



Maciej Ziulkiewicz¹ • Anna Fortuniak¹ • Jan Górowski² • Mateusz Ajert³
Kacper Kaźmierczak³ • Kacper Lik³ • Natalia Mytkowska³ • Tomasz Ślusarczyk³



⁽¹⁾ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geologii i Geomorfologii

⁽²⁾ Uniwersytet Łódzki, Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych

⁽³⁾ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, II r. studiów stacjonarnych na kierunku Geomonitoring

E-mail: maciej.ziulkiewicz@geo.uni.lodz.pl; anna.fortuniak@geo.uni.lodz.pl; jan.gorowski@edu.uni.lodz.pl; mateusz.ajert@edu.uni.lodz.pl

kacper.kaźmierczak2@edu.uni.lodz.pl; kacper.lik@edu.uni.lodz.pl; natalia.mytkowska@edu.uni.lodz.pl; tomasz.slusarczyk@edu.uni.lodz.pl

Zintegrowana ocena stanu hydrochemicznego doliny rzecznej w obszarze podmiejskim na przykładzie Strugi Dobieszkowskiej (Młynówki) (gm. Stryków)

An integrated assessment of river valley hydrochemical conditions in a suburban area on the example of Struga Dobieszkowska (Młynówka) (The Stryków commune)

Zarys treści

W pracy przedstawiono wyniki badań wód występujących w jednej z najsilniej uźródłowionych dolin rzecznych na obszarze Wzniesień Łódzkich, tj. Strugi Dobieszkowskiej (Młynówki) – największego dopływu górnej Moszczenicy. Prace badawcze objęły, poza wodami źródłanymi, wody cieków i jego strefy hyporeicznej. Zrealizowano je w ciągu jednego dnia, dzięki czemu uzyskano zintegrowany obraz chwilowego stanu wód na obszarze trwającej od kilku dziesięcioleci presji antropogenicznej, związanej z postępującą urbanizacją podłódzkich wsi. Termin badań poprzedzony był długim okresem bezdeszczowym, stąd też przyjęto założenie, że badane środowiska będą reprezentować zasilenie podziemne. Dokonano oceny mieszania wód rzecznych i gruntowych pod dnem Strugi Dobieszkowskiej celem hydrochemicznej weryfikacji istnienia tam strefy hyporeicznej, gdyż wskazywały na to wyniki pomiarów pionowego gradientu hydraulicznego (VHG). Wykazano ogólne pogorszenia stanu hydrochemicznego wód w efekcie dopływu zanieczyszczeń, w tym poprzez strefę hyporeiczną. Porównanie trzech badanych środowisk wodnych wskazało zakres elementów hydrochemicznych, które istotnie je różnicują.

Słowa kluczowe Strefa hyporeiczna (HZ), źródła, rzeka, zanieczyszczenie wód.

Abstract

The work presents the results of waters research in Struga Dobieszkowska (Młynówka) river valley with a lot of natural groundwater outflows, which is located in the area of the Łódź Hills. The research work covered, apart from spring waters, the waters of the stream and its hyporheic zone. They were carried out in one day, thanks to which an integrated view of the current hydrochemical stage was obtained in the area, where anthropogenic pressure has been ongoing for several decades related to the progressive urbanization of villages in suburban area of the Łódź city. The research date was preceded by a long rainless period, hence it was assumed that the investigated environments would represent only underground water supply. The mixing of river and groundwater (represented by springs) under the streambed of the Struga Dobieszkowska was assessed in order to hydrochemically verify the existence of a hyporheic zone there, as this was indicated by the results of vertical hydraulic gradient (VHG) measurements. A general deterioration of the hydrochemical condition of water was demonstrated as a result of the inflow of pollutants, including through the hyporheic zone. Comparison of the three tested aquatic environments lead to identify which of chemical compounds that significantly differentiate them.

Keywords Hyporheic zone (HZ), springs, river, water contamination.

1. Wprowadzenie

Nasilająca się presja urbanizacyjna na terenach podmiejskich prowadzi, wśród innych poważnych skutków, do wzrostu ilości ścieków wprowadzanych do gruntu, często poprzez rozsączanie w przydomowych „oczyszczalniach ścieków”. Przyczynia się to do postępującej degradacji jakościowej lokalnych zasobów wodnych, co od blisko 30 lat obserwowane jest w okolicach Łodzi (Hereźniak-Ciotowa,

Ziulkiewicz 1997; Burchard, Ziulkiewicz 2002; Ziulkiewicz 2012; Ziulkiewicz i in. 2021; Wieczorek i in. 2024). Jest to bardzo niepokojące, gdyż zmiany takie zachodzą na obszarze wododziałowym z wielką ilością naturalnych wpływów wód podziemnych, inicjalnych odcinków cieków i zbiorników małej retencji. Jednym z przejawów zanieczyszczenia, niosącego za sobą groźbę dalszych szkodliwych zmian w środowisku wodnym okolic Łodzi, są wysokie stężenia biogenów (Nowicka-Krawczyk i in. 2022). O ile

dotychczas stosowany sprzęt badawczy umożliwiał dostęp do wód powierzchniowych i podziemnych, to wody znajdujące się na kontakcie obu tych środowisk umykały bezpośredniej obserwacji. Przy czym nie chodzi tutaj o wody inicjujące odpływ powierzchniowy w niszach źródłiskowych, lecz środowisko wzajemnej wymiany i mieszania, które rozciąga się bezpośrednio pod korytem rzek. Jest to strefa hyporeiczna (HZ), a urządzeniem, które zapewnia do niej efektywny dostęp jest gradientometr (Marciniak, Chudziak 2015; Marciniak i in. 2022). Pierwsze w regionie łódzkim badania zawartości biogenów w HZ ukazały zakres zmian czaso-przestrzennych stężeń mineralnych form azotu i fosforu wzdłuż biegu podmiejskiego cieków źródłiskowych (Ziulkiewicz i in. 2021).

Celem niniejszej pracy jest rozpoznanie trzech środowisk wodnych doliny rzecznej, tj. wód źródłanych, wód hyporeicznych i rzecznych pod względem zanieczyszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem mineralnych form azotu i fosforu. Jako obiekt badań wybrano jedyny w regionie ciek, którego źródła, ale i fragment dolin objęte są ochroną rezerwatową, tj. Strugę Dobieszkowską (Młynówkę), płynącą w parku krajobrazowym Wzniesień Łódzkich. Jak wykazały badania sprzed ponad 10 lat jest to ciek wyraźnie zanieczyszczony biogenami i pod tym względem odpowiadający rzekom silnie zanieczyszczonym (Ziulkiewicz 2012).

Aktualnie programy monitoringu środowiska realizują ocenę stanu wód podziemnych i powierzchniowych jako oddzielnych środowisk. Jednym z elementów testowania klasyfikacyjnego JCWPd jest analiza stanu JCWP przez pryzmat stanu chemicznego wód pierwszego (od powierzchni) kompleksu wodonośnego, zakładająca oddziaływanie płytkich wód podziemnych na powierzchniowe (Raport 2020). W ocenie stanu ekologicznego wód konieczne jest, według Bikseya i Gross (2001), uznanie strefy hyporeicznej jako kontinuum hydrologicznego, łączącego wody powierzchniowe i podziemne. Pewną trudność stanowi jednak brak spójnej definicji HZ (Boano i in. 2014; Lewandowski i in. 2019). Dla potrzeb niniejszej pracy celowy wydaje się opis HZ, integrujący definicję hydrologiczną z definicją hydrochemiczną (Gooseff 2010). Według Naranjo i in. (2013) jest to strefa mieszania między systemami przepływów rzecznych i wód gruntowych, w których woda rzeczna wpływająca do HZ zamienia energię i substancje rozpuszczone z wodą gruntową i powraca do koryta rzecznego mając zmienioną charakterystykę chemiczną, w zależności od efektywności mieszania, zaistniałych reakcji chemicznych i czasu przebywania w strefie hyporeicznej. Strefa ta towarzyszy rzece wzdłuż całego jej biegu, choć heterogeniczność środowiska aluwialnego sprawia, że nie wszędzie wymiana wód poprzez dno koryta rzeczno-gruntowego może faktycznie zachodzić (Wondzell 2011; Harvey i in. 2019).

Innym rodzajem środowiska łączącego wody podziemne z powierzchniowymi są naturalne samowypływy wód podziemnych na powierzchnię terenu, które w zależności od wielkości wyróżnia się jako źródłiska, źródła, wycieki (wykapy) i wysięki. Ich występowanie w krajobrazie jest jednak ograniczone, a tam gdzie się koncentrują, tworzą

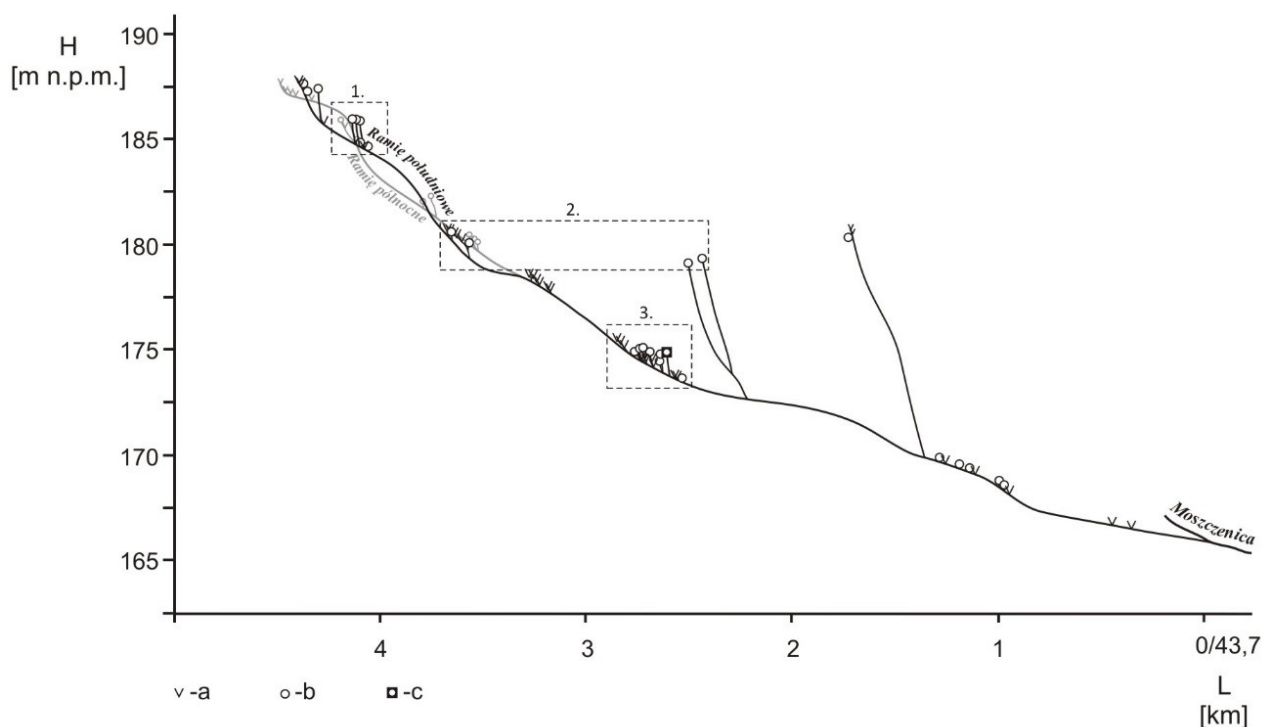
strefy źródłiskowe. Z punktu widzenia biegu rzek, są to zasadniczo obszary położone w najwyższych partiach dorzeczy, inicjujące skoncentrowany odpływ powierzchniowy. Ważna rola źródeł w badaniach stanu hydrochemicznego dolin rzecznych wynika również z tego, iż reprezentują one środowiska wód podziemnych drenowanych przez rzeki, szczególnie przy braku studni czy piezometrów umożliwiających dostęp do warstw wodonośnych. Dają tym samym wgląd w stan jednego z dwóch zasadniczych elementów końcowych procesu mieszania wód w HZ. Odcinki źródłiskowe cieków są predystynowane do obserwacji strefy hyporeicznej, gdyż zachodzące tam procesy mogą znacząco wpływać na warunki hydrochemiczne strumieni, podczas gdy w większych ciekach procesy te tracą na znaczeniu (Wondzell 2011).

2. Obszar badań

Struga Dobieszkowska (SD) funkcjonuje na obszarze Wzniesień Łódzkich, uznanych za jeden z najbardziej uźródłowionych fragmentów środkowej Polski (Maksymiuk, Mela 1995). Jej dolina jest z kolei jedną z najsilniej uźródłowionych spośród dolin cieków biorących początek w rejonie Łodzi (Moniewski 2004). Ich cechą szczególną jest, że wypływy wód podziemnych koncentrują się zasadniczo u krawędzi teras nadzalewowych, tworząc linie źródeł schodzących wzdłuż biegu cieków (Maksymiuk, Mela 1995) – rys. 1.

Zasilanie Strugi Dobieszkowskiej i jej źródeł odbywa się z utworów naglinowych i śródglinowych w strefie zaburzeń glacytektonicznych (Moniewski 2004), przy czym utwory śródglinowe cechują się nieco gorszymi zdolnościami filtracyjnymi niż utwory naglinowe (Ziulkiewicz 2016). Pomimo, iż źródła SD wykazują małą zmienność wydatku (Moniewski 2004), to charakterystyki zasobowe istotnie je różnicują (Ziulkiewicz 2016). Źródła naglinowe, descensyjne cechuje stosunkowo szybka wymiana wód w drenowanym fragmencie wodonośności, natomiast podglinowe, ascensyjne dużo wolniejsza. Generalnie wypływy zasilające SD cechuje bardzo szeroki przedział przeciętnych wydajności: od 0,03 L/s (pojedyncze wypływy spod terasy nadzalewowej) do 4 L/s (odpływy z amfiteatralnie wykształconych nisz w stoku doliny) (Burchard, Mela 1995; Maksymiuk, Mela 1995; Moniewski 2004; Ziulkiewicz 2016).

Struga Dobieszkowska jest ciekami IV rzędu o bardzo dużym udziale zlewni zerowego odpływu w zlewni topograficznej (Walisch 2003) – rys. 2, co dotyczy również innych cieków biorących początek na obszarze Wzniesień Łódzkich. Ze względu na charakter topograficzny zlewni o powierzchni 17,49 km² i stoczystości 44%, Struga Dobieszkowska przy długości 4,35 km cechuje się spadkiem sięgającym 5‰, typowym dla obszarów wyżynnych (Hereźniak-Ciotowa, Ziulkiewicz 1997; Ziulkiewicz 2012). W zlewni górnej Moszczenicy, do której zalicza się obszar odwadniany przez SD, udział zasilania podziemnego rzek przekracza 60%. Natomiast odpływ podziemny wynosi 4,1 L/s/km², przy całkowitym sięgającym 7 L/s/km²



Rys. 1. Profil podłużny Strugi Dobieszkowskiej (Młynówki) oraz położenie naturalnych wypływów wód podziemnych; a – wyciek, b – źródło, c – źródło obudowane, 1., 2., 3. – oznaczenie grup źródeł (Żelazna-Wieczorek i in. 2010, zmienione)

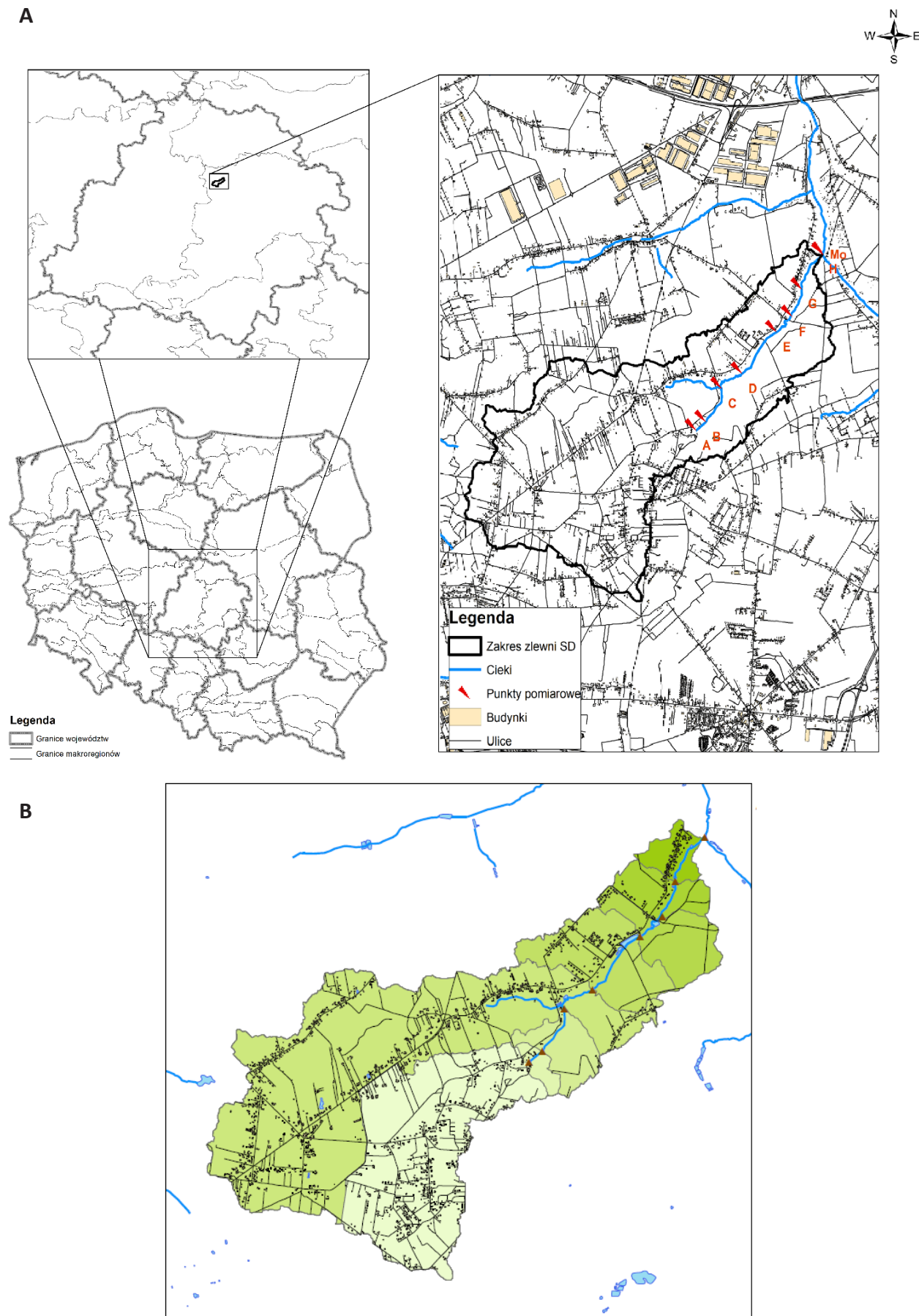
Fig. 1. Longitudinal profile of the Struga Dobieszkowska stream (Młynówka) and layout of springs; a – leakage, b – spring, c – enclosed spring, 1., 2., 3. – groups of springs (Żelazna-Wieczorek et al. 2010, changed)

(Jokiel 2004). Struga Dobieszkowska w swoim górnym biegu dzieli się na dwa ramiona, północne i południowe (rys. 1 i 2). Źródła południowej odnogi położone są wyżej (186,6 m n.p.m.) niż odnogi północnej (184,5 m n.p.m.). Średnia wydajność południowego ramienia jest też większa (32,7 L/s wg Moniewskiego 2004) od północnego (20,1 L/s wg Walischa 2003). Całkowity przepływ SD w ujściu do Moszczenicy, wg pomiarów VI.2009–V.2010, wahał się w granicach 105,5–860,4 L/s (Ziułkiewicz 2012). Największe przepływy zarejestrowano w lutym 2010, co jest zgodne z obserwacjami Moniewskiego (2004) o kulminacji odpływu w SD wczesną wiosną, tj. w lutym i marcu.

Pierwsze badania hydrochemiczne źródeł w dolinie Strugi Dobieszkowskiej pochodzą z roku 1995 (Burchard, Mela 1995), przy czym dotyczyły one źródeł położonych w dolinie północnego ramienia SD. Pełniejszy obraz warunków hydrochemicznych przyniosła praca Hereźniak-Ciotowej i Ziułkiewicza (1997), w ramach której przeprowadzono badania 18 źródeł. Wyniki wykazały istotny udział charakteru zagospodarowania zlewni topograficznych źródeł w kształtowaniu ich stanu zanieczyszczenia. Bardzo zauważalne było oddziaływanie użytków rolnych w wypływach zasilanych od strony pól w porównaniu z wypływami zasilanymi od strony lasu (rezerwatu Struga Dobieszkowska). W latach 1996–1997, kiedy realizowano wstępny etap monitoringu źródeł na terenie parku krajobrazowego Wzniesień Łódzkich, do badań w dolinie SD wytypowano osiem źródeł. Wyniki wykazały, że cztery z nich kształtowały większą część swoich cech powyżej

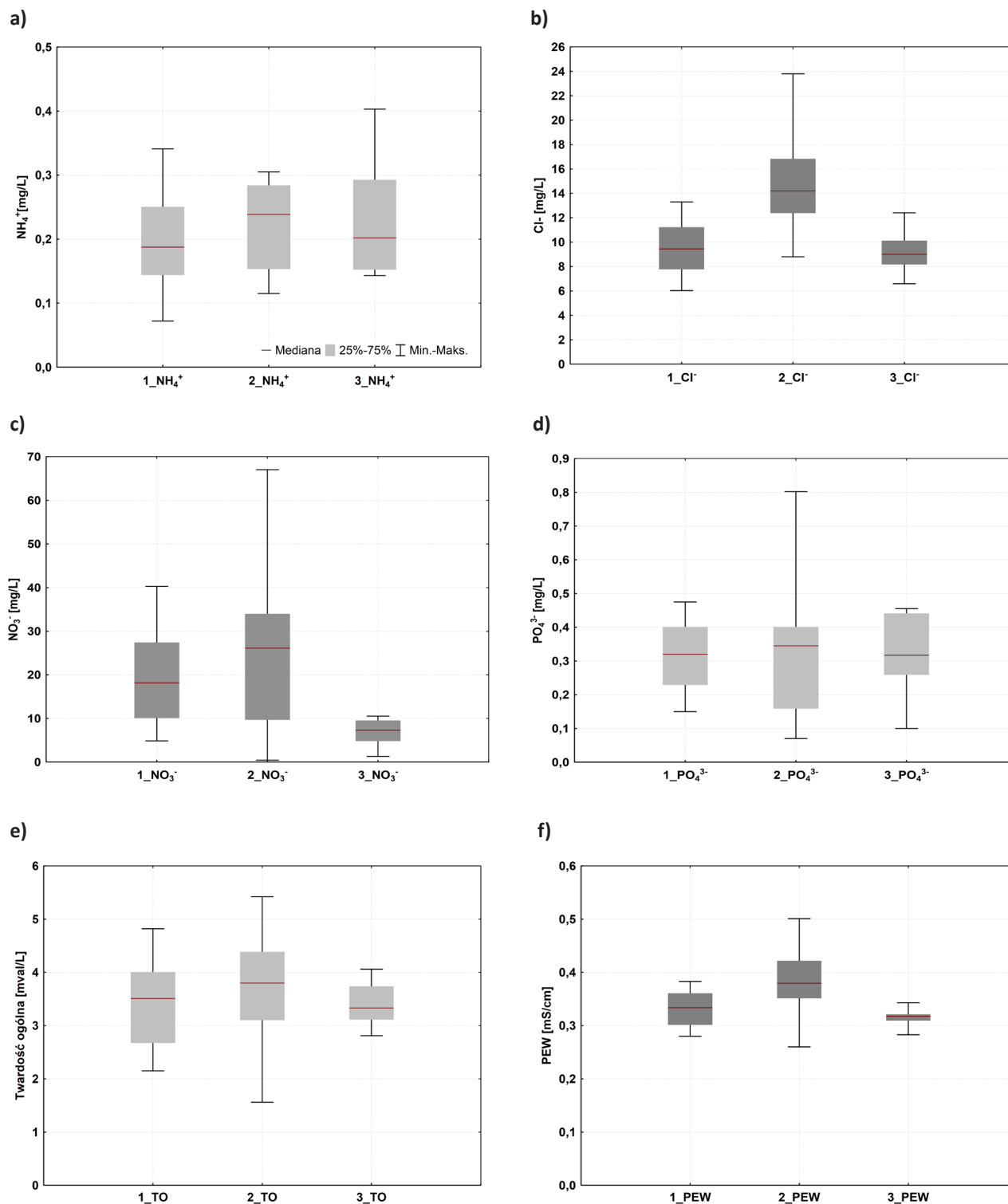
górnego zakresu tła hydrochemicznego (Ziułkiewicz 2001). Kolejny cykl badań przeprowadzono w latach 2001–2003 i objęto nimi dwa źródła ze zlewni SD. 30-miesięczne regularne badania wykazały, że obiekty zasilane z odstąpiętego wodonośca, który jest alimentowany na obszarze rolniczym z postępującą zabudową podmiejską podlega wyraźnemu oddziaływaniu ognisk zanieczyszczeń (Ziułkiewicz, Żelazna-Wieczorek 2007). W latach 2003–2006 przeprowadzono badania trzech źródeł funkcjonujących w rezerwacie Struga Dobieszkowska, położonych w kompleksie leśnym rozciągającym się na południowo-wschodnim i południowym stoku doliny. Wypływy istotnie różniły się między sobą pod względem położenia hipsometrycznego i morfologicznego oraz parametrów fizykochemicznych i stanu algoflory bentosowej. To nasunęło przypuszczenie, że zasilanie źródeł z głębszych partii wodonośca (ew. poziomu śródoglinowego) zapewniło wyraźnie niższy poziom zanieczyszczeń niż w przypadku zasilania z płytszych części warstwy wodonośnej (ew. poziomu naglinowego) (Żelazna-Wieczorek i in. 2010).

Zróźnicowanie hydrochemiczne źródeł funkcjonujących w dolinie Strugi Dobieszkowskiej w granicach rezerwatu według danych zebranych w latach 1996–2010 i z wydzieleniem trzech grup hipsometrycznych (rys. 1), przedstawiono na rys. 3. Porównanie zbiorów wartości elementów hydrochemicznych testem U Manna-Whitneya wykazało istotność różnic w przypadku chlorków i PEW dla grupy środkowej względem górnej i dolnej oraz azotanów dla grupy dolnej względem górnej i środkowej.



Rys. 2. Położenie obszaru badań (A) i wydzielenie zlewni częściowych dla poligonów badawczych (B)

Fig. 2. Location of research area (A) and research sites with indication their partial catchment areas (B)



Rys. 3. Zakresy wybranych elementów hydrochemicznych w wodach grup źródeł badanych w latach 1996–2010; grupy hipsometryczne źródeł: 1 – górna, 2 – środkowa, 3 – dolna; a) jon amonowy, b) chlorki, c) azotany, d) ortofosforany, e) twardość ogólna, f) przewodność elektrolityczna właściwa

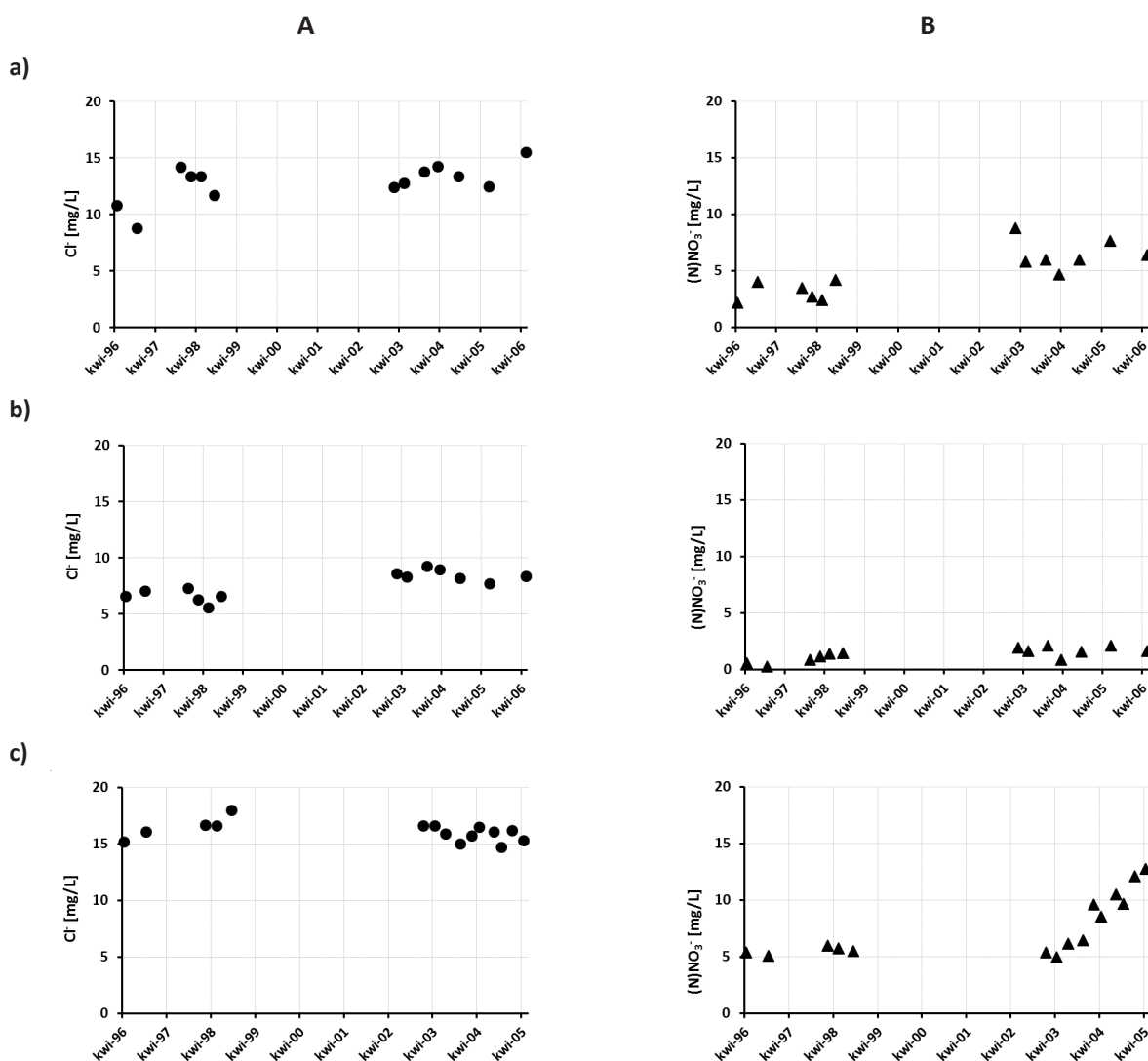
Fig. 3. Value ranges of selected hydrochemical compounds in waters of spring groups studied in 1996–2010; altitude spring groups: 1 – upper group, 2 – medial group, 3 – lower group; a) ammonia, b) chlorides, c) nitrates, d) phosphates, e) hardness, f) electroconductivity (SEC)

Czasową zmienność stężeń wybranych elementów hydrochemicznych w źródłach doliny Strugi Dobieszkowskiej, badanych w wieloleciu 1996–2006 w ramach różnych tematów badawczych (Hereźniak-Ciotowa, Ziulkiewicz 1997; Ziulkiewicz 2001; Ziulkiewicz, Żelazna-Wieczorek 2007), przedstawiono na rys. 4.

Jon chlorkowy, jak wspomniano powyżej, różnicuje istotnie część źródeł w dolinie SD, lecz nie wykazuje istotnej tendencji wzrostowej między sekwencją badawczą z lat 1996–1998 a 2003–2006 (rys. 4a). Inaczej przedstawia się sytuacja stężeń jonu azotanowego, gdzie tylko w grupie źródeł dolnych nie ma istotnej tendencji wzrostowej, natomiast w grupie środkowej zmiana jest wyraźna. Szczególnie dotyczy to źródła wiejskiego od początku roku 2003¹ (rys. 4b), gdzie została przekroczona ówczesnie obowiązująca norma dla wód pitnych, co

wydawało się o tyle istotne, gdyż z tego źródła czerpano wodę do celów bytowych mieszkańców pobliskiego gospodarstwa (Żelazna-Wieczorek, Ziulkiewicz 2007).

Struga Dobieszkowska była badana w latach 2009–2010 podczas oceny stanu jakości wód górnej Moszczenicy spływających do zbiornika strykowski. Zestawienia stężeń i ładunków form biogenów w SD i jej recypencie wykonano na podstawie danych archiwalnych (Interpretacja... 2020) w tabeli 1. Uzyskane wyniki wykazały, że SD prowadziła wody eutroficzne i była dopływem najsilniej obciążonym biogenami i solami mineralnymi spośród wszystkich dopływów górnej Moszczenicy. Pod względem pochodzenia zanieczyszczeń, antropogeniczny ładunek biogenów czterokrotnie przekraczał ładunek naturalny znoszony ze zlewni topograficznej tego cieku (Ziulkiewicz 2012).



Rys. 4. Zmiany stężeń jonu chlorkowego (A) i azotu azotanowego (B) w źródłach doliny SD w latach 1996–2005/2006: w rezerwacie dla grupy środkowej (a), grupy dolnej (b) (wg rys. 1) oraz we wsi Dobieszków Dolny (c) – rys. 2

Fig. 4. Concentration changes of chlorides (A) and nitrate nitrogen (B) in spring waters of SD valley in 1996–2005/2006: in the reserve area for upper group (a), medial group (b) (acc. fig. 1) and the Dobieszków Dolny village (c) – fig. 2

¹To efekt podłączenia w roku 2002 do wodociągu wiejskiego pobliskich gospodarstw bez równoczesnej inwestycji kanalizacyjnej – obserwacje i wywiady przeprowadzono w czasie pomiarów zwierciadła wody w tamtejszych studniach gospodarskich.

Tabela 1. Zestawienie stężeń i ładunków wskaźników zanieczyszczeń wnoszonych do Moszczenicy przez Strugę Dobieszkowską; wyróżniono wielkości wskazujące na wody eutroficzne wg Ilnickiego i in.² (2008)**Table 1.** Concentrations and loads of contaminations which are led by Struga Dobieszkowska to Moszczenica; marked values indicate eutrophic waters according to Ilnicki *et al.* (2008)

Wskaźnik	Struga Dobieszkowska		Moszczenica bezpośrednio powyżej ujścia Strugi Dobieszkowskiej	
	Stężenie średnie [mg/L]	Ładunek ^{b)} [kg/d]	Stężenie średnie [mg/L]	Ładunek ^{b)} [kg/d]
Substancje mineralne	201	2919	222	2093
Cl ⁻	13,4	393,5	16,8	301,7
N-NH ₄	0,065	1,902	0,091	1,799
N-NO ₃	2,9	88,4	2,0	46,7
P-PO ₄	0,136	4,081	0,116	2,093

^{a)} Ocena na podstawie: N-NO₃, P-PO₄.^{b)} Wyznaczone ze średnich z czterech terminów badawczych: VI.2009, X.2009, II.2010, V.2010.

3. Metody badań

Przyjęty schemat postępowania zakładał przeprowadzenie badań na poligonach specjalnie do tego celu wytypowanych na biegu ciek. Ich wyznaczenie przeprowadzono wg następujących kryteriów:

1. Położenie w bezpośrednim sąsiedztwie dużego źródła lub strefy źródłiskowej zasilających Strugę Dobieszkowską, ze szczególnym uwzględnieniem obiektów, które wcześniej objęto badaniami hydrochemicznymi;
2. Położenie z uwzględnieniem układu hydrograficznego, tj. miejsc połączenia z północnym ramieniem i ujść wód ze zbiorników małej retencji;
3. Obecności dawnych budowli piętrzących;
4. Dostępności miejsc do badań ze względu na przemieszczanie się zespołu badawczego w obrębie rezerwatu przyrody.

Łącznie wytypowano osiem poligonów badawczych na Strudze Dobieszkowskiej i jeden na Moszczenicy powyżej jej ujścia – rys. 2. W każdym z nich dokonywano:

- pomiaru natężenia przepływu ciek (Q),
- pomiaru wydajności źródła/źródła,
- pomiaru gradientu hydraulicznego (VHG) pomiędzy strefą hyporeiczną i korytem rzeczny w najgłębszym miejscu profilu poprzecznego koryta rzeczny,
- pomiarów cech fizyczno-chemicznych wody rzeczny, źródlanej i hyporeicznej w zakresie: temperatura, przewodność elektrolityczna właściwa (PEW), odczyn, redoks i tlen rozpuszczony *in situ*,
- poboru próbek wody j.w. do analiz laboratoryjnych.

Pomiar przepływu ciek wykonywano zastawką lub młynkiem hydrometrycznym Hega-1, wydatek źródła określano metodą podstawionego naczynia lub zastawką, VHG mierzono gradientometrem. Pomiary wykonywano przy pomocy urządzeń ELMETRON: CP-315M, CO-315

i CP-411 wraz z dedykowanymi czujnikami i elektrodami firmy EUROSENSOR. Mierniki były przed pomiarami kalibrowane w roztworach wzorcowych pH-4, pH-7, PEW-500μS/cm i w roztworze beztlenowym. Próbkę wody pobierano do pojemników PE 500 ml i w ciągu 6h, kiedy były przechowywane w lodówkach turystycznych, dostarczano do laboratorium Katedry Geologii i Geomorfologii UŁ. W laboratorium oznaczano: jon chlorkowy i substancje mineralne (sm), jako miary zasolenia wód, oraz N-NH₄, N-NO₃ i P-PO₄, jako mineralne formy pierwiastków biogennych. Wszystkie oznaczenia wykonano wg znormalizowanych procedur analitycznych³.

Badania zostały przeprowadzone w ciągu jednego dnia, 22 maja 2023 r. w kolejnych punktach, postępując od źródła początkowego SD ku jej ujściu do Moszczenicy. Charakterystykę poligonów badawczych przedstawiono w tabeli 2.

Dla określenia udziału wód rzecznych w strefie mieszanina pod dnem ciek posłużono się metodą podaną przez Hilla i in. (1998) i Malarda (2003):

$$f_l = (C_s - C_2) / (C_1 - C_2) \quad (1),$$

gdzie f_l jest udziałem wód rzecznych w HZ, a: C_1 , C_2 , C_s to stężenia jonu odpowiednio w: wodzie rzeczny, wodzie gruntowej i wodzie z HZ.

Obliczenia statystyczne i część wizualizacji danych hydrochemicznych wykonano w programie Statistica 7.1.

4. Wyniki badań

Wielkości natężenia przepływu Strugi Dobieszkowskiej oraz wydajności źródeł w poszczególnych punktach badawczych zestawiono w tabeli 3. Podano również czas swobodnego dopływu wody korytem SD do poszczególnych poligonów względem faktycznego czasu przeprowadzenia w nich badań i pomiarów.

² Zespół badawczy obejmował, poza częścią autorów niniejszej publikacji, pozostałych studentów II roku kierunku Geomonitoring na WNG UŁ w roku akademickim 2022/23 w Osobach: Dominika Gucwa, Marta Jacoń, Julia Ostrowska, Eliza Paciuch, Eliza Pieczyńska, Bartosz Rutana, Weronika Sęczkowska.

³ Stężenia chlorków wg PN-ISO 9297, fosforanów wg PN-C-04537:1973, amonu wg DIN 38406-5, azotanów wg DIN EN 26777 oraz sumę substancji mineralnych (sm) wg PN-C-04541:1978.

Tabela 2. Charakterystyka wytypowanych do badań poligonów Strugi Dobieszkowskiej**Table 2.** Characteristics of Struga Dobieszkowska researching sites

Lp.	Ozn.	Współrzędne (ukł. 1992) N E	Położenie na biegu SD [m]	Charakterystyka poligonu	Zakres badań ^{a)}	Powierzchnia zlewni cząstkowej [km ²]
1	A	51°50'15.48'' 19°34'30.51''	0	We wsi Borki, bezpośrednio poniżej źródła inicjalnego południowego ramienia Strugi Dobieszkowskiej i poza granicami rezerwatu	Ż	4,63
2	B	51°50'122.44'' 19°34'42.05''	313	Przy dawnej wiejskiej ścieżce z Imielnika do Byszew i powyżej zbiornika bobrowego na południowym ramieniu SD. Punkt w granicach rezerwatu	R, Ż, HZ	4,83
3	C	51°50'36.77'' 19°34'42.05''	885	Poniżej tamy bobrowej i powyżej ujścia północnego ramienia SD. Punkt w granicach rezerwatu	R, Ż, HZ	5,51
4	D	51°50'49.77'' 19°35'17.92''	1507	Poniżej ujścia północnego ramienia SD, bezpośrednio poniżej dawnego jazu piętrzącego wodę dla młyna w Starym Imielniku, a jednocześnie powyżej zabudowy Dobieszkowa Dolnego i w granicach rezerwatu	R, Ż, HZ	13,86
5	E	51°50'11.83'' 19°35'52.24''	2514	Poniżej ujścia wód ze zbiornika dobieszkowskiego i jednocześnie poniżej ujścia wód z tzw. „blizniaczych” źródeł w rezerwacie	R, Ż, HZ	15,43
6	F	51°50'17.87'' 19°36'07.95''	2967	Bezpośrednio poniżej dawnego jazu piętrzącego wodę w stawie młyńskim w ługach i poniżej ujścia leśnej strugi źródłiskowej w rezerwacie, a jednocześnie powyżej zabudowy wsi Ługi	R, Ż, HZ	16,43
7	G	51°50'42.69'' 19°36'20.46''	3544	Przy mostku wiejskiej ścieżki ze wsi Ługi do lasu na wysokości budynku OSP Ługi. Punkt poza granicami rezerwatu	R, HZ	17,07
8	H	51°50'55.03'' 19°36'37.58''	4319	Poniżej zabudowy wsi Ługi i powyżej ujścia SD do Moszczenicy. Punkt poza granicami rezerwatu	R, HZ	17,49
9	M	51°50'55.49'' 19°36'39.73''	–	Moszczenica 10 m w górę od ujścia SD. Punkt poza granicami rezerwatu	R, HZ	–

^{a)} R – wody rzeczne, Ż – wody odpływające ze źródeł/źródeł, HZ – wody hyporeiczne.

W kolejnych punktach pomiarowych wielkość natężenia przepływu w korycie Strugi Dobieszkowskiej sukcesywnie rośnie, z wyjątkiem poligonów E i H, gdzie Q uległo zmniejszeniu. Pomimo tego w ostatnim punkcie pomiarowym na biegu SD (H) przepływ wody był większy niż w jej recypencie, tj. Moszczenicy.

Najniższą wydajność ze wszystkich opomiarowanych, ma rozległe źródło inicjalne SD w Borkach. Łączna wydajność badanych źródeł, tj. 8,03 L/s, stanowi 9,2% przepływu zmierzonego w ujściu SD do Moszczenicy.

Obliczone czasy dopływu wody korytem Strugi Dobieszkowskiej do kolejnych poligonów badawczych wska-

zują, że zasadniczo reżim czasowy badań względem płynącej wody został zachowany. Biorąc po uwagę, że pomiędzy poligonami B i C znajduje się staw bobrowy o nieoznaczonym w czasie niniejszych badań czasie zatrzymania wody⁴, jej dopływ z poligonu B do poligonu C jest dłuższy.

Wartości pomierzonych VHГ в дне кoryта речнегo в poszczególnych punktach badawczych zestawiono в rys. 5.

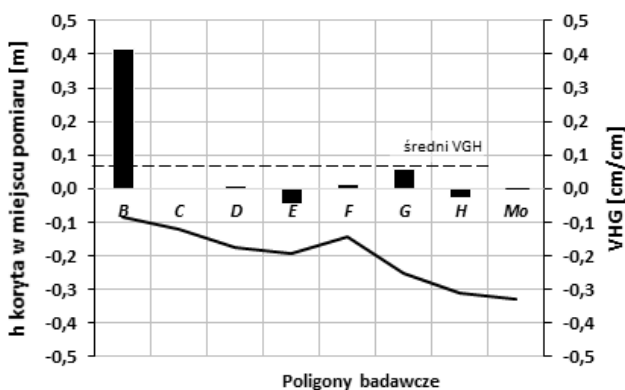
⁴ Powierzchnia zbiornika wg geoportal.gov.pl wynosi 1935 m², przy średniej głębokości 0,25 m daje to pojemność 485 m³. Przepływ SD na poligonie C wyniósł 0,032 m³/s, więc $V/Q_c = 4h 12'$.

Tabela 3. Przepływy Strugi Dobieszkowskiej i wydajność źródeł w poligonach badawczych w dn. 22.05.2023 r. oraz czas dopływu wody do kolejnych poligonów badawczych rzeki**Table 3.** River flow of Struga Dobieszkowska and yield of springs in research sites on May 22, 2023 and water inflow times to following research sites via riverbed

Ozn. pkt.	Godz. pomiaru	Q [L/s]	$V_{SR}^{a)}$ [m/s]	L [m]	Czas spływu wody [s]/[min.]	Czas dopływu wody do poligonu badawczego [min]
$A_2^{b)}$	8:30	0,05	–	–	–	–
B	9:20	10,9	0,113	312,7	2767/46	8:30 + 0:46 = 9:16
B_2	9:15	2,25	–	–	–	–
C	10:25	32,1	0,200	572,0	2860/47	90:20 + 0:47 = 10:07
C_2	10:10	0,20	–	–	–	–
D	10:55	62,6	0,208	622,4	2992/50	10:25 + 0:50 = 11:15
D_2	11:15	0,06	–	–	–	–
E	12:45	43,7	0,204	1006,1	4932/82	10:55 + 1:22 = 12:17
E_2	13:00	4,95	–	–	–	–
F	13:35	97,0	0,270	453,3	1679/28	12:45 + 0:28 = 13:13
F_2	13:40	0,76	–	–	–	–
G	14:25	121,7	0,241	577,6	2397/40	13:35 + 0:40 = 14:15
H	15:10	87,1	0,252	774,6	3074/51	14:25 + 0:51 = 15:16
Mo	15:40	79,4	0,330	–	–	–

^{a)} Liczona jako $Q/\Delta F$.

^{b)} Indeks „Z” oznacza pomiar źródła/źródlika.



Rys. 5. Gradient hydrauliczny (VHG) zmierzony w dniu SD w poszczególnych poligonach badawczych oraz Moszczenicy (Mo); zaznaczono średnią wielkość VHG dla SD

Fig. 5. Vertical hydraulic gradient (VHG) measured in research sites of SD and Moszczenica (Mo) riverbeds

Najwyższy dodatni VHG stwierdzono na poligonie B, w korycie bezpośrednio przylegającym do tamtejszego źródła. W pozostałych punktach VHG był znacznie słabszy. Należy przy tym dodać, że źródła na tych poligonach były znacznie oddalone od miejsc pomiarów gradientu hydraulicznego. W poligonie C pomiaru nie wykonano, gdyż strefa HZ okazała się nieaktywna. Zasadniczo dominował gradient wskazujący na przepływ wody z HZ do koryta; średni VHG jest dodatni (rys. 5), przy czym w poli-

gonie E i H wystąpiły warunki dla przenikania wód rzecznych pod dno strugi. Tam też stwierdzono ubytek ilości wody płynącej korytem (tab. 3). W dniu Moszczenicy powyżej ujścia SD stwierdzono równowagę pomiędzy wodami rzeczными i hyporecznymi ($VHG=0$).

Wyniki pomiarów cech fizykochemicznych wód rzecznych, źródłanych i hyporecznych na poszczególnych poligonach zestawiono w tabeli 4.

Woda rzeczna spływając korytem przez około 7 godzin (11 godz., gdyby uwzględnić szacunkowy czas zatrzymania w stawie bobrowym) ogrzała się o ponad 5°C. W tych warunkach zarejestrowano zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego względem punktu początkowego pomiarów (A) *in plus* maksymalnie o 1,75 mg/L (F), a przy ujściu, czyli po pokonaniu ponad 4 km biegu wód, tylko o 0,2 mg/L (H). Najwyższe stężenie tlenu stwierdzono poniżej miejsca burzliwego przepływu wód SD przez resztki zniszczonej tamy zbiornika młyńskiego w ługach (powyżej poligonu F). Z biegiem cieku obniżała się generalnie PEW, choć w p. D i E nieznacznie wzrosła względem punktów sąsiednich (o 20 $\mu S/cm$). Odczyn wód cieku był słabo alkaliczny i w poligonach E i F przekroczył 8 jedn. pH – tam również zmierzono jedno z najwyższych stężeń rozpuszczonego tlenu. Potencjał redoks wód cieku wykazał lekką tendencję rosnącą wraz ze wzrostem stężenia tlenu. Temperatura wód dopływających do koryta cieku z nisz źródłkowych była zasadniczo niższa od wód samej strugi, choć zaznaczyła się tutaj prawidłowość, że im dłuższą drogę ma do

Tabela 4. Cechy fizykochemiczne wód badanych w dolinie Strugi Dobieszkowskiej**Table 4.** Physicochemical properties of waters in Struga Dobieszkowska valey

Ozn. próby	TW [°C]	PEW [μS/cm]	Odczyn pH [-]	Redoks [mV]	Tlen rozpuszczony [mg O ₂ /L]
A _z	11,8	400	7,44	+65	8,35
B	11,5	373	7,72	+102	9,46
B _z	10,2	403	7,71	+88	10,23
B _{HZ} ^{a)}	10,2	356	7,72	-17	3,17
C	12,2	377	7,79	+100	8,66
C _z	9,3	429	7,74	+98	9,71
C _{HZ}	–	–	–	–	–
D	12,5	380	7,89	+207	9,85
D _z	11,6	369	7,86	+57	6,87
D _{HZ}	14,6	339	7,73	-63	0,23
E	14,0	397	8,03	+108	9,75
E _z	12,8	466	7,97	+91	9,77
E _{HZ}	14,1	340	7,65	-41	1,82
F	15,5	365	8,09	+153	10,10
F _z	16,9	355	7,93	+148	8,40
F _{HZ}	14,3	357	7,32	-25	2,04
G	17,1	368	7,89	+67	8,84
G _{HZ}	13,2	616	7,73	-5	0,81
H	16,4	367	7,96	+132	8,54
H _{HZ}	15,5	392	7,40	+1	1,32
M	19,4	416	7,80	+124	7,81
M _{HZ}	17,6	415	7,68	-8	0,73

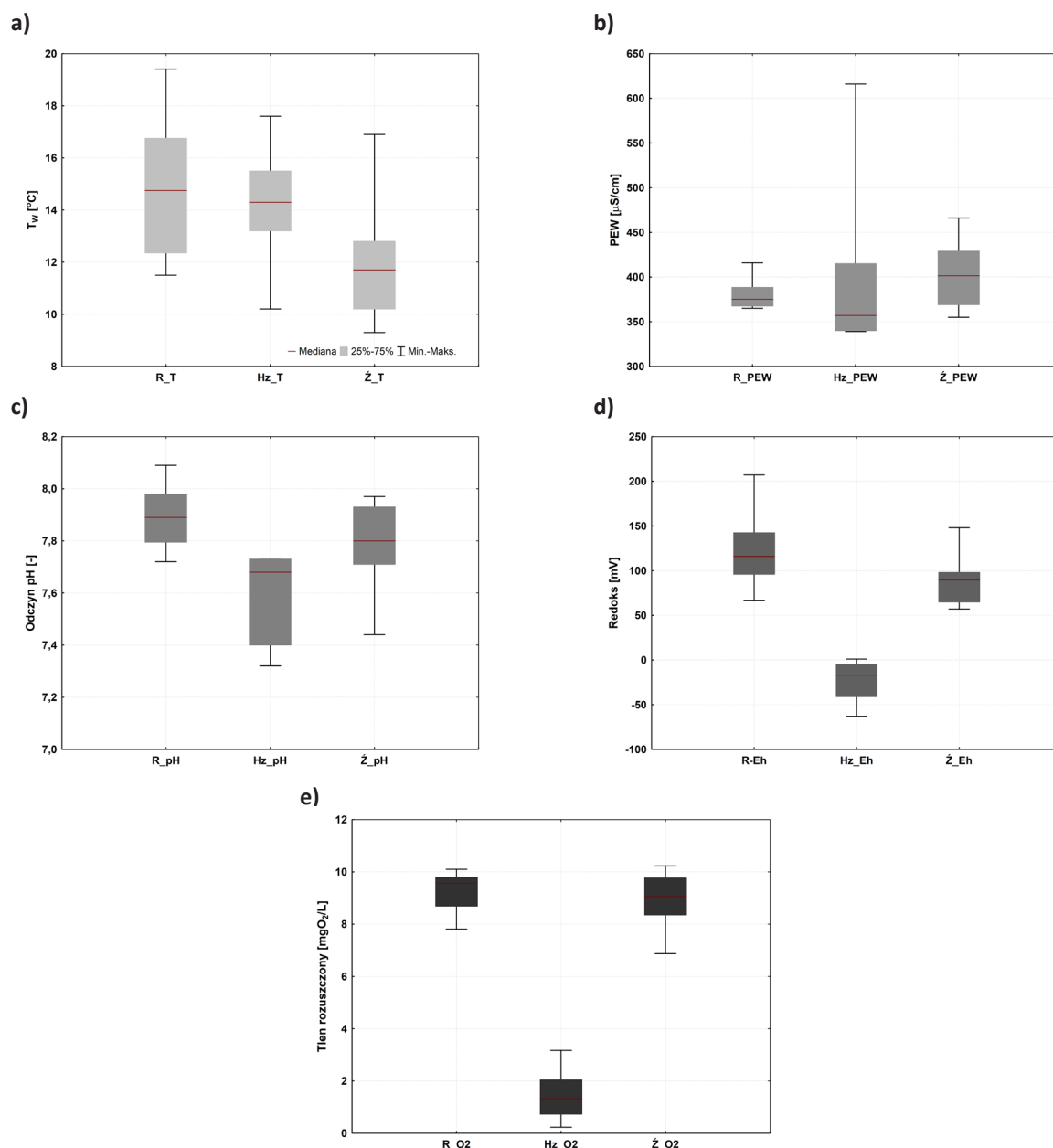
^{a)} Woda pobrana spod dna rzeki, ze strefy hyporeicznej.

pokonania woda źródłana spływając z niszy, tym temperatura jej jest wyższa. Na przykład w źródłisku w p. B (B_z) dystans to ok. 10 m i temperatura wody 10,2°C, w p. E (E_z) ok. 110 m i 12,8°C, a w p. F (F_z) ok. 200 m i temp. 16,9°C. W ostatnim przypadku temperatura wód dopływających ze źródła do SD okazała się wyższa niż w cieku. PEW w źródłiskach grupy górnej – rys. 1 (A_z i B_z) i środkowej (C_z, E_z) była wyższa niż wód cieku, podczas gdy w źródłiskach grupy dolnej (D_z, F_z) niższa. Odczyn wód źródeł odpowiadał odczynowi wód cieku, mieścił się zasadniczo w granicach błędu pomiaru, tj. 0,03. Potencjał redoks był wyraźnie niższy w tych przypadkach, kiedy woda źródłana miała do pokonania krótki dystans między niszą a korytem SD. Jeśli odległość była dłuższa, to E_h, jak i stężenie tlenu rozpuszczonego były zbliżone do wód rzecznych, a nawet wyższe (w C_z i E_z). W tej kwestii wart uwagi jest przypadek źródła B_z, gdyż pomimo krótkiej drogi, jaką pokonują tamtejsze wody źródlane, ich spływ do koryta cieku odbywa się po dużej pochyłości wśród kamieni i grubego żwiru ruchem silnie turbulentnym.

Dla zilustrowania specyfiki wód pozyskanych do badań spod dna Strugi Dobieszkowskiej, ich parametry fizyko-

-chemiczne zestawiono z wodami rzeczными i gruntowymi (źródłanymi), jako potencjalnymi elementami końcowymi procesu mieszania w strefie hyporeicznej – rys. 6. Z zestawienia wynika, że temperatura wód (rys. 6a) daje podstawę do przypuszczenia, że wody spod koryta SD mogą być wynikiem mieszania cieplejszych wód rzecznych z chłodniejszymi gruntowymi. Średnia PEW wód hyporeicznych jest niższa od PEW wód z obu pozostałych środowisk (rys. 6b). Podobnie w przypadku pozostałych właściwości fizykochemicznych, tj. odczynu wód, potencjału redoks i tlenu rozpuszczonego (rys. 6c-e). Test U wykazał, że w przypadku tych trzech właściwości, wody spod dna SD istotnie różnią się od wód rzecznych i gruntowych (źródłanych). Obecność tlenu pod dnem cieku jednoznacznie wskazuje (tab. 4), że wnikają tam wody powierzchniowe, co potwierdzają pomierzone wielkości VH_G (rys. 5).

Wyniki oznaczeń wskaźników zanieczyszczenia przedstawiono w tabeli 5, z której wynika m.in., że stężenia chlorków w cieku bardzo nieznacznie rosły wraz z jego biegiem. Zmiany stężeń substancji mineralnych nie wykazały wyraźnej tendencji; choć ich najwyższe stężenie zarejestrowano na początku cieku (A_z), a najniższe przy ujściu (H).



Rys. 6. Zróżnicowanie badanych wód pod względem cech fizyczno-chemicznych; R – wody rzeczne, Hz- wody hyporeiczne, Ż – wody źródlane

Fig. 6. Physicochemical differentiation of researched waters in Struga Dobieszkowska valley; R – river waters, Hz – hyporeic waters, Ż – spring waters

Poziom stężenia azotu amonowego był w Strudze Dobieszkowskiej dużo niższy od Moszczenicy, gdyż tę formę azotu stwierdzono na niskim poziomie i tylko w trzech poligonach (D, E i H). Stężenia azotu azotanowego generalnie malały z biegiem cieku, ale w ujściu (H) były wyraźnie wyższe od recipienta. Fosfor fosforanowy okazał się wskaźnikiem bardzo dynamicznie zmieniającym się w czasie spływu wód korytem SD. Najwyższe stężenie zarejestrowano w górnym odcinku strugi, w obrębie rezerwatu, a także we wcześniej wyróżnionych p. D i E. Dalej z biegiem cieku stężenia malały, choć w ujściu okazały się wyższe od Moszczenicy.

Chlorków w wodach źródłanych było zasadniczo mniej niż w rzecznych, podczas gdy substancji mineralnych więcej. Azotu amonowego w wodach źródłanych nie stwier-

dzono, natomiast pod względem stężeń azotu azotanowego źródła zachowały znany z badań wcześniejszych obraz zróżnicowania. W źródłach grupy górnej i środkowej (B_z , C_z , E_z) (rys. 1), N-NO_3 stwierdzono więcej niż w źródłach grupy dolnej (D_z i F_z) i jednocześnie więcej niż w wodach rzecznych. Należy tutaj podkreślić, że już na samym początku SD (A_z) azotu azotanowego stwierdzono względnie dużo, tj. wyraźnie więcej niż w ujściu (H) i dwukrotnie więcej niż w Moszczenicy. Stężenia P-PO_4 w wodach źródłanych, podobnie jak w wodach rzecznych, wykazały bardzo dużą zmienność i w zbliżonym zakresie wartości.

Graficzny obraz zróżnicowania hydrochemicznego wód hyporeicznych, rzecznych i źródłanych (gruntowych) zestawiono na rys. 7.

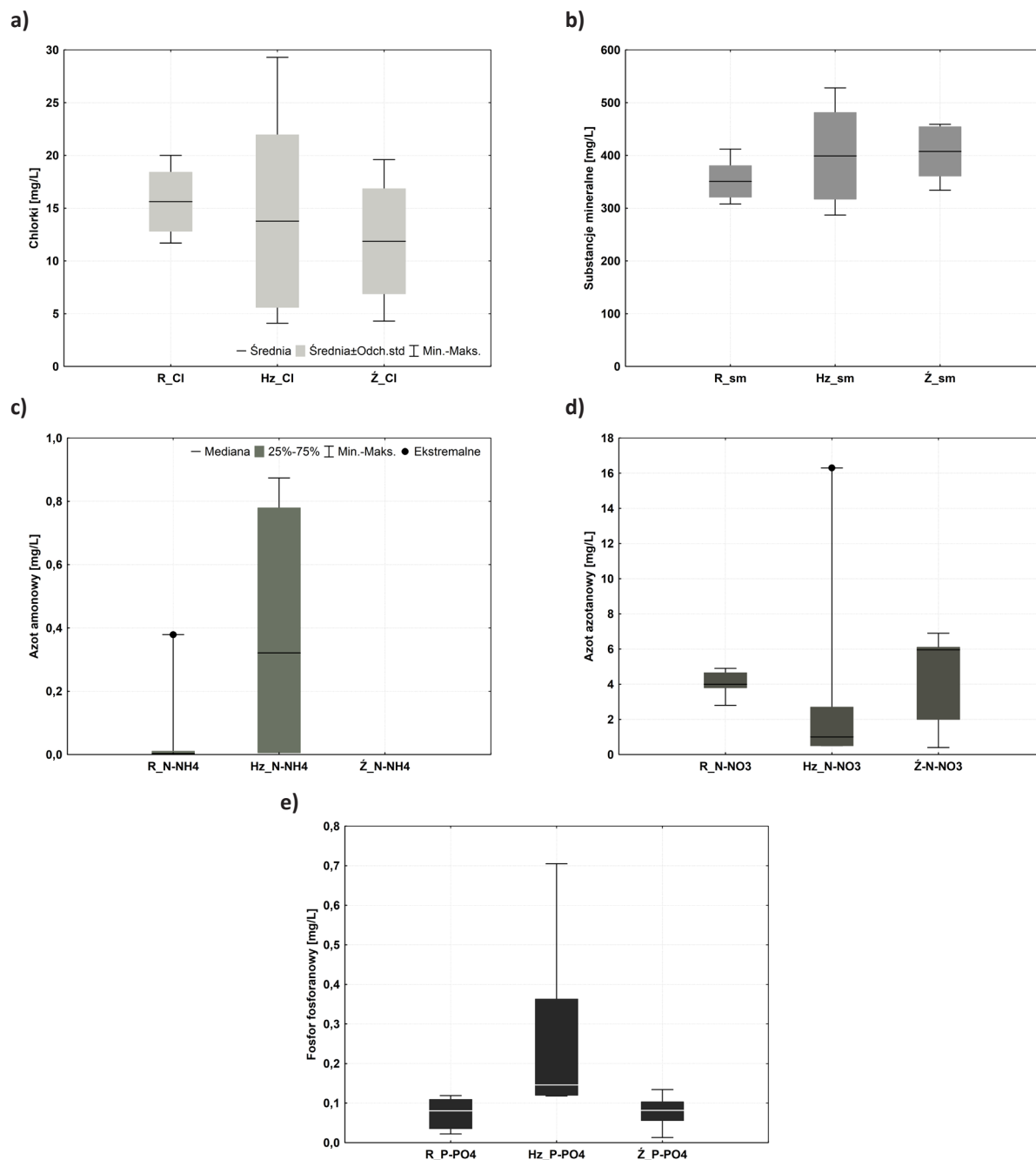
Tabela 5. Stężenia badanych elementów hydrochemicznych w wodach doliny Strugi Dobieszkowskiej**Table 5.** Concentrations of chemical compounds in waters of Struga Dobieszkowska valey

Ozn. próby	Cl ⁻	sm	N-NH ₄	N-NO ₃	P-PO ₄
	[mg/L]				
A _z	19,6	459	<0,005	6,1	0,056
B	11,7	347	<0,005	4,9	0,119
B _z	9,8	399	<0,005	6,1	0,013
B _{HZ}	10,0	401	0,006	2,7	0,120
C	11,7	344	<0,005	4,5	0,096
C _z	13,0	424	<0,005	5,8	0,134
C _{HZ}	–	–	–	–	–
D	15,7	367	0,007	4,8	0,113
D _z	11,7	381	<0,005	2,0	0,094
D _{HZ}	4,1	316	0,087	0,5	0,146
E	15,8	412	0,014	4,0	0,105
E _z	12,8	449	<0,005	6,9	0,103
E _{HZ}	8,3	437	0,779	0,5	0,611
F	15,8	337	<0,005	3,7	0,035
F _z	4,3	334	<0,005	0,4	0,069
F _{HZ}	11,9	287	0,874	0,5	0,705
G	17,4	343	<0,005	3,9	0,022
G _{HZ}	29,3	528	<0,005	16,3	0,118
H	16,8	308	0,007	4,0	0,065
H _{HZ}	14,9	378	0,723	1,0	0,243
M	20,0	347	0,379	2,8	0,036
M _{HZ}	17,9	447	0,321	1,4	0,133

Zróźnicowanie wód w dolinie Strugi Dobieszkowskiej pod względem stężeń chlorków może wskazywać, że w efekcie mieszania się wód pod dnem cieku, wody gruntowe rozcieńczają wody rzeczne. Natomiast w przypadku substancji mineralnych wody rzeczne rozcieńczają wody gruntowe (rys. 7a-b). Wody będące mieszaniną ich obu wykazują w efekcie pośredni poziom wartości obu wskaźników zasolenia. Test U nie wykazał przy tym, aby różnice w stężeniach chlorków i sm były w badanych wodach istotne statystycznie. Na podstawie obu wskaźników zasolenia, według wzoru (1), obliczono udział wód rzecznych w mieszaniu strefy hyporeicznej – wyniki zestawiono w tab. 6. Wskazują one, że spełnione zostało kryterium hydrochemiczne (Triska i in. 1989), by uznać, że Struga Dobieszkowska ma wykształconą strefę hyporeiczną, ponieważ udział wód rzecznych w HZ przekroczył 10%. Należy jednak zauważyć, że obliczenia przeprowadzono dla części poligonów, gdyż przy złożonym i nie do końca rozpoznanym systemie krążenia wód podziemnych w dolinie i tym samym warunków zasilania podziemnego Strugi Dobieszkowskiej, a także mozaikowym obrazie zanieczyszczeń antropogenicznych w badanych wodach, spełnienie założeń uproszczonego modelu obliczeń EMMA⁵ (Malard 2003; Battin i in. 2003) nie było możliwe.

Środowisko hyporeiczne Strugi Dobieszkowskiej cechuje się w stosunku do wód rzecznych i źródłanych wyraźnie wyższymi stężeniami N-NH₄ (rys. 7c) i P-PO₄ (rys. 7e) oraz obniżonymi N-NO₃ (rys. 7d). Test U wykazał, że różnice są istotne statystycznie we wszystkich tych przypadkach, za wyjątkiem dwóch: relacji N-NH₄ w wodach rzecznych i wodach hyporeicznych oraz N-NO₃ w HZ i wodach źródłanych (rys. 7c-d). Na uwagę zasługuje fakt, że maksymalnym stwierdzonym stężeniem azotu amonowego w strefie hyporeicznej towarzyszą przypadki maksymalnych stężeń fosforu fosforanowego (E_{HZ}, F_{HZ}, H_{HZ}) – tab. 5. Natomiast w punkcie G_{HZ} najwyższemu stężeniu azotu azotanowego towarzyszyły najwyższe stężenia chlorków i substancji mineralnych, a azot amonowy prak-

⁵ End-Member Mixing Analyses.



Rys. 7. Zróżnicowanie chemiczne badanych zbiorowisk wód doliny Strugi Dobieszkowskiej: R – wody rzeczne, Hz – wody hyporeiczne, Ż – wody źródłane

Fig. 7. Chemical differentiation of researched waters in Struga Dobieszkowska valley: R – river waters, Hz – hyporeic waters, Ż – spring waters

tycznie nie wystąpił. Zestawiając te przypadki z wynikami pomiarów VHГ należy podkreślić, że w miejscach dwóch z trzech wyżej podanych, tj. E_{HZ} i H_{HZ} , wystąpiły warunki sprzyjające wnikaniu wód rzecznych w dno koryta (rys. 5). Przemawia za tym obecność rozpuszczonego tlenu w HZ, co może sprzyjać amonifikacji obecnej w aluwialnych materiałach organicznych, ewentualnie tej dopływającej z wodami gruntowymi ze zlewni podziemnej. W poligonie F, gdzie w HZ zarejestrowano maksymalne stężenia $N-NH_4$ i $P-PO_4$, a jednocześnie wystąpił dodatni VHГ, panowały warunki sprzyjające przenikaniu zanieczyszczeń spod dna do kory-

ta rzecznej. Jeszcze silniej zaznaczyło się to na poligonie G, gdzie przy maksymalnym stwierdzonym stężeniu $N-NO_3$ w HZ (tab. 5), dodatni gradient hydrauliczny był jeszcze większy (rys. 5). Struga Dobieszkowska na odcinku pomiędzy poligonami E i H płynie w bezpośrednim sąsiedztwie dużej i starej zabudowy wsi Ługi (rys. 2). Na podstawie dotychczasowych badań, dotyczących strumienia Dzierżazna (Malina) w Zgierzu (Ziulkiewicz, Grulke 2021) i północnego ramienia Strugi Dobieszkowskiej w Imielniku Starym (Grulke 2022) wynika, że to właśnie bliskie sąsiedztwo wiejskich ognisk zanieczyszczeń jest

Tabela 6. Udział wód rzecznych w strefie mieszania pod dnem Strugi Dobieszkowskiej obliczony na podstawie stężeń chlorków (poligony B i F) i sm (p. E)

Table 6. The share of river waters in the mixing zone under the Struga Dobieszkowska riverbed calculated on the basis of the chloride (polygons B and F) and mineral substances (p. E) concentrations

Pn.	Wody gruntowe (źródlane)	Wody rzeczne	Wody spod dna SD	Udział wód rzecznych w HZ
	mg/L			%
B	9,8	11,7	10,0	10,5
F	4,3	15,8	11,9	66,0
E	449	412	437	32,4

przyczyną wysokich wartości wskaźników zanieczyszczenia wód we fragmentach strefy hyporeicznej. W źródłach, które funkcjonują po drugiej stronie doliny, w rezerwacie, tak wyraźnych świadectw zanieczyszczenia nie ma, natomiast wcześniejsze wyniki badań wód podziemnych wypływających w źródłach od strony wsi Ługi już dawno wskazywały na ich silne przeobrażenie – rys. 4bc (Hereźniak-Ciotowa, Ziulkiewicz 1997; Ziulkiewicz 2001; Żelazna-Wieczorek, Ziulkiewicz 2007).

Pomierzone wielkości Q oraz stężenia badanych elementów hydrochemicznych posłużyły do wyliczenia wielkości ich ładunków wnoszonych Strugą Dobieszkowską do Moszczenicy i ładunków niesionych nią samą – tabela 7. Po uwzględnieniu wielkości zlewni topograficznych, zamkniętych kolejnym poligonem badawczym, uzyskano ładunek jednostkowy dla każdej z nich. W zestawieniu uwzględniono również archiwalne wyniki badań Strugi Dobieszkowskiej i sąsiedniego dopływu Moszczenicy, Borchówki.

Na podstawie powyższego zestawienia należy stwierdzić, że:

- 1) najwyższe ładunki jednostkowe chlorków, sm i azotu azotanowego wystąpiły na poligonie G, gdzie w HZ stwierdzono również najwyższe ich stężenia (tab. 5). W przypadku ładunku jednostkowego N-NH₄ tylko częściowo pokrył się on z maksimum jego stężeń stwierdzonymi w HZ, tj. w poligonie E, ale nie F i H (tab. 5);
- 2) maksymalne ładunki jednostkowe chlorków, substancji mineralnych i N-NO₃ (z poligonu G) znajdują odniesienie do danych historycznych, tj. maja 2010 r.
- 3) Moszczenica niosła dwukrotnie niższe ładunki jednostkowe chlorków, substancji mineralnych i N-NO₃ od Strugi Dobieszkowskiej. Wielkości ładunków dla Moszczenicy znalazły odniesienie do poligonów z górnej części zlewni SD (B i C). W przypadku ładunku pozostałych zanieczyszczeń, Moszczenica transportowała blisko 30-krotnie więcej N-NH₄ od SD, a w przypadku P-PO₄ Struga Dobieszkowska przeważała 3,5-krotnie swojego recypienta.

Tabela 7. Ładunki zanieczyszczeń transportowane Strugą Dobieszkowską i Moszczenicą

Table 7. Runflow of contaminants in Struga Dobieszkowska and Moszczenica

Punkt bad.	sm		Cl ⁻		N-NH ₄		N-NO ₃		P-PO ₄	
	kg/d	kg/d.km ²	kg/d	kg/d.km ²	kg/d	kg/d.km ²	kg/d	kg/d.km ²	kg/d	kg/d.km ²
A	1,98	0,4	0,08	0,02	<0,000	0,0000	0,03	0,01	0,0002	0,0001
B	326,79	67,7	11,02	2,28	<0,005	<0,0010	4,61	0,96	0,112	0,0232
C	954,06	173,2	32,45	5,89	<0,010	<0,0025	12,48	2,27	0,266	0,0483
D	1984,97	143,2	84,92	6,13	0,038	0,0027	25,96	1,87	0,611	0,0441
E	1555,58	100,8	59,66	3,87	0,053	0,0034	15,10	0,98	0,396	0,0257
F	2824,33	171,9	132,42	8,06	<0,010	<0,0025	31,01	1,89	0,293	0,0179
G	3606,60	211,3	182,96	10,72	<0,010	<0,0025	41,01	2,40	0,231	0,0136
H	2317,84	132,5	126,43	7,23	0,053	0,0030	30,10	1,72	0,489	0,0280
M ^{a)}	2380,48	77,5	137,20	4,47	2,600	0,0850	19,21	0,63	0,247	0,0080
Struga Dob. ^{b)}	3371,28	192,7	212,65	12,16	0,000	0,0000	43,22	2,47	2,178	0,1250
Borch. ^{c)}	32,01	2,7	2,40	0,20	0,028	0,0020	0,04	0,03	0,010	0,0010

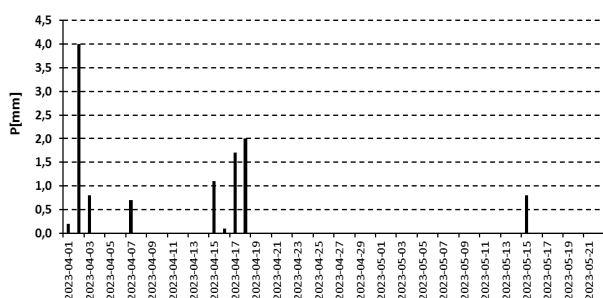
^{a)} A = 30,7 km²;

^{b)} Struga Dobieszkowska w maju 2010 r. przy Q = 200,2 L/s (obliczenia własne na podstawie danych w Interpretacja oceny... 2020);

^{c)} Borchówka w maju 2022 r. przy Q_{SR} = 1,85 L/s w ujściu do Moszczenicy i A = 12,02 km² (Kąpać się czy nie... 2022).

5. Dyskusja

Badania wód w dolinie Strugi Dobieszkowskiej (Młynówki) przeprowadzono w dniu poprzedzonym długim okresem bezopadowym (rys. 8). Należy więc przyjąć, że nie funkcjonował wtedy spływ powierzchniowy, a wody rzeczne pochodziły z drenażu korytowego i zasilania źródłowego. Maksymalne dobowe temperatury powietrza sięgające 23,8°C i średnie 7,9°C (kwiecień) oraz 11,8°C dla okresu 1–22.05.2023 r. sprawiły, że utrzymanie się potencjalnej szaty śnieżnej przez ten okres nie było możliwe.



Rys. 8. Dobowe sumy opadu atmosferycznego dla stacji pomiarowej w Dobrej-Nowinach w okresie poprzedzającym badania (dane pozyskano dzięki uprzejmości Zakładu Meteorologii i Klimatologii UŁ)

Fig. 8. Daily rainfall totals for meteorologic station in Good News village before research day. Data were obtained thanks to the courtesy of the Department of Meteorology and Climatology of the Lodz University

Przepływ Strugi Dobieszkowskiej w ujściu do Moszczonicy na poziomie 87,1 L/s był niższy niż w maju 2010 r. (200,1 L/s). Podobnie Moszczonica, powyżej ujścia SD, prowadziła 79,4 L/s wody w stosunku do 124,5 L/s w maju 2010 r., który cały był rokiem bardzo wilgotnym (Biuletyn 2022), podczas gdy maj 2023 r. określono jako suchy (Biuletyn 2023). Odpływ jednostkowy ze zlewni SD w ilości 4,2 l/s/km², obliczony na podstawie bieżących pomiarów, ukształtował się wyraźnie poniżej dolnej granicy przedziału podanego przez Jokiela (2004) dla tego obszaru.

Średni gradient hydrauliczny (VHG) był dla Strugi Dobieszkowskiej dodatni, co wskazuje na warunki sprzyjające drenażowi wód ze strefy hyporeicznej do koryta rzecznej (rys. 5). Tylko w dwóch przypadkach stwierdzono gradient ujemny, tj. na poligonie E i H, o czym mogły zdecydować lokalne warunki hydrodynamiczne lub hydrostatyczne (Boano i in. 2014; Lewandowski i in. 2019; Krause i in. 2022). W poligonie H może to być świadectwo „ucieczki” części wód Strugi Dobieszkowskiej w miejscu połączenia jej doliny z doliną Moszczonicy, która na tym odcinku jest silnie przegłębiona (Kamiński 1993). Taką „ucieczkę” potwierdza spadek natężenia przepływu SD pomiędzy poligonami G i H (tab. 3) oraz fakt, że w dniu SD na tym odcinku nie stwierdzono naporu hydraulicznego wód ze strefy hyporeicznej względem wód rzecznych (rys. 5), co mogło być takiej „ucieczce” przeciwdziałać.

Uzyskany obraz zróżnicowania hydrochemicznego wód rzecznych, źródłanych (gruntowych) i potencjalnego „produktu” ich mieszania, tj. wód pobranych spod dna rzeki wskazuje, że trudno jest udokumentować proces

mieszania uproszczoną formułą EMMA (1) w sytuacji, gdy występują czytelne symptomy zanieczyszczenia wszystkich badanych środowisk wodnych:

- rzecznych, które już od samego źródła inicjalnego prowadzą duże ilości substancji mineralnych, w tym chlorków (tab. 5),
- źródłanych (wypływających z rezerwatu) o wyższej mineralizacji oraz zawartości azotu-azotanowego i fosforu-fosforanowego niż wody rzeczne, które zasilają,
- hyporeicznych – noszących ewidentne świadectwa silnego zanieczyszczenia, gdy stężenia substancji mineralnych, chlorków i biogenów osiągają maksymalne stwierdzone w czasie badań stężenia.

W takich warunkach wody strefy hyporeicznej odróżniają się od swoich potencjalnych składowych mieszania na poziomie istotnym statystycznie pod względem biogenów (rys. 7) oraz odczynu pH, potencjału redoks i ilości rozpuszczonego tlenu (rys. 6). Zidentyfikowane w HZ Strugi Dobieszkowskiej warunki fizyczno-chemiczne sprzyjają zarówno amonifikacji, nitrifikacji, jak i denitrifikacji (Transformation Mechanisms... 2008). Ich efekty czytelne są w znacznych różnicach stężeń N-NH₄ i N-NO₃, jakie stwierdzono pomiędzy poszczególnymi poligonami (tab. 5). Uzyskane wyniki potwierdzają zjawisko anizotropii hydrochemicznej strefy HZ, rozpoznanej także w innych elementach sieci rzecznej Moszczonicy (Ziulkiewicz, Grulke 2021; Grulke 2022; Ziulkiewicz 2022).

Pojawia się ważne pytanie – czy wysokie koncentracje azotu i fosforu mineralnego w HZ Strugi Dobieszkowskiej znajdują odzwierciedlenie w ładunku zanieczyszczeń niesionych ciekami? W tabeli 8 zestawiono dane, które przyczynią się do odpowiedzi na powyższe pytanie.

Zwiększenie ładunków zanieczyszczeń na poligonie D może być spowodowane udziałem substancji wnoszonych do Strugi Dobieszkowskiej jej północnym ramieniem od Imielnika Starego – pomiędzy p. C i D następuje połączenie obu ramion SD (rys. 2). Zmniejszenie ładunków w poligonie F może być spowodowane obecnością na biegu cieku rozlewiska, powstałego w dniu dawnego zbiornika młyńskiego (rys. 2). Jest ono porośnięte helofitami, które bądź asymilują biogeny (P-PO₄), bądź przyczyniają się do ich nitrifikacji (N-NH₄) i przyrostu ładunku N-NO₃, co pomiędzy poligonami E i F w istocie stwierdzono (tab. 7). Natomiast w przypadku poligonu G woda spływa korytem w sposób swobodny, bez dopływów z nisz źródłowych czy innych obiektów (rys. 2). Wykazany przyrost ładunku jest więc wynikiem drenażu zanieczyszczonych wód ze strefy HZ.

Porównanie wielkości ładunków badanych związków chemicznych wynoszonych ze zlewni topograficznych, które bezpośrednio ze sobą sąsiadują i mają bardzo zbliżoną powierzchnię, tj. Borchówki i zlewni poligonu D (tab. 2), pozwala stwierdzić, że górny fragment zlewni SD jest wyraźnie silniej obciążony zanieczyszczeniami. Tylko ładunki jednostkowe azotu amonowego kształtują się na zbliżonym poziomie, natomiast pozostałe są 30–60 krotnie większe. Jeśli przyjąć za propozycją Pazdry i Kozerskiego (1990), że dominacja N-NH₄ nad pozostałymi formami

Tabela 8. Zmiany ładunku zanieczyszczeń niesionych Strugą Dobieszkowską w poligonach o dodatnim VHГ względem stężeń zanieczyszczeń w wodach strefy hyporeicznej**Table 8.** Changeability of contaminant loads in research sites with positive VHГ according to its concentrations in hyporeic zone

Poligon	D _{HZ}		F _{HZ}		G _{HZ}		
Element hydrochemiczny	N-NH ₄	P-PO ₄	N-NH ₄	P-PO ₄	Cl ⁻	sm	N-NO ₃
VHГ [cm/cm]	+0,010		+0,015		+0,060		
Stężenie [mg/L]	0,087	0,146	0,874	0,705	29,3	528	16,3
Ładunek na poprzednim poligonie [kg/d]	0,000	0,266	0,053	0,396	132,42	2824,3	31,01
Ładunek na poligonie [kg/d]	0,038	0,611	0,000	0,293	182,96	3606,6	41,01
Zmiana [kg/d]	+0,038	+0,345	-0,053	-0,103	+50,54	+782,3	+10,00

azotu mineralnego świadczy o oddziaływaniu świeżych i bliskich ognisk zanieczyszczeń, to można wskazać jako przyczynę zanieczyszczenia wód tamtejszą zabudowę mieszkaniową (rys. 2) i praktykę rozsączania ścieków bytowych poprzez przydomowe „oczyszczalnie ścieków”.

Na stan silnego bieżącego obciążenia Strugi Dobieszkowskiej zanieczyszczeniami wskazuje porównanie ładunków niesionych ciekami w miesiącu suchym (maj 2023) z ładunkami wyznaczonymi dla miesiąca mokrego (maj 2010) – tabela 7. Gdyby bieżący przepływ sięgnął archiwalnego, to przy wykazanym aktualnie poziomie stężeń zanieczyszczeń ładunki winny wzrosnąć o 230%. Porównanie aktualnego stanu obciążenia Moszczenicy i Strugi Dobieszkowskiej (poligon H) ładunkami zanieczyszczeń spływających w maju roku mokrego i suchego (tab. 1 i tab. 7) wykazuje, że niezależnie od upływu czasu i różnych warunków hydrometeorologicznych, SD nadal prowadzi większe ładunki N-NO₃.

Odniesienie bieżących wyników badań źródeł w dolinie Strugi Dobieszkowskiej do danych hydrochemicznych z lat wcześniejszych (rys. 4 i tab. 5) wskazuje, że pod względem stężeń jonu chlorkowego i azotu azotanowego sytuacja w grupie wypływów środkowych i dolnych (rys. 1) na obszarze rezerwatu nie uległa pogorszeniu.

6. Wnioski

Badania wód w dolinie Strugi Dobieszkowskiej przeprowadzono w ciągu jednego dnia, dla uchwycenia chwilowego stanu hydrochemicznego w zakresie wybranych wskaźników zanieczyszczenia. Równoczesne badanie wód rzecznych, źródłanych i hyporeicznych stworzyło możliwość porównania trzech bezpośrednio ze sobą sąsiadujących środowisk wodnych. Wykazano, że:

1. Wody hyporeiczne istotnie różnią się od wód rzecznych i źródłanych *in minus* pod względem: odczynu wód, potencjału redoks, tlenu rozpuszczonego i N-NO₃ oraz *in plus* w przypadku: N-NH₄ i P-PO₄.
2. Najwyższe wartości miar zasolenia (PEW, sm i Cl⁻) i wskaźników biogennych (N-NH₄, N-NO₃, P-PO₄) wystąpiły w wodach hyporeicznych. Jest więc to środowisko najbardziej narażone na zanieczyszczenie na badanym obszarze.

3. Aktualny stan zanieczyszczenia wód źródłanych pod względem stężeń chlorków i azotu azotanowego można uznać na podstawie danych historycznych za stały i pod względem zakresów wartości badanych wskaźników zbliżony do bieżącego stanu wód rzecznych SD – za wyjątkiem azotu amonowego, którego w wodach źródłanych nie stwierdzono.

4. Bieżący stan zanieczyszczenia wód rzecznych Strugi Dobieszkowskiej, uznanych na podstawie danych z 2010 r. za wody eutroficzne, uległ pogorszeniu pod względem stężenia azotu azotanowego oraz substancji mineralnych i chlorków, co przekłada się na wyraźną większą ilość tych substancji niesionych w odcinku ujściowym Strugi Dobieszkowskiej w stosunku do Moszczenicy. Największy jednostkowy ładunek zanieczyszczeń stwierdzono jednak nie w ujściu, a w poligonie leżącym we wsi Ługi. Tutaj też stężenia sm, Cl⁻ i N-NO₃ w strefie hyporeicznej były największe, co przy zmierzonym dodatnim VHГ przełożyło się na wyraźny przyrost ładunków tych zanieczyszczeń w korycie SD. Udokumentowano więc oddziaływanie przydomowych ognisk zanieczyszczeń na wody cieku poprzez jego strefę hyporeiczną. Ten przypadek wskazuje, że dla oceny jakości wód powierzchniowych ważna jest identyfikacja stanu hydrochemicznego wód hyporeicznych i wielkości gradientów. W przypadku SD okazało się, że przewaga przypadków dodatniego VHГ sprzyja przenikaniu wód hyporeicznych do koryta rzecznoego wraz z zawartą w nich dużą ilością zanieczyszczeń.

5. Stwierdzona na badanym obszarze mozaikowość zanieczyszczeń ogranicza możliwość obliczenia udziału wód rzecznych w strefie hyporeicznej na podstawie kryterium hydrochemicznego; spośród ośmiu badanych poligonów wykazano to tylko dla trzech z nich.

Badania strefy hyporeicznej powinny stanowić uzupełnienie hydrochemicznych prac badawczych wód podziemnych i powierzchniowych z tego powodu, że stwarzają możliwość identyfikacji stref skoncentrowanego dopływu zanieczyszczeń do koryt rzecznych. Na takich odcinkach rzek należy koncentrować działania (hydrotechniczne, hydrobiologiczne) dla zapobieganiu dalszej migracji zanieczyszczeń, m.in. biogenów do zbiorników retencyjnych.

Przy ograniczonych możliwościach rzeczywistej identyfikacji antropogenicznych ognisk zanieczyszczeń w zlewni, dzięki obserwacjom strefy hyporeicznej uzyskujemy efektywne narzędzie kontroli stanu hydrochemicznego wód podziemnych na ich styku (mieszania) z wodami powierzchniowymi, czyli w środowisku zasadniczo pomijanym w systemach monitoringu krajowego.

7. Literatura

- Battin, T.J., Kaplan, L.A., Newbold, J.D., Hendricks, S.P., 2003. A mixing model analysis of stream solute dynamics and the contribution of a hyporheic zone to ecosystem function. *Freshwater Biology* 48: 995–1014.
- Biksey, T.M., Gross, E.D., 2001. The Hyporheic Zone: Linking Groundwater and Surface Water – Understanding the Paradigm. *Remediation* (Winter 2001): 55–62.
- Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski. Maj 2023, 2023. IMGW-PIB.
- Biuletyn Państwowej Służby Meteorologiczno-Hydrologicznej. Rok 2022, 2022. 13/254. IMGW-PIB.
- Boano, F., Harvey, J.W., Marion, A., Packman, A.I., Revelli, R., Ridolfi, L., Wörman, A., 2014. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Reviews of Geophysics* 52: 603–679.
- Burchard, J., Mela, S., 1995. Ilościowa i jakościowa charakterystyka wód źródłanych strefy krawędziowej Wzniesień Łódzkich, [w:] *Materiały VIII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Chemizm opadów atmosferycznych, wód powierzchniowych i podziemnych”*, Łódź, 14–16.IX.1995, Łódź, 59–61.
- Burchard, J., Ziulkiewicz, M., 2002. Zagrożenie i ochrona jakości wód podziemnych i źródłanych w środkowej Polsce, [w:] *Materiały Zjazdu PTG, tom II*, Łódź.
- Gooseff, M.N., 2010. Defining Hyporheic Zones – Advancing Our Conceptual and Operational Definitions of Where Stream Water and Groundwater Meet. *Geography Compass* 4/8: 945–955.
- Gulke, R., 2022. Wymiana wód powierzchniowych i podziemnych w korcie północnego ramienia Strugi Dobieszkowskiej. *Praca magisterska*, WNG UŁ.
- Harvey, J.W., Gomez-Velez, J., Schmad, N., Scott, D., Boyer, E., Alexander, R., Eng, K., Golden, H., Kettner, A., Konrad, Ch., Moore, R., Pizzuto, J., Schwarz, G., Soulsby, Ch., Choi, J., 2019. How Hydrologic Connectivity Regulates Water Quality in River Corridors. *Journal of the American Water Resources Association* 55 (2): 369–381.
- Hereźniak-Ciotowa, U., Ziulkiewicz, M., 1997. Chemizm wód źródłanych Strugi Dobieszkowskiej (Młynówki). *Acta Universitatis Lodzensis. Folia Geographica Physica* 2: 169–177.
- Hill, A.R., Labadia, C.F., Sanmugas, K., 1998. Hyporheic zone hydrology and nitrogen dynamics in relation to the streambed topography of a N-rich stream. *Biogeochemistry* 42: 285–310.
- Ilnicki, P., Górecki, K., Melcer, B., 2008. *Eutrofizacja cieków wodnych zlewni Warty w latach 1992–2002*. Poznań: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.
- Interpretacja oceny jakości wód powierzchniowych zasilających zbiornik retencyjny na rzece Moszczonicy w Strykowie, 2020. Docplayer.pl. http://oldbip.strykow.pl/archiwum.strykow.pl/zalaczniki/3768/Ocena_jakosci_wod_Interpretacja.pdf
- Jokiel, P., 2004. *Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku*. Wydawnictwo UŁ, Łódź.
- Kamiński, J., 1993. Późnoplejstocenska i holocenska transformacja doliny Moszczonicy jako rezultat zmian środowiska naturalnego oraz działalności człowieka. *Acta Geographica Lodzienia* 64.
- Kąpać się czy nie kąpać, czyli jakość wód cieków spod Borchówki w świetle wyników badań hydrochemicznych i hydrobiologicznych, 2022. Arch. KGiG UŁ.
- Krause, S., Abbott, B.W., Baranov, V., Bernal, S., Blaen, P., Datry, T., 2022. Organizational Principles of Hyporheic Exchange Flow and Biogeochemical Cycling in River Networks Across Scales. *Water Resources Research* 58. <https://doi.org/10.1029/2021WR029771>
- Lewandowski, J., Arnon, S., Banks, E., Batelaan, O., Betterle, A., Broecker, T., Coll, C., Drummond, J.D., Gaona Garcia, J., Galloway, J., Gomez-Velez, J., Grabowski, R.C., Herzog, S.P., Hinkelmann, R., Höhne, A., Hollender, J., Horn, M.A., Jaeger, A., Krause, S., Prats, A.L., Magliozzi, C., Meinikmann, K., Babak Mojarrad, B., Mueller, B.M., Peralta-Maraver, I., Popp, A.L., Posselt, M., Putschew, A., Radke, M., Raza, M., Riml, J., Robertson, A., Rutere, C., Schaper, J.L., Schirmer, M., Schulz, H., Shanafield, M., Singh, T., Ward, A.S., Wolke, P., Wörman, A., Wu, L., 2019. Is the Hyporheic Zone Relevant beyond the Scientific Community? *Water* 11: 2230.
- Maksymiuk, Z., Mela, S., 1995. Źródła Polski Środkowej. *Acta Universitatis Lodzensis. Folia Geographica* 20: 109–119.
- Malard, F., 2003. Groundwater-surface water interactions, [w:] *Ecology of a Glacial Flood Plain*. Springer Netherlands: 37–56.
- Marciniak, M., Chudziak, Ł., 2015. A new method of measuring the hydraulic conductivity of the bottom sediment. *Przegląd Geologiczny* 63, 10/2: 919–925.
- Marciniak, M., Ziulkiewicz, M., Górecki, M., 2022. Variability of water exchange in the hyporheic zone of a lowland river in Poland based on gradientometric studies. *Quaestiones Geographicae* 41(3): 143–158.
- Moniewski, P., 2004. Źródła okolic Łodzi. *Acta Geographica Lodzienia* 87, ŁTN, Łódź.
- Naranjo, R.C., Pohl, G., Niswonger, R.G., Stone, M., McKay, A., 2013. Using heat as a tracer to estimate spatially distributed mean residence times in the hyporheic zone of a riffle-pool sequence. *Water Resources Research* 49: 3697–3711.
- Nowicka-Krawczyk, P., Żelazna-Wieczorek, J., Skrobek, I., Ziulkiewicz, M., Adamski, M., Kamiński, A., Żmudzki, P., 2022. Persistent Cyanobacteria Blooms in Artificial Water Bodies – An Effect of Environmental Conditions or the Result of Anthropogenic Change. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19: 6990.
- Pazdro, Z., Kozerski, B., 1990. *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Raport z oceny stanu Jednolitych Części Wód Podziemnych. Monitoring stanu chemicznego oraz ocena stanu jednolitych części wód podziemnych w dorzeczu w latach 2018–2021, 2020.
- Transformation Mechanisms of Major Nutrients and Metals in Wetlands, 2008, [w:] *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. Environmental Pollution, Dordrecht, Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2_2
- Triska, F.T., Kennedy, V.C., Avanzino, R.J., Zellweger, G.W., Bencala, K.E., 1989. Retention and transport of nutrients in a third-order stream in northwestern California. Hyporheic processes. *Ecology* 70: 1893–1905.
- Walisch, M., 2003. Wpływ warunków fizykogeograficznych na obieg wody w małych zlewniach regionu łódzkiego. *Praca doktorska* UŁ.
- Wieczorek, K., Turek, A., Szczesio, M., Wolf, W.M., 2024. A holistic approach to the spatio-temporal variability investigation of the main river water quality – The importance of tributaries. *Science of Total Environment* 906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167588>
- Wondzell, S.M., 2011. The role of the hyporheic zone across stream networks. *Hydrological Processes* 25: 3525–3532.
- Ziulkiewicz, M., 2001. Azotany w wodach źródłanych Parku Krajobrazowego Wzniesień Łódzkich. *Przyroda Polski Środkowej* 4: 16–18.
- Ziulkiewicz, M., 2012. Jakość wód powierzchniowych w strefie podmiejskiej Łodzi na przykładzie Moszczonicy. *Gospodarka Wodna* 12: 510–520.
- Ziulkiewicz, M., 2016. Hydrogeochemiczne aspekty funkcjonowania źródeł w strefie krawędziowej Wzniesień Łódzkich. *Bogucki Wydawnictwo Naukowe*, Poznań.
- Ziulkiewicz, M., 2022. Salinization of the Moszczonica river's hyporheic zone in the vicinity of the Rogóźno salt dome. *Acta Geographica Lodzienia* 112: 163–184.

- Ziulkiewicz, M., Fortuniak, A., Górecki, M., Grzędzińska, S., Małecka, B., Waack-Zajac, A., 2016. Zdjęcie hydrochemiczne rzeki miejskiej na przykładzie Olechówki. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN* 39: 279–291.
- Ziulkiewicz, M., Grulke, R., Gajda, N., 2021. Identyfikacja dopływu substancji biogennych ze strefy hyporeicznej do koryta cieków źródłiskowego na obszarze podmiejskim, [w:] Czerniawski, R., Bilski, P. (red.), *Funkcjonowanie i ochrona wód płynących*, Szczecin, 263–281.
- Ziulkiewicz, M., Żelazna-Wieczorek, J., 2007. Wpływ warunków hydrogeologicznych na florę okrzemkową źródeł w strefie krawędziowej Wzniesień Łódzkich, [w:] *Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce*. Wydawnictwo UŁ, Łódź, 295–313.
- Żelazna-Wieczorek, J., Sochacka, A., Ziulkiewicz, M., 2010. Zróżnicowanie zbiorowisk okrzemek w źródłach rezerwatu Struga Dobieszkowska, [w:] *Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce*. Wydawnictwo UŁ, Łódź, 169–179.
- Żelazna-Wieczorek, J., Ziulkiewicz, M., 2007. Okrzemki bentosowe źródła Dobieszków na tle warunków siedliskowych, [w:] Jokieli, P., Moniewski, P., Ziulkiewicz, M. (red.), *Źródła Polski. Wybrane problemy krenologiczne*. Łódź, 265–279.