



Ocena stanu chemicznego i zagrożeń wód podziemnych oraz powierzchniowych w rejonie Zalewu Wiślanego

Małgorzata Pruszkowska-Caceres¹, Kacper Aleksandrowicz¹, Patrick Barwinski¹,
Jakub Bożejewicz¹, Szymon Grabowski¹, Jakub Kopanicki¹

Assessment of the chemical state and threats to surface water and groundwater in the Vistula Lagoon region. *Prz. Geol.*, 72: 262–269; doi: 10.7306/2024.12

Abstract. The purpose of the research was to examine how factors such as land use and land management affect the quality of groundwater and surface water. These studies were possible thanks to funding from the IDUB Technetium Talent Management Grants project titled “Assessment of Anthropogenic Threat to Groundwater and Surface Water in the Region of the Vistula Lagoon”. The research area included a section of the Vistula Spit, Żuławy Wielkie and the coastal waters of the Vistula Lagoon. Field studies were conducted during three field trips; 15 groundwater points and 35 surface water points were examined. During these studies parameters such as temperature, pH, electrical conductivity, and the content of nitrogen, nitrates, phosphates, and sulfates were measured. In the Żuławy area it was found that surface water and groundwater are under the direct influence of the Vistula Lagoon, causing their salinity increase. Locally, man-induced chemical changes are also visible. The inflow of nutrients from fertilization of agricultural fields and uncontrolled discharge of wastes into drainage canals have been observed. The local anthropogenic impact on the water environment was also found in the Vistula Spit area. It was caused by pollutions from tourist facilities.

Keywords: groundwater contamination, surface water pollution, nutrients compounds, Vistula Lagoon

Zanieczyszczenie wód powierzchniowych i podziemnych, szczególnie w pobliżu płytkich akwenów morskich mogących ulegać procesowi eutrofizacji, stanowi jedno z ważniejszych wyzwań współczesnej hydrogeologii strefy brzegowej o globalnym charakterze. Zagospodarowanie i użytkowanie terenu odgrywa tu kluczową rolę.

Przykładem terenów intensywnie wykorzystywanych rolniczo i turystycznie są obszary położone wokół Zalewu Wiślanego, który ze względu na słabe warunki wymiany wód jest wrażliwy na dopływ zanieczyszczeń, w tym substancji biogennej, z otaczających obszarów lądowych. Przeprowadzone dotąd badania wykazują, iż problem eutrofizacji wód Zalewu Wiślanego jest postępujący (Graniczny i in., 1998; Kruk, 2016; Bolałek, 2018; Witak, Pędzieński, 2018). W badaniach przeprowadzonych w 2023 r. autorzy skupili się na ocenie wpływu zagospodarowania terenu na skład chemiczny wód podziemnych i powierzchniowych w reprezentatywnym rejonie wokół Zalewu Wiślanego. Szczególną uwagę zwrócono na parametry charakteryzujące warunki biogenne.

Uwzględnione w badaniach elementy mają ważne znaczenie w świetle obowiązujących przepisów Unii Europejskiej i Konwencji Helsińskiej (HELCOM, 2009, 2018) dotyczących ochrony wód, także w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego.

Celem badań, których wyniki są prezentowane w niniejszym artykule, była ocena wpływu gospodarstw rolnych i innych źródeł zanieczyszczenia oraz struktury użytkowania terenu na jakość wód powierzchniowych i podziemnych, a w konsekwencji na stan chemiczny ekosystemu drenowanego przez Zalew Wiślany. Badania były finansowane z projektu IDUB *Technetium Talent Management*

Grants pt. *Ocena zagrożenia antropogenicznego wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie Zalewu Wiślanego* o numerze 7/1/2022/IDUB/III.4c/Tc.

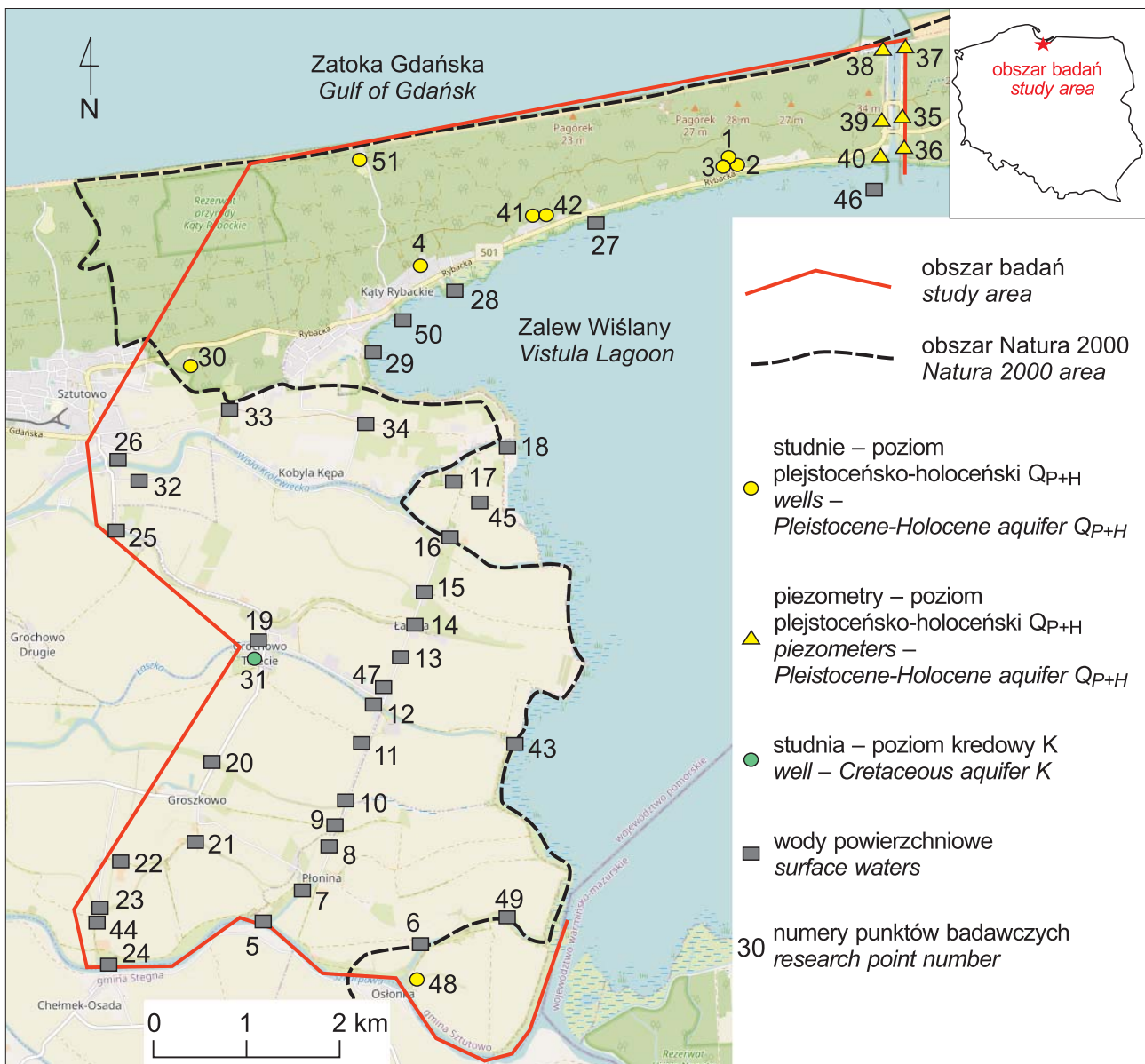
CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Badaniami objęto teren położony w województwie pomorskim w gminie Sztutowo obejmujący fragment Mierzei Wiślanej (od Sztutowa po Skowronki), Żuław Wielkich (pomiędzy rzekami Wiśla Królewiecka i Szkarpa) oraz przybrzeżne wody Zalewu Wiślanego (ryc. 1).

Powierzchnię Mierzei Wiślanej pokrywają porośnięte lasami sosnowymi pasy wydym o wysokości 15–20 m n.p.m., między którymi leżą obniżenia deflacyjne. Od strony morza znajduje się piaszczysta plaża, a brzeg od strony zalewu porastają trzciny zarastające dno i formujące równiny torfowe (Prussak, 1998a). Niewielkie miejscowości jak: Sztutowo, Kąty Rybackie czy Skowronki, mają charakter turystyczny. Teren leży w granicach Parku Krajobrazowego *Mierzeja Wiślana* oraz w obszarze Natura 2000 (PLH 280007) Zalew Wiślany i Mierzeja Wiślana (ryc. 1). Nie planuje się tu nowych terenów inwestycyjnych, a istniejące zagospodarowanie jest dostosowywane do pełnienia funkcji turystycznych i ochrony walorów przyrodniczych i kulturowych.

Środowisko przyrodnicze Żuław zostało przekształcone przez człowieka poprzez osuszanie gęstą siecią kanałów i rowów melioracyjnych wchodzących w skład systemu polderowego. Występujące tu żyzne gleby sprzyjają rolniczemu wykorzystaniu terenu (pola uprawne i fermy hodowlane). Obszar stanowi rozległą, płaską równinę, której powierzchnia wznosi się do ok. 5 m n.p.m. Lokalnie, po

¹ Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; mpru@pg.edu.pl, kubabozejewicz@wp.pl, kacperaleksandrowicz2002@gmail.com, szymongrabowski21@gmail.com, Patrick.barwinski2002@wp.pl, kubakopanicki@gmail.com; ORCID ID M. Pruszkowska-Caceres 0000-0003-1954-2558



Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań
Fig. 1. Location of the research area

północnej stronie rzeki Szkarpa teren obniża się do $-0,5$ m n.p.m., tworząc depresję.

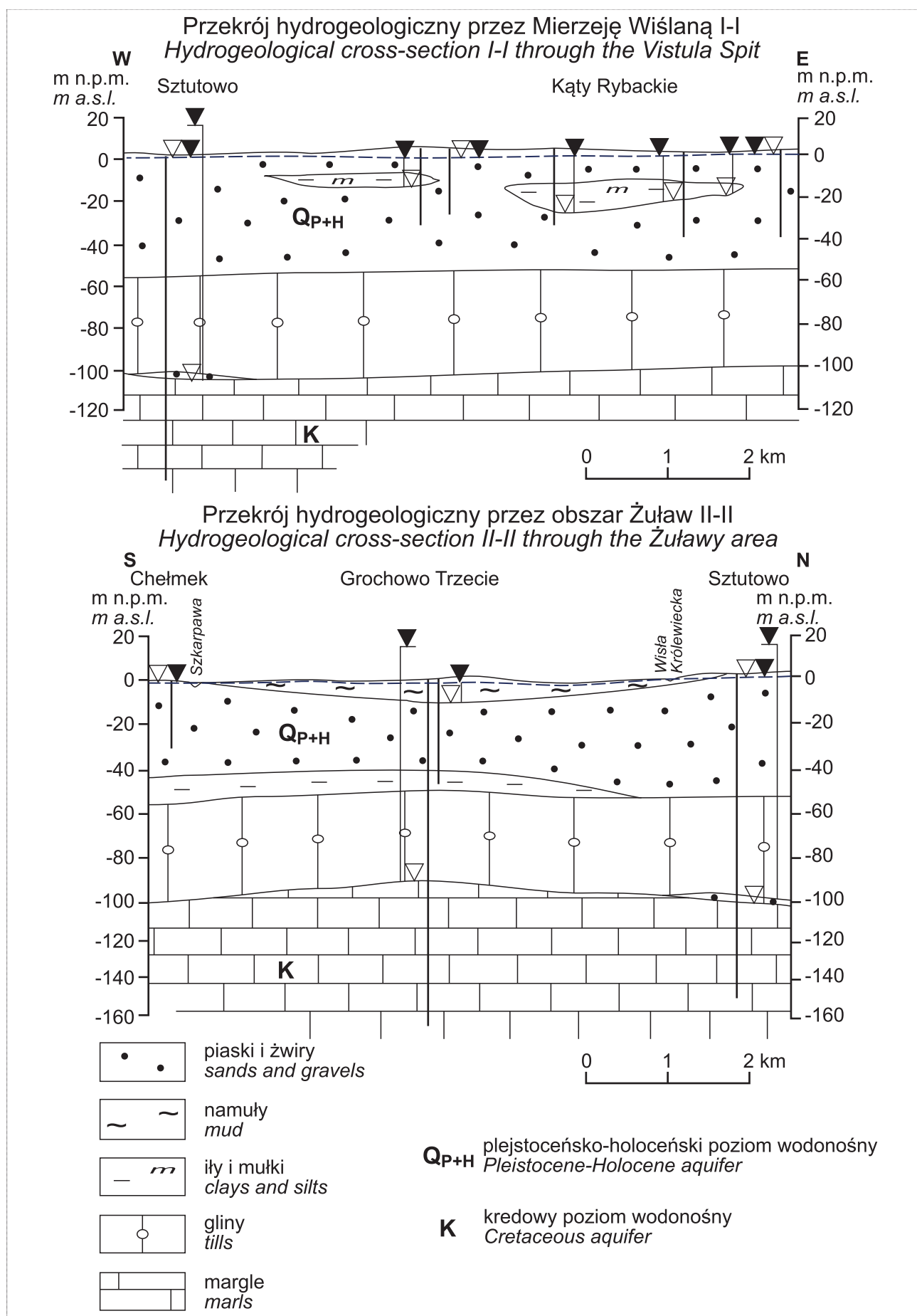
Od grudnia 2005 r. cały obszar objęty badaniami został skanalizowany i zwodociagowany, i jest zaopatrywany w wodę z Centralnego Wodociągu Żuławskiego. W tym też czasie wyłączono lub zlikwidowano znaczną część istniejących otworów studziennych.

W rejonie objętym badaniami warunki hydrogeologiczne są bardzo zróżnicowane, a wody podziemne występują w dwóch poziomach wodonośnych: plejstoceńsko-holocenijskim (Q_{P+H}) i górnokredowym (K) (ryc. 2; Kozerski, Kwartekiewicz, 1984; Lidzbarski i in., 2007).

Poziom plejstoceńsko-holocenijski (Q_{P+H}) rozprzestrzenia się na całym analizowanym terenie. Na Mierzei Wiślanej występuje w postaci soczewki wód słodkich zawieszonych na wodach słonych Morza Bałtyckiego od strony północnej i Zalewu Wiślanego od strony południowej. Zasilanie odbywa się poprzez infiltrację i akumulację wód opadowych w osadach mierzejowych, stąd w okresach wzmożonych opadów atmosferycznych zwierciadło wody słodkiej podnosi się i zwiększa się objętość soczewki, nato-

miast w okresach suchych lub przy nadmiernym poborze wód ich zwierciadło obniża się, a cięższe wody słone wypierają wodę słodką. Osadami wodonośnymi są piaski drobno- i średnioziarniste, których współczynnik filtracji waha się od 0,1 do 1,0 m/h (Prussak, 1998a). Głębokość występowania swobodnego lub lekko napiętego zwierciadła wód podziemnych wynosi od 1 do 10 m na wydmach, a miąższość warstwy (soczewki) wodonośnej to 30–50 m (ryc. 2). Ze względu na brak izolacji od powierzchni terenu wody podziemne wykazują dużą wrażliwość na antropopresję.

Na obszarze Żuław poziomy Q_{P+H} jest związany z piaskami wodnolodowcowymi, piaskami i żwirami aluwialnymi oraz piaskami serii deltowej przykrytymi słabo przepuszczalnymi torfami i namułami. Miąższość utworów wodonośnych wynosi ok. 30–40 m, a współczynnik filtracji waha się w granicach 0,3–7 m/h (Prussak, 1998b). Zwierciadło wody ma charakter swobodny lub lekko napięty, występuje płytko od 1 do 1,5 m pod powierzchnią terenu, miejscami tworząc zabagnienia, i ma bezpośredni kontakt z wodami powierzchniowymi i kanałami melioracyj-



Ryc. 2. Przekrój hydrogeologiczny przez teren Mierzei Wiślanej i obszar Żuław (opracowanie własne)
 Fig. 2. Hydrogeological cross-section through the Vistula Spit and Żuławy area (own elaboration)

nych (ryc. 2). Izolacja wód podziemnych od powierzchni terenu nie jest pełna, stąd wrażliwość na wpływy antropogeniczne tego poziomu wodonośnego jest określana jako średnia.

Kredowy poziom wodonośny (K) jest związany z serią węglanowo-krzemionkową oraz serią piaszczystą gdańskiego górnokredowego zbiornika artezyjskiego subniecki gdańskiej. Miąższość utworów wodonośnych wynosi 5–100 m, a współczynnik filtracji waha się od 0,1 do 1,0 m/h (Prussak, 1998a, b). Zwierciadło wody występuje na głębokości 90–160 m p.p.t., ma charakter artezyjski i stabilizuje na 5–20 m n.p.m. (ryc. 2; Lidzbarski i in., 2007).

METODYKA BADAŃ

W ramach realizowanego projektu *Technetium* wykonano badania terenowe podczas trzech kampanii w okresie od maja do września 2023 r. Próbkę wód podziemnych pobrano z 16 punktów (studnie kopane, piezometry, studnie wiercone indywidualne i komunalne), a wód powierzchniowych z 35 punktów. Lokalizację punktów badawczych przedstawiono na rycinie 1. W ramach prac terenowych oznaczano temperaturę, pH i przewodność elektryczną właściwą PEW (122 analizy) przy użyciu miernika CPC-105 firmy Elmetron. Ponadto określono stężenia form azotu (NH_4^+ i NO_3^-), fosforanów i siarczanów (po 50 analiz każdego z jonów) za pomocą fotometru WTW pHotoFlex STD.

Dane zebrane w ramach projektu zostały uzupełnione o wyniki z wcześniejszych prac prowadzonych od lat 50. XX w., łącznie z 22 punktów badawczych. Wykorzystano analizy fizykochemiczne zawarte w objaśnieniach do *Map hydrogeologicznych Polski w skali 1 : 50 000* ark. Kąty

Rybackie i Nowy Dwór Gdański (Prussak, 1998a, b), dane z monitoringu Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego oraz wyniki analiz, dokumentacje hydrogeologiczne i operaty wodnoprawne udostępnione przez Urząd Gminy Sztutowo.

WYNIKI BADAŃ

Na potrzeby niniejszego artykułu omówiono wybrane wyniki przeprowadzonych badań, które zestawiono w poniższych tabelach. Zakresy stężeń parametrów hydrogeochemicznych wód podziemnych poziomu Q_{p+H} wraz z oceną stanu chemicznego wód zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Rozporządzenie, 2019) zestawiono w tabelach 1 i 2. Analizą nie objęto kredowego poziomu wodonośnego. W tabeli 3 przedstawiono stan chemiczny wód powierzchniowych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Rozporządzenie, 2021) wraz z zakresami stężeń oznaczonych parametrów chemicznych wód.

Na Mierzei Wiślanej przebadano tylko wody podziemne, gdyż obszar ten charakteryzuje się brakiem sieci rzecznej. Przewodnictwo elektrolityczne PEW stwierdzono w zakresie 218–1414 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (I – II klasa jakości zgodnie z Rozporządzeniem, 2019). Stężenia jonu amonowego wahają się w granicach $<0,26$ – $1,76$ $\text{mgNH}_4/\text{dm}^3$, co odpowiada I–III klasie jakości wód, a poziom azotanów jest niski i wynosi 0,3–30 $\text{mgNO}_3/\text{dm}^3$ (klasy jakości I–III).

Tab. 1. Parametry hydrogeochemiczne wód podziemnych poziomu Q_{p+H} na Mierzei Wiślanej
Table 1. Hydrogeochemical parameters in the groundwater Q_{p+H} aquifer on the Vistula Spit

Parametr Parameter	Okres 1958–1999 In 1958–1999	Okres 2000–2022 In 2000–2022	Badania własne 2023 Own research 2023
Mineralizacja [mg/dm^3] TDS [mg/dm^3]	194–448 (I)	197–458 (I)	* 218–1414 (I–II)
Cl^- [mg/dm^3]	6,8–28,2 (I)	5,9–31,5 (I)	15,1–15,3 (I)
SO_4^{2-} [mg/dm^3]	5,8–32,5 (I)	7,1–38,1 (I)	7,5–101 (I–II)
NO_3^- [mg/dm^3]	–	0,42 (I)	0,3–30 (I–III)
NH_4^+ [mg/dm^3]	–	0,36 (II)	$<0,26$ – $1,76$ (II–III)
PO_4^{3-} [mg/dm^3]	1,43 (IV)	0,02–2,12 (I–IV)	0,03–3,12 (I–IV)

* Mineralizacja wody wyrażona jako przewodnictwo elektrolityczne właściwe PEW [$\mu\text{S}/\text{cm}$] / TDS expressed as groundwater quality classes [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (I–V) klasy jakości wód podziemnych (Rozporządzenie, 2019) / (I–V) groundwater quality classes (Rozporządzenie, 2019)

Tab. 2. Parametry hydrogeochemiczne wód podziemnych poziomu Q_{p+H} na obszarze Żuław
Table 2. Hydrogeochemical parameters in the groundwater Q_{p+H} aquifer in the Żuław area

Parametr Parameter	Okres 1958–1999 In years 1958–1999	Okres 2000–2022 In years 2000–2022	Badania własne 2023 Own research 2023
Mineralizacja [mg/dm^3] TDS [mg/dm^3]	520–1690 (I–II)	249 (I)	* 1545 (II)
Cl^- [mg/dm^3]	25,7–2510 (I–V)	9,28 (I)	–
SO_4^{2-} [mg/dm^3]	29,2–72,6 (I–II)	23 (I)	<25 (I)
NO_3^- [mg/dm^3]	–	0,09 (I)	<1 (I)
NH_4^+ [mg/dm^3]	–	0,6 (II)	$>10,5$ (V)
PO_4^{3-} [mg/dm^3]	–	–	>5 (V)

* Mineralizacja wody wyrażona jako przewodnictwo elektrolityczne właściwe PEW [$\mu\text{S}/\text{cm}$] / TDS expressed groundwater quality classes [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (I–V) klasy jakości wód podziemnych zgodnie z Rozporządzeniem, 2019 / (I–V) groundwater quality classes in acc. Rozporządzenie, 2019

Tab. 3. Parametry hydrogeochemiczne wód powierzchniowych
Table 3. Hydrogeochemical parameters in the surface waters

Parametr Parameter	Badania własne 2023 r. Own research 2023	
	rzeki, kanały, rowy rivers, canals, ditches	Zalew Wiślany Vistula Lagoon
PEW [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	218–5920 (I–V)	2960–6780 (III–V)
Cl^- [mg/dm^3]	–	–
SO_4^{2-} [mg/dm^3]	25–237 (I–V)	151–>250 (III–V)
NO_3^- [mg/dm^3]	<1 (III–V)	<1–120 (III–V)
NH_4^+ [mg/dm^3]	<0,26–8,68 (I–V)	<0,26 (III–V)
PO_4^{3-} [mg/dm^3]	0,06–1,68 (I–V)	0,09–3,24 (III–V)

(I–V) klasy jakości wód powierzchniowych (Rozporządzenie, 2021) / (I–V) surface water quality classes (Rozporządzenie, 2021)

Siarczany wahają się od 7,5 do 101 $\text{mgSO}_4/\text{dm}^3$, co odpowiada I i II klasie jakości wód, chlorki nie przekraczają 15,3 mgCl/dm^3 (I klasa jakości), natomiast fosforany osiągają stężenia do 3,12 $\text{mgPO}_4/\text{dm}^3$ (IV klasa) (tab. 1).

Wody podziemne obszaru żuławskiego niestety nie zostały dokładnie rozpoznane ze względu na brak czynnych punktów badawczych. W jedynej studni kopanej (punkt 48 na rycinie 1) zaznacza się wysokie przewodnictwo elektrolityczne PEW dochodzące do 1545 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Azotany i siarczany są w I klasie jakości wód, czyli osiągają stężenia do 1 $\text{mgNO}_3/\text{dm}^3$ i do 25 $\text{mgSO}_4/\text{dm}^3$ (tab. 2; Rozporządzenie, 2019). Wysokie są natomiast zawartości fosforanów >5 $\text{mgPO}_4/\text{dm}^3$ oraz jonów amonowych >10,5 $\text{mgNH}_4/\text{dm}^3$, klasyfikujące wody do V klasy jakości (Rozporządzenie, 2019; tab. 2).

W przybrzeżnych wodach Zalewu Wiślanego wyniki PEW kształtowały się w zakresie 2960–6780 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Fosforany występowały w ilości 0,09–3,24 $\text{mgPO}_4/\text{dm}^3$, jony amonowe – poniżej 0,26 $\text{mgNH}_4/\text{dm}^3$, lecz ze względu na zakres oznaczalności odczynnika nie było możliwe dokładne oznaczenie ich stężenia. Azotany stwierdzono w ilościach 1–120 $\text{mgNO}_3/\text{dm}^3$, a siarczany od 151 do >250 $\text{mgSO}_4/\text{dm}^3$ (tab. 3). Wszystkie analizowane parametry znajdują się powyżej II klasy jakościowej, czyli w zakresie, gdzie zgodnie z Rozporządzeniem (2021) klas się nie ustala.

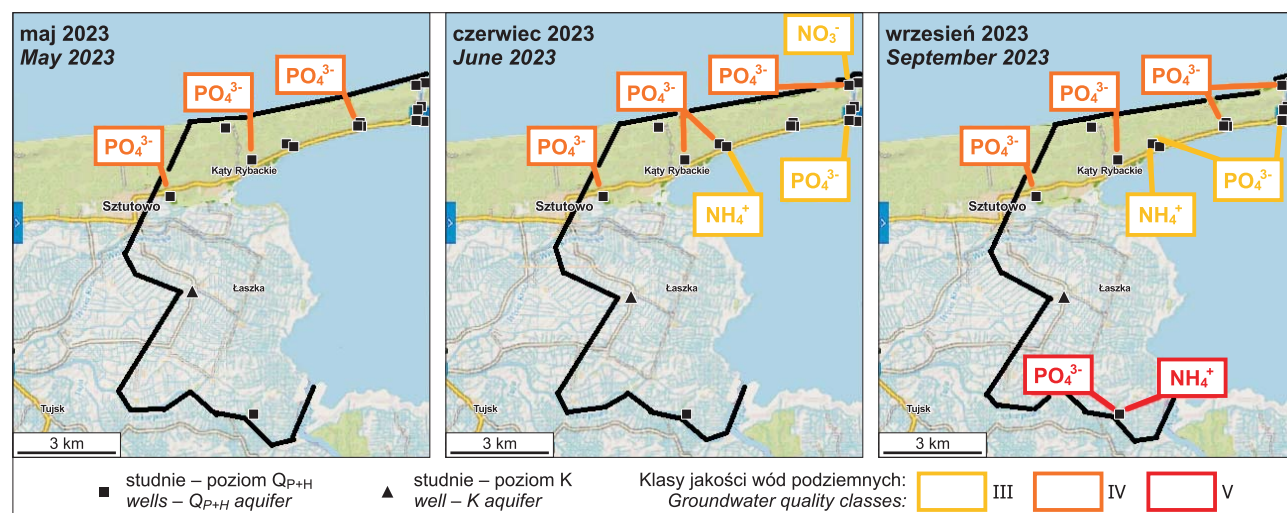
W wodach rzek, kanałów i rowów melioracyjnych przewodnictwo elektrolityczne PEW wynosiło 218–5920 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Stwierdzono obecność podwyższonych i wysokich stężeń fosforanów od 0,06 do 1,68 $\text{mgPO}_4/\text{dm}^3$ i azotu amonowego w zakresie <0,26–8,68 $\text{mgNH}_4/\text{dm}^3$. Ilość siarczanów wahała się w granicach 25–237 $\text{mgSO}_4/\text{dm}^3$, zaś azotany występowały w niewielkich ilościach <1 $\text{mgNO}_3/\text{dm}^3$ (tab. 3). W większości analizowanych punktów stężenia parametrów znajdują się powyżej II klasy jakościowej, gdzie klas się nie ustala (Rozporządzenie, 2021).

DYSKUSJA WYNIKÓW

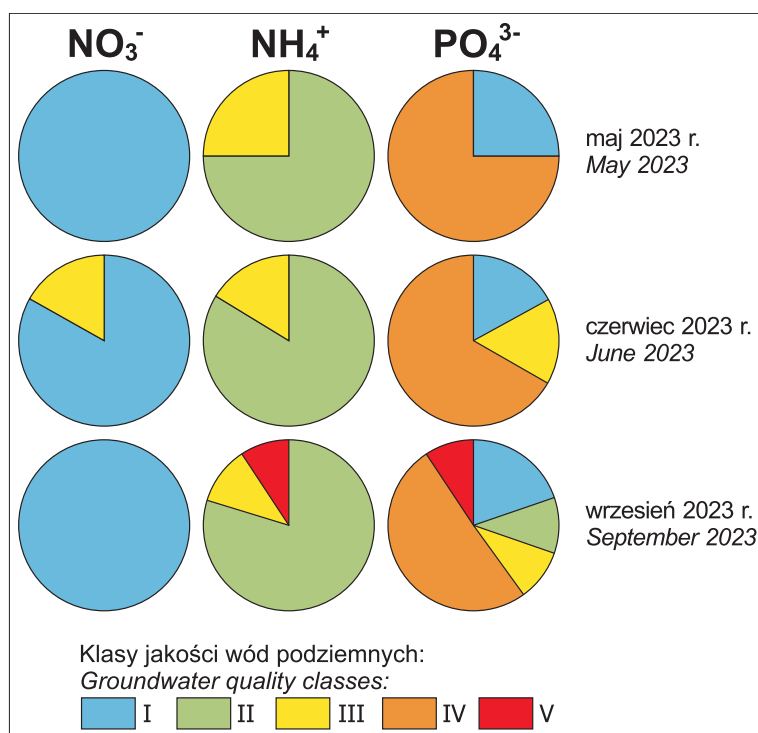
Wody powierzchniowe i podziemne występujące na Mierzei Wiślanej i na obszarze Żuław wykazują wyraźne zróżnicowanie.

Analizując wyniki badań, widać, iż na Mierzei Wiślanej zaznacza się przestrzenna, czyli mozaikowa zmienność składu chemicznego wód podziemnych. Większość badanych parametrów odpowiada I i II oraz miejscami III klasie jakości, czyli zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych są to wody bardzo dobrej, dobrej i zadowalającej jakości charakteryzujące się dobrym stanem chemicznym (tab. 1). Podwyższone i wysokie stężenia jonów, czyli przekraczające II klasę jakości, występują punktowo. Ich rozkład przestrzenny przedstawiono na rycinie 3 z uwzględnieniem analiz wykonanych



Ryc. 3. Rozkład przestrzenny podwyższonych i wysokich stężeń analizowanych parametrów hydrogeochemicznych wodach podziemnych Q_{P+H} , badania własne 2023 r.

Fig. 3. Spatial distribution of increased concentrations of analysed hydrogeochemical parameters in the Q_{P+H} aquifer, own research of 2023



Ryc. 4. Wykresy klas jakości wód podziemnych dla azotanów, jonów amonowych i fosforanów w wodach podziemnych w maju, czerwcu i wrześniu 2023 r.
Fig. 4. Charts of nitrate, ammonia and phosphate quality classes in groundwater in May, June and September 2023

podczas poszczególnych kampanii terenowych: maj 2023 r. – punkty 2, 4 i 30, czerwiec 2023 r. – punkty 38, 40, 41, 42, 4 i 30 oraz wrzesień 2023 r. – punkty 38, 40, 2, 41, 42, 4, 30 i 48 (ryc. 1, 3). Najczęściej były to współwystępujące ze sobą: jon amonowy ($>1 \text{ mgNH}_4/\text{dm}^3$), azotany ($>25 \text{ mgNO}_3/\text{dm}^3$) i fosforany ($>0,50 \text{ mgPO}_4/\text{dm}^3$).

Wyniki badań wskazują ponadto na czasową zmienność składu chemicznego. Na Mierzei Wiślanej analizując zróżnicowanie składu chemicznego w czasie, można zauważyć postępujący, znaczący wzrost stężeń badanych parametrów od najniższych w analizach wykonanych do 1999 r. do najwyższych oznaczonych w 2023 r. (tab. 1). Na Żuławach czynna była tylko jedna studnia w Dublewie (punkt 48), w której także archiwalna analiza wykazała stężenia niższe niż w 2023 r. (tab. 2). Jednak przy zbyt małej ilości danych nie jest możliwa dokładniejsza ocena czasowej zmienności składu chemicznego wód podziemnych.

Na uwagę zasługuje fakt, iż największe zróżnicowanie i najwyższe stężenia parametrów analizowanych w 2023 r. występowały pod koniec września, czyli po okresie letnim (ryc. 3). Zależność tę widać także na diagramach kołowych udziału procentowego występowania poszczególnych klas jakości (ryc. 4).

Mozaikowa i czasowa zmienność składu chemicznego wód podziemnych na Mierzei Wiślanej oraz obecność składników biogennych (jon amonowy, azotany i fosforany) wskazuje na punktowe źródła antropogenicznego zanieczyszczenia wód o charakterze bytowym. Obszar ten nie jest wykorzystywany rolniczo, natomiast realnym zagrożeniem jest 5-krotny wzrost zaludnienia w okresie letnim, do ok. 20 tys. turystów (Raport, 2022). Ludność skupia się nie tylko w dużych hotelach, pensjonatach i ośrodkach wypoczynkowych, które są podłączone do sieci kanalizacyjnej, ale także w licznych domkach letniskowych i na campingach, a nieczystości z nieszczelnych szamb i po-

wierzchni terenu trafiają do gruntu i płytkiej warstwy wodonośnej. Oprócz czasowego wzrostu zaludnienia, dodatkowych zagrożeniem sprzyjającym antropogenicznemu zanieczyszczeniu wód jest brak izolacji warstwy wodonośnej. Płytko położone poziomy wodonośne, przy możliwym dopływie zanieczyszczeń z powierzchni terenu, są bowiem szczególnie narażone na długotrwałe zmiany jakości wód.

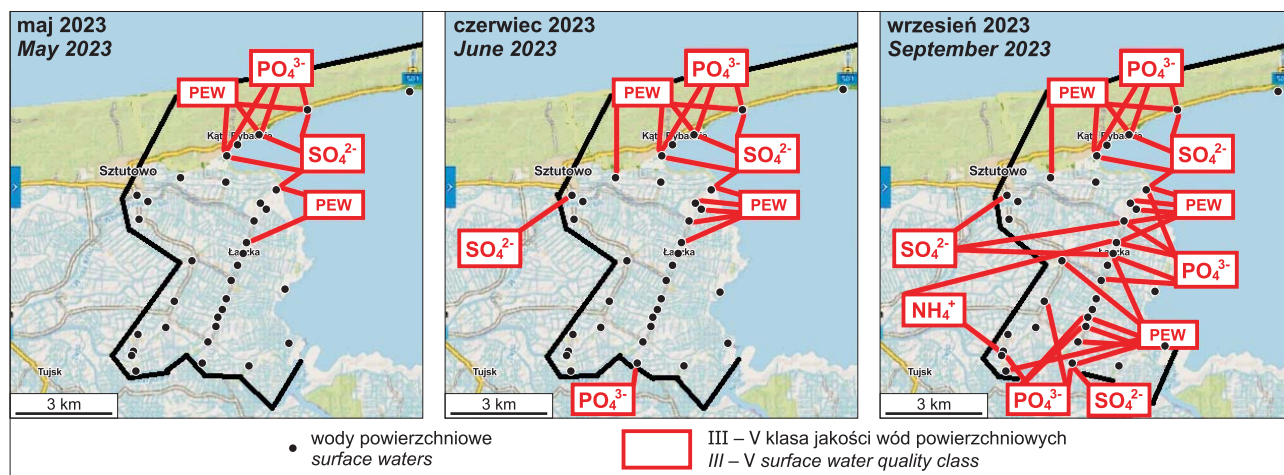
W wodach podziemnych ujmowanych w Dublewie na Żuławach (punkt 48) wysokie PEW oraz stężenia fosforanów $>5 \text{ mgPO}_4/\text{dm}^3$ i jonów amonowych $>10,5 \text{ mgNH}_4/\text{dm}^3$ (tab. 2, ryc. 1, 3), klasyfikujące wody do V klasy jakości (Rozporządzenie, 2019), także wskazują na zanieczyszczenie związane najprawdopodobniej z działalnością bytową.

Wody powierzchniowe na obszarze Żuław charakteryzują się wyraźnym wpływem Zalewu Wiślanego, który przejawia się wahaniami poziomu i przepływu wód oraz powoduje zmiany ich składu chemicznego prowadząc do zasolenia. Sam zalew jest zbiornikiem wód słonawych o zasoleniu od 1,0 do 3,7 PSU w części zachodniej do 9 PSU w rejonie Cieśniny Piławskiej (Kruk, 2016, Bolałek, 2018). W badaniach wykonanych w pięciu miejscach w przybrzeżnych wodach Zalewu Wiślanego (punkty 46, 27, 28, 50 i 29) przewodnictwo elektrolityczne PEW wynosiło 2960–6780 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tab. 3). Istotnym

problemem środowiska Zalewu Wiślanego, poruszonym w licznych pracach naukowych, jest eutrofizacja i pojawiające się w sezonie letnim zakwity glonów (Graniczny i in., 1998; Kruk, 2016; Bolałek, 2018; Witak, Pędziński, 2018). W czasie badań terenowych stwierdzono liczne strefy pokryte kwitnącymi glonami oraz wysokie stężenia substancji biogennych: ilość fosforanów do $3,24 \text{ mgPO}_4/\text{dm}^3$, azotanów do $120 \text{ mgNO}_3/\text{dm}^3$ a siarczanów do $>250 \text{ mgSO}_4/\text{dm}^3$, klasyfikując wody zalewu powyżej II klasy jakościowej, czyli w zakresie, gdzie klas się nie ustala (punkty 46, 27, 28, 50 i 29; tab. 3, ryc. 1, 5; Rozporządzenie, 2021). Pod względem substancji biogennych wody te charakteryzują się złym stanem chemicznym. W porównaniu z danymi przedstawionymi w opracowaniu Bolałka (2018) widać, iż obecnie zmniejszyło się stężenie jonów amonowych z maksymalnego $1,7 \text{ mgNH}_4/\text{dm}^3$ w latach 1954–2015 do $<0,26 \text{ mgNH}_4/\text{dm}^3$ w 2023 r. oraz wzrosła ilość fosforanów z maksymalnej $0,441 \text{ mgPO}_4/\text{dm}^3$ w okresie 1954–2015 do $3,24 \text{ mgPO}_4/\text{dm}^3$ w roku 2023.

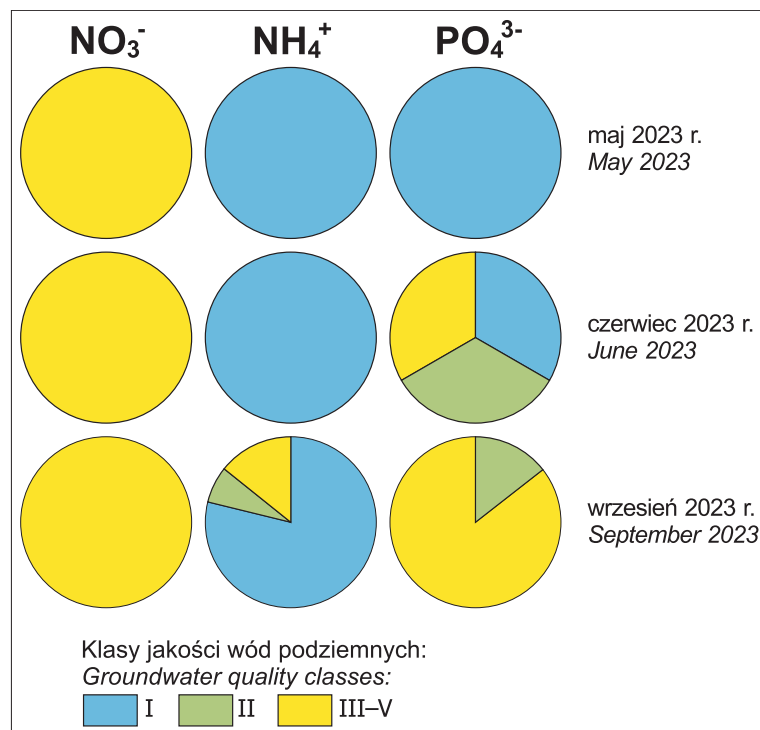
Realnym zagrożeniem dla wód Zalewu Wiślanego jest dopływ wód rzek i kanałów melioracyjnych z obszarów rolniczych oraz obecność oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w Elblągu, Fromborku, Tolkmicku, Krynicy Morskiej oraz w Kaliningradzie, Gusiewie, Bałtijsku i Bagratoniu. Kruk (2016) zwraca uwagę, iż oczyszczalnie po stronie rosyjskiej odprowadzają do zalewu ścieki słabo lub nie oczyszczone. Stan wód tego zbiornika jest oceniany jako zły, co potwierdzają badania przeprowadzone w 2023 r.

Wody rzek uchodzących do zalewu – Szkarpawy, Wisły Królewieckiej i Tugi oraz większości kanałów i rowów melioracyjnych także charakteryzują się stanem chemicznym poniżej dobrego. Jest to spowodowane wlewami zasolonych wód z Zalewu Wiślanego oraz zanieczyszczeniem. Jak wykazują Borowiak i Cieśliński (2002) znaczenie ma także praca systemu melioracyjnego, który zarówno ogra-



Ryc. 5. Rozkład przestrzenny podwyższonych i wysokich stężeń analizowanych parametrów hydrogeochemicznych w wodach powierzchniowych, badania własne 2023 r.

Fig. 5. Spatial distribution of increased concentrations of analysed hydrogeochemical parameters in surface water, own research of 2023



Ryc. 6. Wykresy klas jakości wód powierzchniowych dla azotanów, jonów amonowych i fosforanów w wodach podziemnych w maju, czerwcu i wrześniu 2023 r.

Fig. 6. Charts of nitrate, ammonia and phosphate quality classes in surface water in May, June and September 2023

nicza intruzje wód zasolonych z Zalewu Wiślanego, jak i prowadzi do mieszania się wód rowów, kanałów i rzek w wyniku zmian kierunków przepływu uzależnionych od pracy pompowni. Mieszanie to sprzyja rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń spływających z terenów rolniczych.

Wysokie stężenia substancji biogenych zaobserwowane w 2023 r. (fosforany do $1,68 \text{ mgPO}_4/\text{dm}^3$, azot amonowy do $8,68 \text{ mgNH}_4/\text{dm}^3$ i siarczany do $237 \text{ mgSO}_4/\text{dm}^3$) oraz wysokie PEW – do $5920 \mu\text{S}/\text{cm}$ (tab. 3) wskazują, że pod względem biogenów wody rzek, kanałów i rowów melioracyjnych, podobnie, jak wody Zalewu Wiślanego, należy zaliczyć do złego stanu chemicznego, czyli powyżej II klasy jakościowej (Rozporządzenie, 2021). Ponadto, podobnie jak w przypadku wód podziemnych, zaobserwowano wyraźny wzrost stężeń i zróżnicowania analizowanych

parametrów po okresie letnim, czyli podczas wrześniowej kampanii terenowej (ryc. 5, 6).

W maju i w czerwcu tylko w kilku punktach pomiarowych występowały stężenia analizowanych parametrów przekraczające II klasę jakości wód (punkty 18, 15, 26, 16, 17 i 45) (ryc. 1, 5). Natomiast we wrześniu w większości analizowanych punktów nastąpiło wyraźne pogorszenie jakości wód (ryc. 5). Obserwowany we wrześniu wzrost stężeń analizowanych substancji biogenych w wodach powierzchniowych obszaru żuławskiego jest zgodny z wcześniejszymi badaniami, których wyniki są prezentowane m.in. w pracy Bolałek (2018), z badaniami przeprowadzonymi na innym typowo rolniczym terenie w rejonie Pucka (Wojciechowska i in., 2019a, b) czy w pracach z innych terenów nadmorskich na świecie (Oenema i in., 2005; Howarth, 2008). Autorzy zwracają uwagę na wyraźną zmienność sezonową zawartości związków azotu i fosforu w wodach powierzchniowych dopływających do akwenów morskich, z najwyższymi stężeniami w sierpniu i we wrześniu. Ma to związek z praktykami rolniczymi, przede wszystkim ze stosowaniem nawozów i zbiorami plonów. Po żniwach powierzchnia ziemi jest odsłonięta, co zwiększa erozję i wymywanie wcześniej zaaplikowanych nawozów. Na obszarze objętym badaniami sprzyjającym elementem był deszczowy sierpień 2023 r., gdy intensywne opady powodowały silniejsze wypłukiwanie składników odżywczych z gleby.

Bolałek (2018) zwraca też uwagę na naturalny proces mineralizacji materii organicznej zachodzący w lecie, w wyższych temperaturach, powodujący wzrost stężeń biogenych składników pod koniec tego okresu.

WNIOSKI

Celem badań była ocena wpływu zagospodarowania terenu na skład chemiczny wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie Zalewu Wiślanego, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów charakteryzujących warunki biogenne.

1. Przeprowadzone badania wykazały, iż działalność człowieka jest ważnym czynnikiem wpływającym na skład chemiczny wód powierzchniowych i podziemnych zarówno na terenie Mierzei Wiślanej, jak i na Żuławach. Jednak wpływ antropopresji jest lokalny i przejawia się przede wszystkim wysokimi stężeniami jonów PO_4^{3-} i NH_4^+ , klasyfikującymi wody do złego stanu chemicznego. Oba jony należą do słabych migrantów wodnych, stąd tak wysokie ich stężenia mogą świadczyć o bezpośrednim miejscu zanieczyszczenia. Ważne znaczenie ma także zaobserwowany wzrost stężeń analizowanych parametrów w badaniach terenowych pod koniec września 2023 r.

2. Stwierdzono, że na Mierzei Wiślanej zanieczyszczenie wód podziemnych ma charakter bytowy, jest związane ze wzrastającą liczbą ludności w okresie letnim i przenikaniem nieczystości z nieszczelnych lub przepelnionych szamb i powierzchni terenu do płytkiej, nieizolowanej warstwy wodonośnej.

3. Na obszarze Żuław źródłem zanieczyszczenia jest przede wszystkim działalność rolnicza i w mniejszym stopniu także bytowa. Przejawia się ona dopływem substancji biogenych z nawożenia pól uprawnych i niekontrolowanego zrzutu nieczystości do rowów i kanałów melioracyjnych. Ze względu na obecność jonów PO_4^{3-} i NH_4^+ oraz lokalnie SO_4^{2-} , przy braku NO_3^- można przypuszczać, iż substancje biogenne są związane przede wszystkim z wywożeniem nawozów naturalnych na pola uprawne i obecnością ferm hodowlanych, a w mniejszym stopniu z wykorzystaniem nawozów mineralnych.

4. Obydwa analizowane obszary w rejonie Zalewu Wiślanego można zaliczyć jako wrażliwe na antropogeniczne zanieczyszczenie wód. Na obszarze żuławskim, mimo niewielkiej izolacji warstwy wodonośnej, realnym zagrożeniem dla wód podziemnych i powierzchniowych jest rolnicze wykorzystanie terenu i jego przekształcenie przez człowieka poprzez osuszanie siecią kanałów i rowów melioracyjnych systemu polderowego. Na Mierzei Wiślanej zagrożeniem dla wód podziemnych jest brak izolacji warstwy wodonośnej i znaczny wzrost ludności w okresie letnim.

5. Obecność Zalewu Wiślanego ma także wpływ na wody podziemne i powierzchniowe terenu badań. Zalew jest bowiem główną bazą drenażu analizowanych wód. Największe oddziaływanie zalewu zaznacza się na wody powierzchniowe Żuław, gdzie wpływa na zmiany składu chemicznego wód, prowadząc do zasolenia oraz powoduje wahania ich poziomu i przepływu.

W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w ramach rocznego projektu finansowanego z programu IDUB *Technetium Talent Management Grants* pt. *Ocena zagrożenia antropogenicznego wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie Zalewu Wiślanego* nr 7/1/2022/IDUB/III.4c/Tc. Projekt był realizowany w okresie 03.2023–03.2024 r. przez studentów Koła Naukowego Ochrona i Kształtowanie Środowiska Przyrodniczego *Geo-Aqua* pod kierunkiem dr hab. Małgorzaty Pruszkowskiej-Caceres, prof. PG. Autorzy serdecznie dziękują obu Recen-

zentom – Panu Profesorowi Janowi Przybyłkowi z UAM w Poznaniu oraz anonimowemu Recenzentowi – za konstruktywne i cenne uwagi i komentarze merytoryczne oraz udzielone wsparcie edytorskie.

LITERATURA

- BOLAŁEK J. 2018 – Zalew Wiślany. Wydaw. Nauk. PWN, Warszawa.
- BOROWIAK M., CIEŚLIŃSKI R. 2002 – Skład chemiczny wód powierzchniowych wschodniej części delty Wisły. [W:] Drwal J. (red.), *Wody delty Wisły. Część wschodnia*. GTN, Gdańsk: 135–146.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., ZACHOWICZ J. 1998 – Studium geośrodowiskowe Zalewu Wiślanego i jego otoczenia przy wykorzystaniu nowoczesnych technik kartograficznych. *Prz. Geol.*, 46 (12): 1254–1260.
- HELCOM 2009 – Eutrophication in the Baltic Sea. An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. *Baltic Sea Environ. Proc.*, 115B: 20.
- HELCOM 2018 – Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. *Baltic Sea Environ. Proc.*, 153: 43.
- HOWARTH R. W. 2008 – Coastal nitro gen pollution: a review of sources and trends globalny and regionalny. *Harmful Algae*, 8: 14–20.
- KOZERSKI B., KWATERKIEWICZ A. 1984 – Strefowość zasolenia wód podziemnych a ich dynamika na obszarze delty Wisły. *Arch. Hydrotechniki*, 31 (3): 231–255.
- KRUK H. 2016 – Problemy gospodarowania środowiskiem przyrodniczym w rejonie Zalewu Wiślanego. *Pr. Nauk. UE*, 453: 51–64.
- LIDZBARSKI M., KACHNIC J., KACHNIC M., KOZERSKI B., KRECZKO M., POMIANOWSKA H., PRUSSAK E., PRUSZKOWSKA M. 2007 – Region dolnej Wisły. Subregion Żuław Wiślanych. [W:] Paczyński B., Sadurski A. (red.), *Hydrogeologia regionalna Polski. T. 1. Wody słodkie*. Państw. Inst. Geol., Warszawa: 239–246.
- OENEMA O., VAN LIERE L., SCHOUMANS O. 2005 – Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in The Netherlands. *J. Hydrology*, 304 (1–4): 289–301.
- PRUSSAK E. 1998a – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Hydrogeologicznej Polski 1 : 50 000, ark. Kąty Rybackie. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PRUSSAK E. 1998b – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Hydrogeologicznej Polski 1 : 50 000, ark. Nowy Dwór Gdański. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- RAPORT o stanie gminy Sztutowo za 2022 rok. Sztutowo: 46.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Infrastruktury z 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. *Dz.U. z 2021 r. poz. 1475*.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych. *Dz.U. z 2019 r. poz. 2148*.
- WITAK M., PĘDZIŃSKI J. 2018 – Diatom record of progressive anthropopressure in the Gulf of Gdańsk and the Vistula Lagoon. *Oceanolog. Hydrobiolog. Stud.*, 47 (2): 167–180.
- WOJCIECHOWSKA E., NAWROT N., MATEJ-LUKOWICZ K., GAJEWSKA M., OBARSKA-PEMPKOWIAK H. 2019a – Seasonal changes of the concentrations of mineral forms of nitrogen and phosphorus in watercourses in the agricultural catchment area (Bay of Puck, Baltic Sea, Poland). *Water Supply*, 19 (3): 986–994.
- WOJCIECHOWSKA E., PIETRZAK S., MATEJ-LUKOWICZ K., NAWROT N., ZIMA P., KALINOWSKA D., WIELGAT P., OBARSKA-PEMPKOWIAK H., GAJEWSKA M., DEMBSKA G., JASIŃSKI P., PAZIKOWSKA-SAPOTA G., GALER-TATAROWICZ G., DZIERZBICKA-GŁOWACKA L. 2019b – Nutrient loss from three small-size watersheds in the southern Baltic Sea in relation to agricultural practices and Policy. *J. Environ. Manag.*, 252: 637–651.

Praca wpłynęła do redakcji 24.02.2024 r.

Akceptowano do druku 20.05.2024 r.