HCO ₃ ⁻ [mg/dm ³]	30	347	543	149
Cl ⁻ [mg/dm ³]	0,78	3,90	9,90	2,87
SO ₄ ²⁻ [mg/dm ³]	0,35	10,66	29,08	11,54
Na ⁺ [mg/dm ³]	1,30	3,18	4,75	1,12
K ⁺ [mg/dm ³]	0,21	0,77	2,64	0,76
Ca ²⁺ [mg/dm ³]	15	107	156	42
Mg ²⁺ [mg/dm ³]	0,87	2,82	4,72	1,39
NH ₄ ⁺ [mg/dm ³]	0,01	0,07	0,24	0,08
NO ₃ ⁻ [mg/dm ³]	0,08	3,01	11,15	4,21
NO ₂ ⁻ [mg/dm ³]	<0,01	0,02	0,03	0,01
PO ₄ ³⁻ [mg/dm ³]	0,07	0,25	0,56	0,19
F ⁻ [mg/dm ³]	0,09	0,35	0,86	0,23
Si [mg/dm ³]	4,78	7,00	10,05	1,9
Al [mg/dm ³]	0,03	0,25	1,54	0,49
Fe [mg/dm ³]	0,02	1,81	6,11	2,06
Mn [mg/dm ³]	0,01	0,09	0,45	0,14
Pb [mg/dm ³]	<0,001	0,002	0,008	0,003
Cd [mg/dm ³]	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cu [mg/dm ³]	<0,001	0,008	0,012	0,003
Cr [mg/dm ³]	<0,001	0,001	0,002	0,001
Ni [mg/dm ³]	<0,001	0,003	0,005	0,001
Co [mg/dm ³]	<0,001	0,003	0,006	0,002
As [mg/dm ³]	<0,001	0,002	0,003	0,001
Hg [mg/dm ³]	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Wyniki analiz wykazały, że zróżnicowanie badanych wskaźników między próbkami było znaczne i odzwierciedlało charakter litologiczny i geochemiczny skał. Stwierdzone wartości pH mieściły się w zakresie typowym dla torfowisk alkalicznych (od 6,83 do 7,63), przy czym wody w torfach miały nieco niższe wartości (6,83–7,12), natomiast w utworach mineralnych wykazywały odczyn lekko zasadowy (7,11–7,63). Stężenie rozpuszczonego tlenu było niskie (1,07–4,46 mg/dm³), szczególnie w torfach, co może wskazywać na aktywne warunki redukcyjne. Jednocześnie wartości ORP były zróżnicowane: od silnie ujemnych (–67 mV) w torfach po dodatnie (>100 mV) w utworach mineralnych.

Wyraźne zróżnicowanie wykazały PEW i TDS w torfach 592–943 µS/cm, w utworach węglanowych 418–572 µS/cm oraz w piaskach 66 µS/cm. Najważniejszymi jonami determinującymi mineralizację wód były Ca²⁺ i HCO₃⁻, których wysokie stężenia odnotowano w próbkach wody pobranych z piezometrów ujmujących wody w torfach oraz kontaktujących się z podłożem kredowym. Różnice te były typowe dla torfowisk alkalicznych, gdzie skład chemiczny wód zależy od zasobności minerałów węglanowych na drodze przepływu wód.

W próbkach torfowych odnotowano najwyższe wartości RWO, CHZT i BZTs, dochodzące odpowiednio do 25,9 mgC/dm³, 51,5 mgO₂/dm³ oraz 24,2 mgO₂/dm³. Wody pobrane z utworów mineralnych wykazały znacznie niższe stężenia. Wody torfowe charakteryzowały się wyraźnym oddziaływaniem procesów beztlenowych, intensywną mineralizacją materii organicznej oraz dużą mobilnością Fe i Mn. Jest to zgodne z literaturą (Stumm i Morgan, 1996), dominacja warunków redukcyjnych prowadzi bowiem do zwiększonej koncentracji Fe i Mn. Stężenie tych pierwiastków było bardzo wysokie w torfach (Fe do 6,11 mg/dm³, Mn do 0,45 mg/dm³). Stężenia NO₃⁻ były wyższe w utworach mineralnych, natomiast w torfach notowano obniżone stężenia tego jonu, przy jednoczesnym wzroście NH₄⁺.

Wyniki badań są zbieżne z wcześniejszymi pomiarami wód pobranych z torfianek na tym obszarze (Sugier i Chmiel, 2007a–b) oraz z analizą Józwiak i in. (2024), którzy przeanalizowali kilkadziesiąt parametrów fizyczno-chemicznych wód na ponad 300 torfowiskach alkalicznych typu 7230. Wyniki te podkreślają fundamentalną rolę jonów Ca²⁺, Mg²⁺ i HCO₃⁻ w podtrzymywaniu charakteru hydrochemicznego torfowisk oraz wskazują na duże zróżnicowanie chemizmu, wynikające z lokalnych warunków hydrogeologicznych. Podobne wnioski przyniosły także prace Solovey i in. (2021), którzy ocenili wpływ źródeł zasilania oraz zanieczyszczeń na 41 torfowiskach północnej i środkowej Polski.

W celu ustalenia siły i kierunku zależności pomiędzy parametrami obliczono współczynniki korelacji *r*-Pearsona. Macierz korelacji ujawniła kilka wyraźnych grup parametrów, powiązanych ze sobą zarówno pod względem zachodzących procesów, jak i wykształcenia litologicznego obszaru, określonych poprzez wysokie dodatnie korelacje. Na tej podstawie wyodrębniono powiązane ze sobą grupy:

- mineralizacyjno-węglanową (PEW, TDS, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻);
- redukcyjno-organiczną (RWO, CHZT, BZTs, Fe, Mn, NH₄⁺);
- natlenienia i redoks (O₂, ORP, NO₃⁻).

W grupie mineralizacyjno-węglanowej najsilniejsze dodatnie korelacje zarejestrowano pomiędzy: Ca²⁺ a HCO₃⁻ (*r* ≈ +0,89), PEW a TDS (*r* ≈ +0,71), Ca²⁺ a TDS (*r* ≈ +0,86), Mg²⁺ a Ca²⁺ (*r* ≈ +0,86). Silne współzależności tych parametrów wskazują, że wody o wyższej mineralizacji były kształtowane przez rozpuszczanie minerałów węglanowych (głównie kalcytu, magnezytu/dolomitu). W próbkach wody pobranych z torfów zaobserwowano również podwyższone stężenia Ca²⁺ i HCO₃⁻, co potwierdza typowy dla torfowisk alkalicznych charakter hydrochemiczny Ca–HCO₃. Wskazuje to na kontakt badanych wód z utworami zasobnymi w węgiel wapnia.

Wydzielona grupa redukcyjno-organiczna również charakteryzuje się silnymi korelacjami dodatnimi, które można łączyć z procesami produkcji i rozkładu materii organicznej: RWO a CHZT (*r* ≈ +0,89), RWO a BZTs (*r* ≈ +0,85), Fe a RWO

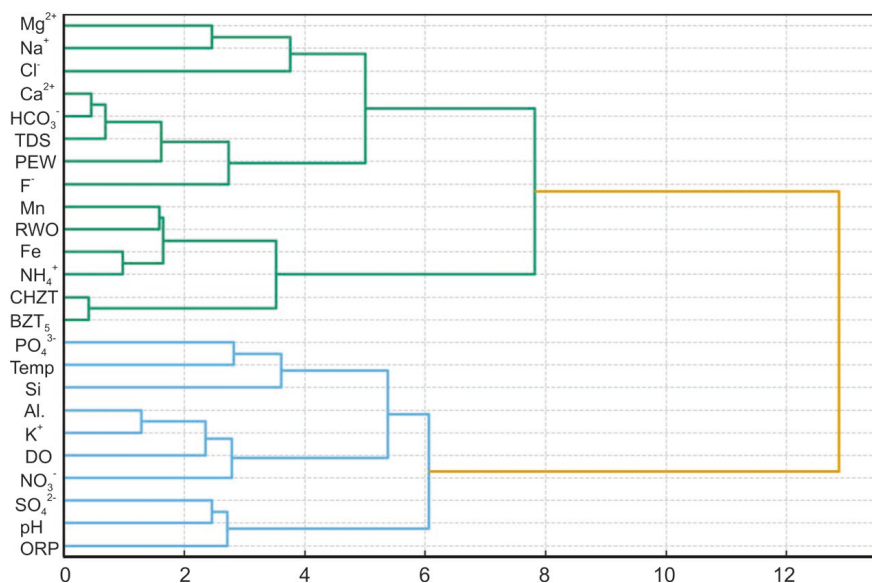
($r \approx +0,89$), Mn a Fe ($r \approx +0,89$), NH_4^+ a RWO ($r \approx +0,86$). W takich warunkach może dochodzić do wzrostu stężenia Fe i Mn oraz do redukcji azotanów do form amonowych. W tej grupie charakterystyczne były też obniżone wartości ORP oraz wysokie wartości RWO, CHZT i BZT₅.

W analizowanym zbiorze wyodrębniły się również korelacje ujemne. Warto podkreślić negatywne zależności: NO_3^- a Ca^{2+} ($r \approx -0,76$), NO_3^- a HCO_3^- ($r \approx -0,70$), O_2 a CHZT ($r \approx -0,78$). Azotany miały wyraźnie niższe stężenie w próbkach bardziej zmineralizowanych i o charakterze redukcyjnym, mogą one bowiem ulegać redukcji w warunkach niskiego ORP, co wiąże się z intensywną produkcją materii organicznej. Wskaźniki takie jak ORP, O_2 i NO_3^- mogą reprezentować przeciwstawną grupę w stosunku do parametrów redukcyjno-organicznych.

Analiza skupień (CA), wykonana metodą Warda na zestandaryzowanych danych, pozwoliła wyodrębnić trzy zasadnicze grupy wskaźników hydrochemicznych (zob. ryc. 2). W pierwszym klastrze znalazły się wskaźniki odzwierciedlające ogólny proces formowania się składu chemicznego wód (PEW, TDS, HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , F^-). Grupa ta łączy wskaźniki pochodzenia geogenicznego, związane z ługowaniem podłoża mineralnego i rozpuszczaniem węglanów, z jonami pochodzenia atmosferycznego, których stężenie w wodach podziemnych ulega stopniowej koncentracji w wyniku procesów ewapotranspiracji. Drugi klaster tworzyły wskaźniki, które można powiązać z procesami redukcyjno-organicznymi (RWO, BZT₅, CHZT, NH_4^+ , Fe, Mn), odzwierciedlającymi rozkład materii organicznej w warunkach deficytu tlenowego w utworach torfowych. Trzeci klaster obejmował wskaźniki fizyczno-chemiczne kontrolujące stan natlenienia i stabilność środowiska wodnego (Temp., pH, DO, ORP) oraz wskaźniki (SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+) odzwierciedlające zarówno procesy tlenowej mineralizacji materii organicznej, jak i antropopresję, uzupełnione o mobilne w tych warunkach pierwiastki glinokrzemianowe (Si, Al).

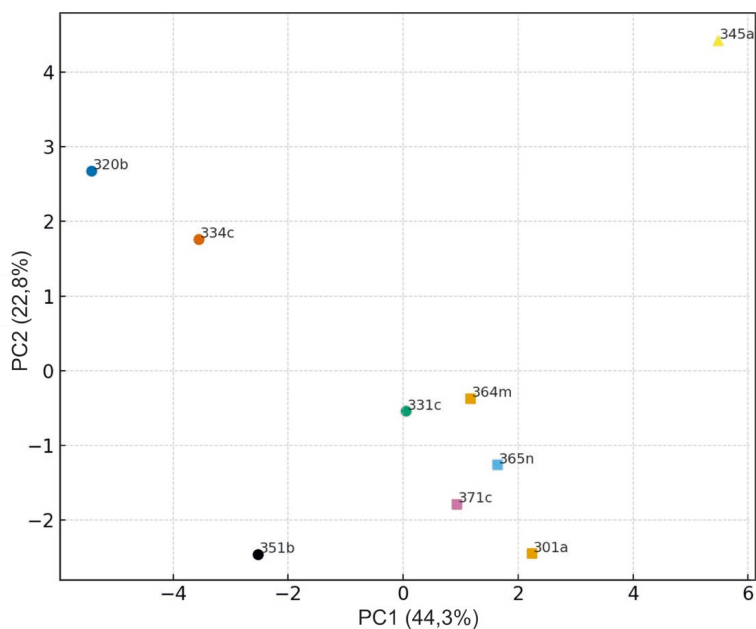
Analiza PCA została wykorzystana do redukcji liczby zmiennych oraz identyfikacji głównych osi zmienności hydrochemicznej. Dane zostały wcześniej zestandaryzowane (*Z-score*), aby zapewnić równą wagę wszystkich parametrów. Dwa pierwsze komponenty główne wyjaśniły większość zmienności w zbiorze danych i umożliwiły wyodrębnienie trzech grup próbek wód pobranych z piezometrów ujmujących wody z torfów, utworów węglanowych oraz piasku (zob. ryc. 2).

Składowa PC1 (44,3%) powiązana była głównie ze wskaźnikami kształtującymi poziom mineralizacji wody (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , TDS, PEW), natomiast PC2 (22,8%) – ze wskaźnikami redukcyjnymi (RWO, BZT₅, Fe, Mn, NH_4^+). Piezometry (320b, 334c) reprezentowały obszar silnie redukcyjnych i zmineralizowanych wód torfowych, zasobnych w węgiel organiczny. W tych wodach notowano bardzo wysokie wartości RWO, CHZT, BZT₅, Fe, Mn i NH_4^+ oraz wysoką mineralizację (PEW, TDS, Ca^{2+} , HCO_3^-). Obszar wód o podobnej mineralizacji, ale o znacznie



Ryc. 2. Dendrogram analizy skupień (CA) wskaźników hydrochemicznych wykonany metodą Warda, macierz odległości euklidesowej (badania własne)

Fig. 2. Dendrogram of cluster analysis (CA) of hydrochemical parameters performed using Ward's method, Euclidean distance matrix (Authors' own research)



Ryc. 3. Rozmieszczenie próbek w przestrzeni głównych składowych PCA (badania własne)

Fig. 3. Distribution of water samples in the space of principal components PCA (Authors' own research)

niższym obciążeniu materią organiczną, określa położenie piezometrów 364m, 365n, 331c, 371c, 351b, 301a. Wody te można traktować jako pośrednie, częściowo torfowe, a częściowo związane z utworami mineralnymi zasobnymi w węglany. Grupa ta obejmuje większość punktów i odzwierciedla „średni” typ wód w badanym układzie. Piezometr 345a charakteryzuje wody o niskiej mineralizacji z bardzo niskimi wartościami wskaźników organicznych i redukcyjnych. To typowa woda występująca w piasku, o niskiej zawartości węglanów.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz hydrochemicznych i statystycznych oraz interpretacji procesów biogeochemicznych można sformułować następujące wnioski praktyczne, istotne zarówno dla ochrony torfowisk alkalicznych w Polskim Parku Narodowym, jak i dla monitoringu oraz zarządzania zasobami wód podziemnych.

Skład chemiczny wód w badanych punktach wykazuje wyraźne zróżnicowanie wynikające z typu warstwy wodonośnej. Najbardziej charakterystyczne cechy wykazują wody torfowe, cechujące się wysoką mineralizacją węglanową, zawartością rozpuszczonego węgla organicznego oraz silnym wpływem procesów redukcyjnych. Wskaźniki organiczne (RWO, CHZT, BZT_s) oraz Fe i Mn stanowią kluczowe wskaźniki odróżniające wody torfowe od wód pobranych z utworów mineralnych. Ich wysokie wartości mogą świadczyć o aktywnym rozkładzie materii organicznej oraz niskim natlenieniu.

Wskaźniki związane z poziomem mineralizacji wody (Ca^{2+} , HCO_3^- , TDS, PEW) charakteryzują zarówno torfy, jak i część warstw mineralnych, ale ich najwyższe wartości notowano w strefach kontaktu utworów torfowych z podłożem węglanowym. Z kolei wody podziemne bez kontaktu z utworami węglanowymi (w obrębie piasków) cechowały się niskimi wartościami tych wskaźników.

Ze względu na wyraźne odmienne charakterystyki chemiczne wód występujących w torfach oraz utworach mineralnych wskazane jest stosowanie zróżnicowanego podejścia w ich monitoringu. Wody torfowe wymagają częstszego i bardziej ukierunkowanego monitoringu parametrów redukcyjnych (RWO, O_2 , ORP, CHZT, BZT_s, Fe, Mn, NH_4^+ , PO_4^{3-}). Wody w utworach mineralnych powinny być obserwowane głównie pod kątem zmian mineralizacji (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , PEW) oraz wskaźników antropopresji (NO_3^- , PO_4^{3-}). W celu optymalizacji działań ochronnych postuluje się uzupełnienie istniejącej sieci monitoringu wód podziemnych obiektów Bagno Staw i Bagno Bubnów o nowe piezometry zlokalizowane w ich centralnych, najbardziej reprezentatywnych częściach.

BIBLIOGRAFIA

- Chmielewski, T.J. (red.). (1989). *Poleski Park Narodowy – dokumentacja naukowa*. Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Towarzystwo Wolnej Wszechnicy Polskiej.
- Chmielewski, T.J., Szymański, J., Weigle, A. (red.). (2020). *Poleski Park Narodowy. Dziedzictwo i przyszłość*. Wydawnictwo UMCS.
- Dobrowolski, R., Bałaga, K., Buczek, A., Alexandrowicz, W.P., Mazurek, M., Hałas, S., Piotrowska, N. (2016). Multi-Proxy Evidence of Holocene Climate Variability in Volhynia Upland (SE Poland) Recorded in Spring-Fed fen Deposits from the Komarów Site. *The Holocene*, 26(9), 1406–1425. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683616640038>
- Elzinga, C.L., Salzer, D.W., Willoughby, J.W., Gibbs, J.P. (2001). *Monitoring Plant and Animal Populations: A Handbook for Field Biologists*. Blackwell Science.
- European Commission (2013). *Interpretation Manual of European Union Habitats (EUR28)*.
- European Environment Agency (2018). *EUNIS Habitat Factsheet: Alkaline Fens (7230)*.
- Harasimiuk, M., Michalczyk, Z., Turczyński, M. (red.). (1998). *Jeziora łęczyńsko-włodawskie. Monografia przyrodnicza*. Wydawnictwo UMCS.
- Hájek, M., Horsák, M., Hájková, P., Dítě, D. (2006). Habitat Diversity of Central European Fens in Relation to Environmental Gradients and an Effort to Standardise Fen Terminology in Ecological Studies: Perspectives in Plant Ecology. *Evolution and Systematics*, 8(2), 97–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2006.08.002>
- Herbichowa, M., Wołejko, L. (2004). Górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk. W: J. Herbich (red.), *Wody słodkie i torfowiska. Poradniki ochrony siedlisk i gatunków Natura 2000* (s. 178–195). Ministerstwo Środowiska.
- Jiménez-Alfaro, B., Hájek, M., Ejrnæs, R., Rodwell, J.S., Pawlikowski, P., Weeda, E.J., Laitinen, J., Moen, A., Bergamini, A., Aunina, L., Sekulová, L., Tahvanainen, T., Gillet, F., Jandt, U., Dítě, D., Hájková, P., Corriol, G., Kondelin, H., Díaz, T.E. (2014). Biogeographic Patterns of Base-Rich Fen Vegetation across Europe. *Applied Vegetation Science*, 17(2), 367–380. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/avsc.12065>
- Joosten, H., Tanneberger, F., Moen, A. (Eds.). (2017). *Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Józwiak, K., Solovey, T., Filar, S., Węglarz, D., Mordzonek, G., Przytuła, E., Brodecki, A. (2024). Zmienność parametrów fizykochemicznych wód torfowisk alkalicznych typu 7230. *Przegląd Geologiczny*, 72(2), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.7306/2024.42>
- Kaszewski, B.M. (2008). Wody. W: *Środowisko przyrodnicze Lubelszczyzny* (s. 79–110). Lubelskie Towarzystwo Naukowe.
- Kaszewski, M., Siwek, K., Gluza, A. (2020). Warunki klimatyczne. W: T.J. Chmielewski, J. Szymański, A. Weigle (red.), *Poleski Park Narodowy. Dziedzictwo i przyszłość* (s. 101–117). Wydawnictwo UMCS.
- Lamers, L.P.M., Vile, M.A., Grootjans, A.P., Acreman, M.C., Diggelen, R. van, Evans, M.G., Richardson, C.J., Rochefort, L., Kooijman, A.M., Roelofs, J.G.M., Smolders, A.J.P. (2015). Ecological Restoration of Rich Fens in Europe and North America: From Trial and Error to an Evidence-Based Approach. *Biological Reviews*, 90(1), 182–203. DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.12102>
- Mazhaisky, Y., Rokochynskiy, A., Volchek, A., Meshyk, O., Jeznach, J., Urban, D., Dobrowolski, R. (Eds.). (2024). *Environmental Engineering in Polesye*. Vol. 3: *Polish Polesye*. Warsaw University of Life Sciences Press.
- Michalczyk, Z., Mięsiak-Wójcik, K., Sposób, J., Chmiel, S., Głowacki, S., Turczyński, M. (2020). Wody. W: T.J. Chmielewski, J. Szymański, A. Weigle (red.), *Poleski Park Narodowy. Dziedzictwo i przyszłość* (s. 119–142). Wydawnictwo UMCS.

- Michalczyk, Z., Chmiel, S., Głowacki, S., Mięsiak-Wójcik, K.T., Raczynski, K., Sposób, J., Turczyński, M. (2024). Water Characteristic. W: Y. Mazhaisky, A. Rokochynskiy, A. Volchek, O. Meshyk, J. Jeznach, D. Urban, R. Dobrowolski (Eds.), *Environmental Engineering in Polesye*. Vol. 3: *Polish Polesye* (s. 141–190). Warsaw University of Life Sciences Press.
- Paczyński, B. (red.). (1995). *Atlas hydrogeologiczny Polski w skali 1:500 000*. PIG.
- Pawlikowski, P., Kozub, Ł. (2019). Czynniki chemiczno-fizyczne decydujące o zróżnicowaniu roślinności torfowisk alkalicznych. W: L. Wołejko, P. Pawlaczyk, R. Stańko (red.), *Torfowiska alkaliczne w Polsce – zróżnicowanie, zasoby, ochrona* (s. 41–48). Wydawnictwo Klubu Przyrodników.
- Pietruczuk, J. (2020). *Zapis późnoglacialnych i holocenijskich zmian środowiskowych w osadach torfowisk alkalicznych Bagno Bubnów i Bagno Staw (Poleski Park Narodowy)*. Wydawnictwo UMCS.
- Solovey, T., Wojewódka-Przybył, M., Janica, R. (2021). Hydrochemical Indicators of Water Source and Contamination in Fen Peatlands of Varying Hydrogeomorphic Settings in Northern and Central Poland. *Ecological Indicators*, 129, artykuł 107944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107944>
- Stańko, R., Wołejko, L., Pawlaczyk, P. (red.). (2018). *Podręcznik dobrych praktyk w ochronie torfowisk alkalicznych*. Wydawnictwo Klubu Przyrodników.
- Stumm, W., Morgan, J.J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. Wiley.
- Sugier, P., Chmiel, S. (2007a). Heavy Metals in Peat Pit Waters of the Polesie National Park. *Teka Komisji Ochrony i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego*, 4, 243–249.
- Sugier, P., Chmiel, S. (2007b). Selected Physico-Chemical Water Parameters of Peat Pits in the Polesie National Park (South-Eastern Poland). *Teka Komisji Ochrony i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego*, 4, 249–254.
- Šefferová Stanová, V., Šeffer, J., Janák, M. (2008). *Management of Natura 2000 Habitats: 7230 Alkaline Fens*. European Commission.
- Turczyński, M., Michalczyk, Z., Chmiel, S., Mięsiak-Wójcik, K., Głowacki, S. (2009). Evaluation of the Hydrological Role of Wetlands in the Włodawka River Catchment (Polesie Lubelskie). *Journal of Water and Land Development*, 13B, 109–123. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10025-010-0008-7>
- Wilgat, T., Fijałkowski, D. (1975). Projekt ochrony krajobrazu w przyszłym Lubelskim Zagłębiu Węglowym. *Ochrona Przyrody*, 40, 11–44.
- Wilgat, T., Michalczyk, Z., Turczyński, M., Wojciechowski, K. (1991). *Jeziora łączynsko-włodawskie*. PAN o. w Krakowie.
- Wilgat, T. (red.). (1963). *Polesie Lubelskie*. Wydawnictwo Lubelskie.
- Wołejko, L., Pawlaczyk, P., Stańko, R. (red.). (2019). *Torfowiska alkaliczne w Polsce. Zróżnicowanie, zasoby, ochrona*. Wydawnictwo Klubu Przyrodników.

PUBLICATION INFO		
SUBMITTED: 2025.12.12	ACCEPTED: 2026.08.31	PUBLISHED ONLINE: 2026.09.29