

PODWODNE PRZEJAWY DENUDACJI CHEMICZNEJ WYSADU SOLNEGO ROGÓŻNO NA PRZYKŁADZIE FRAGMENTU KORYTA MOSZCZENICY W GIECZNO (POWIAT ZGIERSKI)

Underwater chemical denudation expressions of the Rogóžno salt dome on the example of the Moszczenica riverbed stretch in Gieczno

MACIEJ ZIUŁKIEWICZ¹ 

Zarys treści. Materiał przedstawia wyniki badań zasolenia strefy hyporeicznej Moszczenicy na odcinku, w jakim przepływa ona ponad wysadem solnym Rogóžno. Historia gospodarcza okolic Gieczna i Rogóžno nie wskazuje na istnienie tradycji wżenia soli, co pozwala przyjąć, że zasolenie geogeniczne, będące świadectwem ługowania ciała solnego oraz denudacji czapy gipsowej, ujawniło się w XX wieku w wyniku poszukiwawczych prac geologicznych. Fakt obecności zasolonych wód bezpośrednio pod korytem rzeczonym tworzy sprzyjający poligon obserwacji relacji, jakie zachodzą pomiędzy wodami rzeczonymi, hyporeicznymi i podziemnymi w warunkach dostępności jonu chlorkowego w szerokim spektrum stężeń. Roczne badania nie wykazały czytelnego związku pomiędzy zmiennością warunków hydrologicznych i hydrogeologicznych a stanem strefy hyporeicznej. Dały jednak podstawę do wydzielenia w badanym fragmencie dna koryta rzeczowego dwóch stref, w różny sposób reagujących na dopływ zasolonych wód wgłębnych. Przyjęto, że za zasolenie środowiska wokół korytowego odpowiada ascenja zasolonych wód wokółwysadowych z utworów jurajskich.

Słowa kluczowe: zasolenie geogeniczne, strefa hyporeiczna, wody hyporeiczne

Abstract. The article presents the results of a study of salinity in the Moszczenica hyporheic zone in the stretch over the Rogóžno salt dome and a review of research hypotheses intended to explain the cause of this peculiar geochemical phenomenon. The economic history of the Rogóžno-Gieczno area does not indicate the existence of a tradition of salt extraction. These allows us to assume that geogenic salinity, which is evidence of leaching of the salt body and denudation of the gypsum cap, was revealed in the 20th century as a result of geological exploration works. The fact of the presence of saline waters in the immediate vicinity of the riverbed creates a favourable research area for investigating the relations between river and hyporheic waters in the special conditions of wide availability of the chloride ion as the indicator element in the aquatic environment. Annual research did not show a clear relationship between the variability of hydrological and hydrogeological conditions and the condition of the hyporheic zone. However, its provided the basis for distinguishing two zones in the examined part of the riverbed bottom that responded differently to the inflow of saline deep waters. It was assumed that the salinity of the environment around the riverbed was caused by the ascension of saline water from the Jurassic formations which abut to the salt diapir.

Key words: geogenic salinity, hyporheic zone, hyporheic waters

Wprowadzenie

Podpływy słonych wód podziemnych i ich wykorzystywanie znane są na obszarze środkowej Polski od czasów pierwszych osiadłych kultur (Bukowski 1963; Jodłowski 1977). Lokalna tradycja solnictwa zapisała się w nazwach miejscowości, które mają bardzo stare datowania pierwszych wzmianek w pisanych źródłach historycznych. Na

obszarze badań tego typu tradycja jednak nie występuje. Pomimo bogatej historii gospodarczej (Kamiński 1993), nie ma w niej świadectw solnictwa pradziejowego. Wzmiankowane przez Jaworskiego (1964) miejsca występowania solnisk i roślin słonolubnych były skutkiem szeroko zakrojonych poszukiwawczych prac geologicznych. Prowadzono je w latach 1949–1953 celem rozpoznania i udokumentowania złoża soli kamiennej

¹ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geologii i Geomorfologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: maciej.ziulkiewicz@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-9196-845X

w diapiarze Rogóžno, przebijającym nadkład utworów mezozoicznych (Dębski i in. 1963; Jaworski 1964). Zaburzone w wyniku tych prac lokalne warunki hydrogeologiczne sprawiają, że wody słone występują w rejonie Gieczna płytko pod powierzchnią, już w pierwszym poziomie o zwierciadle swobodnym (Meszczyński, Szczerbicka 2002). Po dłuższej osi konturu diapiaru przebiega współczesne koryto Moszczenicy drenującej zasoby wód podziemnych, przez co należy zakładać, że rzeka może odbierać z podziemia, poza wodami gruntowymi, również zasolone wody wgłębne. Obserwacje pionowych gradientów hydraulicznych (VHG) pomiędzy strefą hyporeiczną (HZ) i korytem Moszczenicy wykazały, iż w dnie rzeki może następować *upwelling* wód wgłębnych (Marciniak i in. 2022; Ziulkiewicz 2022). Badania hydrochemiczne przeprowadzone w następnej kolejności wykazały obecność bezpośrednio pod dnem rzeki wód zasolonych, które nie mają swojej reprezentacji w dostępnych do badań otworach studziennych sięgających wód podziemnych w strefie nadwysadowej i wokółwysadowej (Ziulkiewicz, Długosz-Lisiecka 2023). Aktualnie nie sposób jednoznacznie wskazać środowiska hydrogeologicznego odpowiadającego za zasolenie strefy hyporeicznej Moszczenicy w rejonie Gieczna.

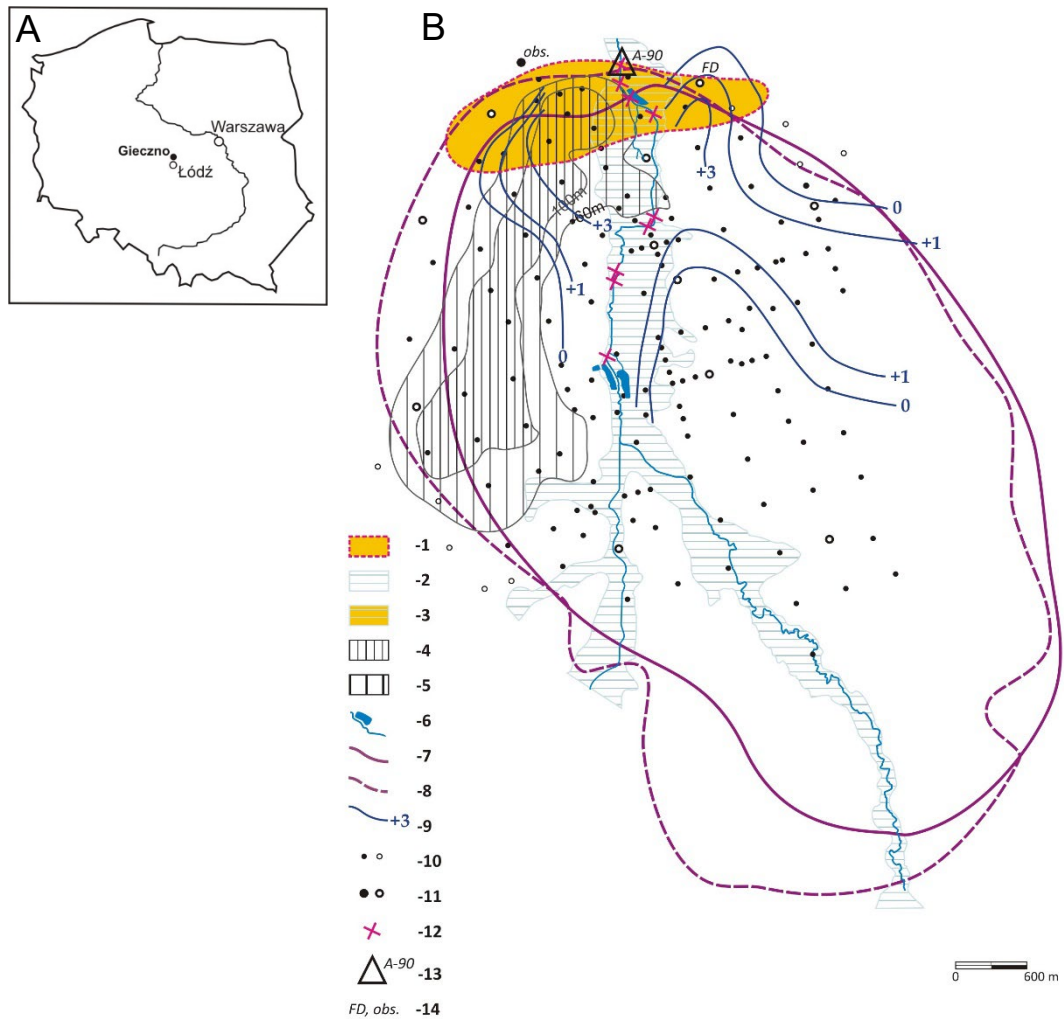
Celem badań jest identyfikacja stanu strefy hyporeicznej rzeki, wyrażonego poprzez wielkości i kierunki gradientów hydraulicznych oraz skalę zasolenia geogenicznego, w powiązaniu z warunkami hydrologicznymi Moszczenicy i stanów zwierciadła wód gruntowych w dnie doliny na podstawie rocznych obserwacji. Według Boano i in. (2014) zrozumienie dynamicznego zachowania wymiany hyporeicznej, stymulowanej przez czasowe zmiany warunków przepływu w strumieniu i stanów wód gruntowych, jest jednym z najważniejszych kierunków współczesnych badań strefy hyporeicznej.

Geologiczna i hydrogeologiczna charakterystyka obszaru badań

W regionie łódzkim istnieje gęsta sieć struktur halokinetycznych (Sokołowski 1966), z czego najważniejszą pełni strefa Gopło-Ponętów-Pabianice (Skorupa, Dziewińska 1976). Rozwinięty na niej ciąg diapiarów, jako strefa antyklinalna, wyodrębnia z synklinorium mogileńsko-łódzkiego jej północno-wschodnią zatokę – tak zwaną małą nieckę łódzką (Ziulkiewicz 2003). W jej północnej krawędzi na granicy z odcinkiem kutnowskim

wału kujawskiego rozwinął się diapiir solny Rogóžno, który jako jedyny w regionie przebił się przez nadkład miększych utworów mezozoicznych. Jest to drugi pod względem wielkości wysad solny w kraju (Czapowski, Tarkowski 2018). Ciało solne znalazło się w zasięgu strefy aktywnego krążenia wód podziemnych i zostało poddane, poprzez subrozję, silnemu ługowaniu. Powstałe roztwory solne mogły przemieszczać się wzdłuż uskoków i nieciągłości sedymentacyjnych. W efekcie wylugowania około 138 km³ soli powstała czapa iłowo-gipsowa o objętości 3,93 km³ (Małecki, Ziulkiewicz 2019). Czapa wysadu o miąższości od 13 m do 286 m zalega na głębokościach od 55 m do 329 m, przy czym w części północnej jest ona wyraźnie cieńsza niż w części południowej. Serię solną cechsztynu nawiercono na głębokościach od 321 m do 427 m, jej miąższość jest większa niż 200 m, a spąg nie został rozpoznany (Czapowski, Tarkowski 2018). Czapa diapiaru jest silnie zdyslokowana w efekcie aktywnej halokinetyki i zjawiska krasowienia siarczanowego. Świadczy o tym silna deformacja nadkładu utworów paleogeńskich i neogeńskich (Hycnar, Ratajczak 2019) oraz glin plejstocenijskich (Kamiński 1993). Paleogen i neogen w nadkładzie diapiaru budują ropy (zawęglone), muły, piaski kwarcowe (zawęglone), a także pokłady węgla brunatnego otoczone ropy. Grubość osadów trzeciorzędowych jest zmienna, co jest efektem obecności szeregu wymyć w stropie wysadu, które wypełniają między innymi utwory mioceńskie. W takich miejscach ich miąższość dochodzi do 250 m. W rezultacie krasowienia siarczanowego czapy następuje powolne i równomierne obniżanie się powierzchni depozycyjnej wysadu. Połodowcowe utwory czwartorzędowe zalegają do głębokości 170 m p.p.t., mają miąższość od 22 m do 60 m, stanowią je głównie piaski i żwiry, muły i ropy oraz gliny zwałowe (Dębski i in. 1963). Interakcja pomiędzy ropy a diapirem solnym pozostawiła zapis w ilości poziomów glin morenowych, jakie znajdują się w nadkładzie wysadu. Stwierdzono obecność czterech poziomów, podczas gdy w jego najbliższym otoczeniu, poza konturem wysadu, tylko jednego (Jewtuchowicz 1967). Świadectwem współdziałania ropy a diapiaru może być także rynna egzarycyjna, głęboko wcięta w utwory neogeńskie (rys. 1) (Ziulkiewicz 2022), rozpoznana w czasie prac poszukiwawczych (Dębski i in. 1963).

Degradacja czapy diapiaru doprowadziła w centralnej części nadkładu do wytworzenia podłużnej zakłębłości, która zdeterminowała przebieg koryta Moszczenicy wzdłuż osi podłużnej



Rys. 1. Lokalizacja stanowiska badawczego na tle kraju (A) i przestrzennej reprezentacji wybranych czynników geologicznych nadkładu wysadu solnego Rogóžno (B)

- 1 – zasięg strefy zasolenia, gdzie stężenie chlorków przekracza normę dla wód pitnych w wodach podziemnych utworów czwartorzędowych (Meszczczyński, Szczerbicka 2002), 2 – dno doliny Moszczenicy, 3 – dno doliny w strefie zasolenia wód gruntowych, 4 – zasięg formy egzoracyjnej wykształconej w utworach neogénskich o przegłębieniu przekraczającym 100 m względem stropu utworów trzeciorzędowych (Dębski i in. 1963), 5 – jw. o przegłębieniu przekraczającym 60 m (*ibidem*), 6 – ciek i zbiorniki wodne, 7 – podkenozoiczny zasięg ciała solnego wysadu Rogóžno (Dębski i in. 1963), 8 – podkenozoiczny zasięg czapy iłowo-gipsowej wysadu Rogóžno (*ibidem*), 9 – izolinie wysokości w metrach, na jakiej stabilizuje się zwierciadło wód artezyjskich z utworów neogénskich (Górecki, Ziulkiewicz 2016), 10 – odpowiednio: poszukiwawcze otwory wiertnicze ze stwierdzoną czapą iłowo-gipsową i bez utworów czapy (Dębski i in. 1963), 11 – odpowiednio: studnia obserwacyjna i dawne badawcze otwory hydrogeologiczne (*ibidem*), 12 – miejsca stwierdzonego wysokiego PEW i stężenia chlorków w strefie hyporeicznej Moszczenicy (Kaźmierczak i in. 2024), 13 – poligon badawczy, 14 – oznaczenia wybranych studni

Location of the research site on the background of the country (A) and spatial representation of selected geological factors of the overburden of the Rogóžno salt dome (B)

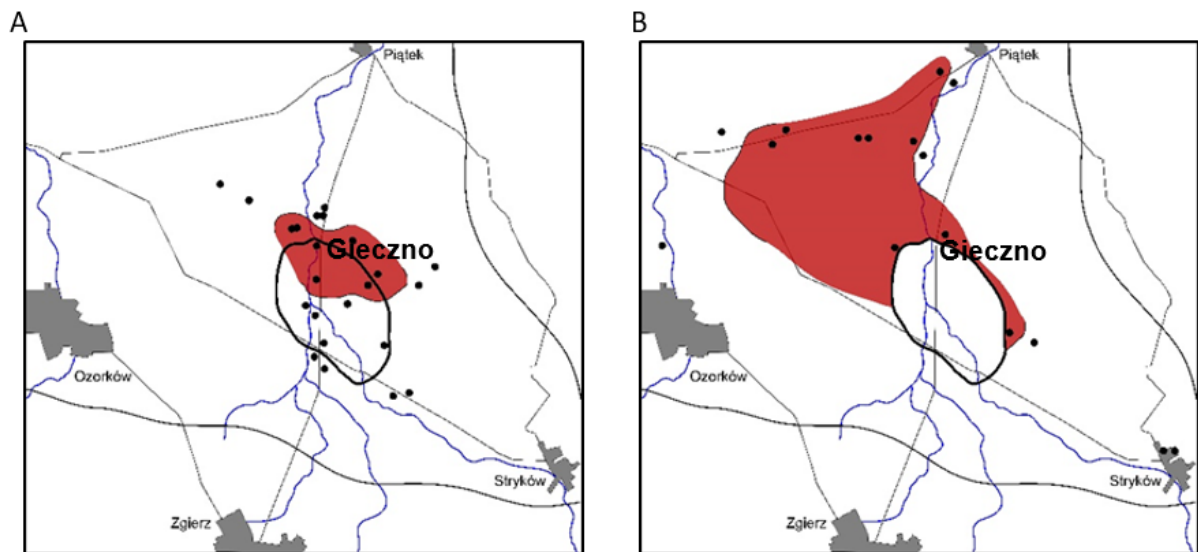
- 1 – the extent of the salinity zone, where the concentration of chlorides exceeds the standard for drinking waters in groundwater of Quaternary formations (Meszczczyński, Szczerbicka 2002), 2 – the bottom of the Moszczenica valley, 3 – the bottom of the valley in the groundwater salinity zone, 4 – the extent of the exoratory form developed in Neogene formations with a depth exceeding 100 m in relation to the top of the Tertiary formations (Dębski *et al.* 1963), 5 – as above. with a depth exceeding 60 m (*ibidem*), 6 – watercourses and reservoirs, 7 – sub-Cenozoic extent of the salt body of the Rogóžno diapir (Dębski *et al.* 1963), 8 – sub-Cenozoic extent of the clay-gypsum cap rocks of the Rogóžno diapir (*ibidem*), 9 – height isolines in meters at which the artesian water table of Neogene formations stabilizes (Górecki, Ziulkiewicz 2016), 10 – respectively: exploration boreholes with and without a clay-gypsum cap rocks (Dębski *et al.* 1963), 11 – respectively: well observation site and former hydrogeological research wells (*ibidem*), 12 – places of high SEC and chloride concentrations found in the hyporeic zone of Moszczenica (Kaźmierczak *et al.* 2024), 13 – research site, 14 – markings of selected wells

konturu wysadu na długości nieco ponad 8 km (Kamiński 1993). Z dokumentacji złoża (Dębski i in. 1963) wynika, że dolina rzeczna rozwinęła się zasadniczo w nadkładzie utworów gipsowo-anhydritowych. Rzeka jest na tym odcinku bazą drenażu dla wód podziemnych występujących w utworach kenozoicznych i stropowych partiach skał mezozoicznych, wydzielonych w JCWPd nr 63 (PGI 2024). Spływ tych wód zasadniczo odbywa się w kierunku północno-zachodnim, w efekcie czego w strefie okołowysadowej tworzy się aureola zasolenia geogenicznego (rys. 2) (Górecki 2018).

W rejonie wysadu solnego Rogóźno funkcjonuje skomplikowany system krążenia wód podziemnych, który obejmuje łącznie pięć pięter wodonośnych: nadwysadowe piętra czwartorzędowe, neogeńskie i paleogeńskie, wokółwysadowe piętro mezozoiczne i piętro cechsztyńskie w czapie wysadu (Bieniewski 1962; Dębski i in. 1963). Silne zasolenie wód pojawia się w piętrze neogeńskim w warstwie wodonośnej piasków zawartych

między pokładami węgla brunatnego. Mineralizacja ogólna przekracza 9 g/L, a stężenie chlorków sięga 4,3 g/L (Bank HYDRO za Ziulkiewicz 2022). W piętrze cechsztyńskim w pustkach skalnych i rumoszu czapy gipsowej mineralizacja wód przekracza 30 g/L, a stężenie chlorków sięga 9,2 g/L (*ibidem*). Część nadwysadowych środowisk wodnych rozpoznanych otworowo zawiera wody subartezyjskie, jednak są środowiska, gdzie wody znajdują się pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym, które wyprowadza zwierciadło na 3 m ponad powierzchnię terenu (rys. 1) (Górecki, Ziulkiewicz 2016).

W takich warunkach geologicznych w latach 1949–1953 przeprowadzono rozpoznanie i udokumentowanie zasobowe złoża solnego na bazie gęstej siatki otworów wiertniczych sięgających utworów cechsztyńskich (Dębski i in. 1963). Wiele z nich zlokalizowano w dolinie Moszczenicy (rys. 1), część w bezpośredniej bliskości koryta rzeczno-



Rys. 2. Wynik PCA wód podziemnych w utworach czwartorzędowych (A) i jurajskich (B) z rejonu diapiru solnego Rogóźno

Wyróżniono obszar, na którym pierwsza składowa główna – reprezentująca zasolenie wód podziemnych – uzyskała wartości dodatnie (Górecki 2018); czarne punkty oznaczają studnie, których dane hydrochemiczne uwzględniono w analizie statystycznej

PCA results of groundwater in Quaternary (A) and Jurassic (B) formations from the Rogóźno salt diapir area. Area was distinguished in which the first principal component – representing the salinity of groundwaters – obtained positive values (Górecki 2018); black points indicate wells whose hydrochemical data were included in the statistical analysis

Jaworski (1964) stwierdził występowanie solnisk w Giecznie i Rogóźnie z charakterystyczną dla takich środowisk roślinnością słonolubną. Przyznał jednocześnie, że: „Zjawisko to jest w większości obserwowanych przez autora przypadków związane z prowadzeniem licznych

prac wiertniczych. Wylewy płuczki lub wód zawierających chlorki, a także siarkowodor (zwłaszcza w czasie próbnych pompowań prowadzonych w hydrogeologicznych otworach badawczych) często powodują zamieranie flory. Może to być również przyczyną zachwiania naturalnego zas-

lenia, zwłaszcza wód powierzchniowych, oraz mimowolnego wprowadzenia zmian w krajobrazie tego obszaru” (Jaworski 1964, s. 149).

Współcześnie rejestrowane w dnie doliny Moszczenicy podwyższone wartości przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW) i stężenia jonu chlorkowego są spotykane miejscowo (Górecki, Ziułkiewicz 2016), a wody rzeczne na odcinku, w jakim przepływa ponad wysadem Rogóżno, nie wykazują przejawów zasolenia geogenicznego (Górecki 2017). Badania przeprowadzone w latach 2017–2018 w korycie Moszczenicy na wysokości Gieczna wykazały, że pomiędzy rzeką a aluwiami panują warunki sprzyjające intensywnej wymianie wody (Marciniak i in. 2022). Zwrócono przy tym uwagę na możliwość funkcjonowania ascenzyjnych dopływów wód wgłębnych, które to zjawisko Macioszczyk (1988) uznała, jako jeden z ważniejszych czynników determinujących chemizm wód rzecznych. Przeprowadzone w 2019 roku badania wód pobranych spod dna Moszczenicy wykazały obecność typów hydrochemicznych właściwych dla zasolenia geogenicznego oraz typów przejściowych, wskazujących na aktywne mieszanie wód podziemnych z rzeczny. Na tej podstawie określono udział zasolonych wód wgłębnych w HZ na 18–23% (Ziułkiewicz 2022). Odcinek koryta, w którym rozpoznano tę osobliwość hydrochemiczną, znajduje się w obrębie strefy zasolenia wydzielonej przez Meszczyńskiego i Szczerbicką (2002) (rys. 1) oraz przez Góreckiego (2018) (rys. 2). Szczegółowe kartowanie dna rzeki na odcinku „ponadwysadowym” na odcinku Gieczno-Wola Rogozińska wykazało istnienie również innych takich stref, choć ze słabszym efektem zasolenia strefy hyporeicznej (rys. 1) (Kaźmierczak i in. 2024).

Metody badań

Dla zrealizowania przyjętego celu badawczego podjęto następujący zakres prac:

1. pomiary VHG w siatce punktów badawczych rozmieszczonych w profilu poprzecznym koryta Moszczenicy A-90 (rys. 1);
2. pobór prób z HZ dla dokonania pomiaru PEW i oznaczenia stężenia jonu chlorkowego w tych samych punktach co pomiary VHG;
3. pomiar PEW i pobór prób dla oznaczenia stężenia jonu chlorkowego w wodzie rzecznej,

jako reprezentacji pierwszego elementu końcowego mieszania wód w strefie hyporeicznej;

4. rejestrację stanu wody w rzece na posterunku IMGW na Moszczenicy w Giecznie;
5. rejestrację stanu wody w studni obserwacyjnej wód gruntowych w Wypychowie (objaśnienia na rys. 1).

Pomiary VHG i pobór prób wody dokonano za pomocą gradientometru (Marciniak, Chudziak 2015) w punktach oddalonych co 1 m, poczynając od lewego brzegu Moszczenicy wzdłuż profilu badawczego A-90², w którym stwierdzono silny *upwelling* – najwyższy poziom zasolenia geogenicznego i jednocześnie największy udział wód wgłębnych w HZ Moszczenicy (Ziułkiewicz 2022). Pomiary PEW wykonano konduktometrem CPC-411 z kalibracją elektrody w roztworach wzorcowych 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Stężenia chlorków oznaczono w laboratorium Katedry Geologii i Geomorfologii Uniwersytetu Łódzkiego metodą Mohra (PN-ISO 9297).

Definicja geochemiczna strefy hyporeicznej podaje, że jest ona strefą mieszania się wód powierzchniowych i głębokich wód podziemnych z warunkami pośrednimi między tymi elementami końcowymi (Gooseff 2010). Dla obliczenia udziału wód rzecznych w mieszaninie wód występujących pod dnem rzeki wykorzystano odpowiednio przekształcony wzór podany przez Battina i in. (2003):

$$C_{10} = x \cdot C_{\text{SW}} + (1 - x) \cdot C_{\text{GW}} \quad (1)$$

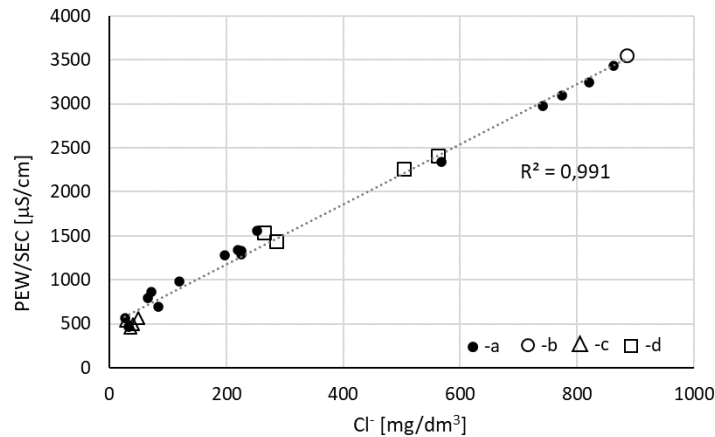
gdzie:

C_{10} – stężenie jonu wskaźnikowego w wodzie z głębokości 10 cm pod dnem rzeki³ [mg/dm^3];
 C_{SW} – jw. w wodzie rzecznej stanowiącej pierwszy element końcowy mieszania [mg/dm^3];
 C_{GW} – jw. w wodzie podziemnej stanowiącej drugi element końcowy mieszania [mg/dm^3].

Jako jon wskaźnikowy przyjęto w obliczeniach jon chlorkowy. Z uwagi na okoliczność, że zasolenie HZ w profilu badawczym A-90 przekraczało stężenia chlorków we wszystkich dostępnych do badań otworach studziennych sięgających wód podziemnych w strefie nadwysadowej i wokółwysadowej (Ziułkiewicz 2022), przyjęto że podziemny element końcowy mieszania w strefie hyporeicznej będzie reprezentowała woda pozyskana do badań przez Góreckiego i Ziułkiewicza (2016) z nieczynnego otworu studziennego w Giecznie (oznaczenie FD na rys. 1) sięgającego wokółwysadowych partii wodonośca jurajskiego.

² Charakterystykę poligonu badawczego HZ Moszczenicy w Giecznie, w tym dokładną lokalizację profilu A-90, zawiera praca Ziułkiewicza (2022)

³ Konstrukcja gradientometru umożliwia pobór z większej głębokości, to jest 20 cm



Rys. 3. Linia mieszania wód rzecznych Moszczenicy z wodami wokółwysadowymi, ujętymi nieczynnym otworem studziennym w Giecznie (wg Góreckiego, Ziulkiewicza 2016)
 a – wody hyporeiczne, b – wody wgłębne z utworów jurajskich, c – wody rzeczne Moszczenicy,
 d – wody gruntowe ujęte piezometrami P-2 i P-3

The mixing line of the Moszczenica river waters with the deep groundwaters from the Jurassic formations which abuted with the salt dome, intaked by a closed well in Gieczno (according to Górecki, Ziulkiewicz 2016)
 a – hyporheic waters, b – deep groundwaters from the Jurassic formations, c – river waters of the Moszczenica,
 d – groundwaters captured by piezometers P-2 and P-3

Według Hoopera (2001) elementy końcowe muszą wykazywać stężenia ograniczające obserwowany skład chemiczny strumienia, muszą charakteryzować się mniejszą zmiennością niż skład chemiczny strumienia i różnić się pod względem hydrochemicznym od innych elementów końcowych. Poza nierozpoznaną zmiennością, pozostałe kryteria woda wgłębna ze studni w Giecznie wydaje się spełniać. Potwierdza to graficzna weryfikacja w formie linii mieszania wód wgłębnych z wodami rzeczными Moszczenicy (rys. 3). Na linii pomiędzy tymi elementami końcowymi rozmieszczone są punkty reprezentujące wody hyporeiczne (wg danych Ziulkiewicza 2022, Ziulkiewicza i Długosz-Lisieckiej 2023) i gruntowe z nowych piezometrów badawczych. Według Hoopera (2003) konserwatywne mieszanie składników końcowych przy stałym (mało zmiennym) stężeniu jest właśnie procesem liniowym.

Pomiary i badania realizowano raz w miesiącu, za wyjątkiem czerwca, kiedy przeprowadzono je dwukrotnie, i lipca, gdy badań nie wykonano. Prace trwały od marca 2023 roku do marca 2024 roku.

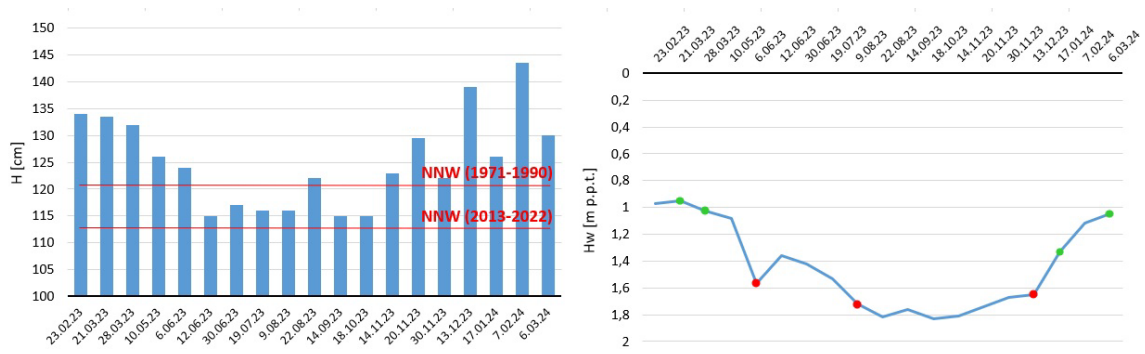
Wyniki badań

Stany wody Moszczenicy zmieniały się w czasie prowadzenia obserwacji od najwyższych w sezonie jesienno-zimowym do najniższych latem 2023 roku (rys. 4A), przy czym były to stany niż-

sze od NNW z wielolecia 1971–1990 (wg Szczyńskiego 1995–1996) i o 3 cm wyższe od NNW z wielolecia 2013–2022 (IMGW 2024). W sierpniu 2023 roku wystąpił epizod przyboru stanu Moszczenicy, na który z niewielkim opóźnieniem zareagowały wody gruntowe w dnie doliny (rys. 4B). Zasadniczo stany wód gruntowych odpowiadały stanom wód rzecznych z około miesięczną inercją.

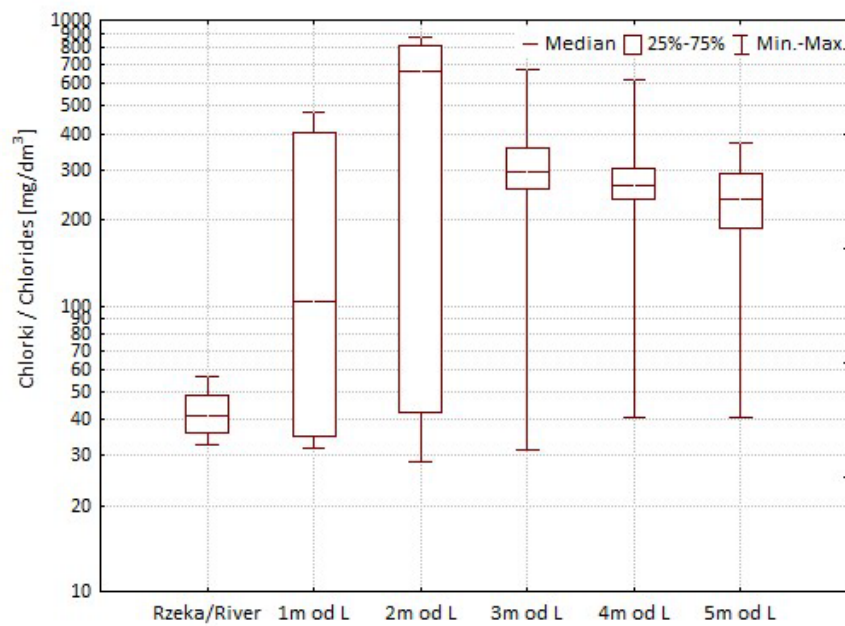
Stężenia jonu chlorkowego w wodach Moszczenicy oraz w próbkach pozyskanych spod jej dna w czasie badań w profilu A-90 zestawiono na Rysunku 5. Stężenia zmieniają się w szerokich granicach od 28 mg/dm³ do blisko 870 mg/dm³ i to w tym samym punkcie pomiarowym. Zakresy stężeń pomiędzy pierwszym i trzecim kwartylem wyraźnie różnicują punkty badawcze. Po lewej (zachodniej) stronie koryta zmiany stężeń są bardziej dynamiczne niż w części prawej (wschodniej) profilu badawczego.

Zmiany wielkości gradientu hydraulicznego w dnie Moszczenicy w profilu badawczym oraz udział wód wgłębnych w wodach hyporeicznych dla poszczególnych terminów badań zestawiono na Rysunku 6. W profilu pomiarowym realizują się bardzo różne scenariusze zmian VHG pomiędzy brzegami Moszczenicy. W marcu 2023 roku gradienty były bardzo niskie, wskazujące na równowagę ciśnień pomiędzy rzeką a jej HZ, w lutym i maju 2023 roku zmiany miały dosyć harmonijny i konsekwentny przebieg od *downwellingu* po *upwelling*, postępując od jednego do drugiego



Rys. 4. Zmienność stanów Moszczenicy na posterunku wodowskazowym IMGW w Giecznie (A) i wód gruntowych w studni obserwacyjnej w Wypychowie (B) w okresie badań

Variability of the levels of Moszczenica at the IMWM water gauge station in Gieczno (A) and groundwater in the observation well in Wypychów (B) during the research period



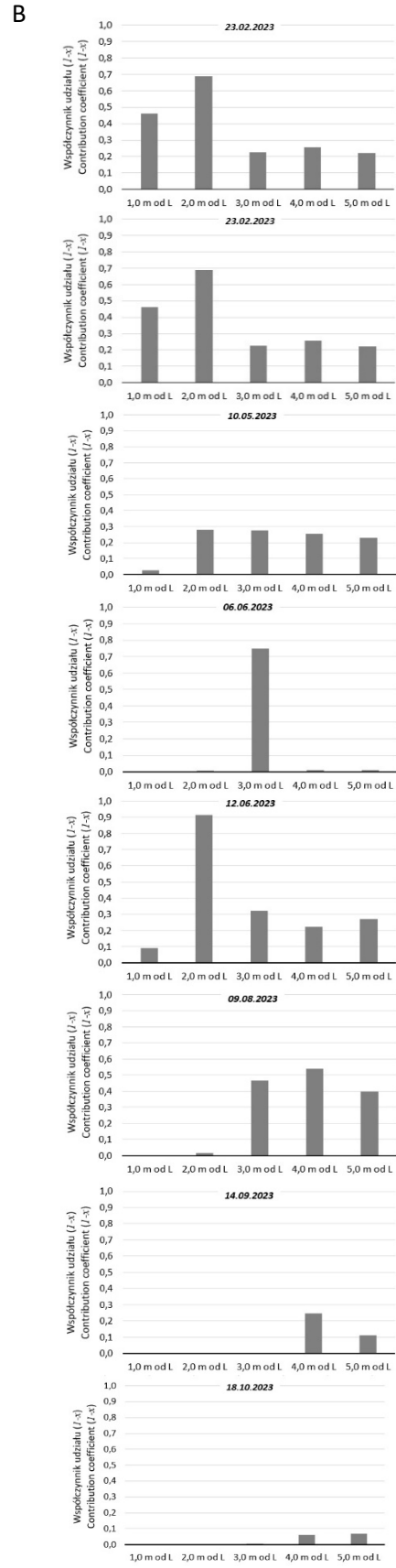
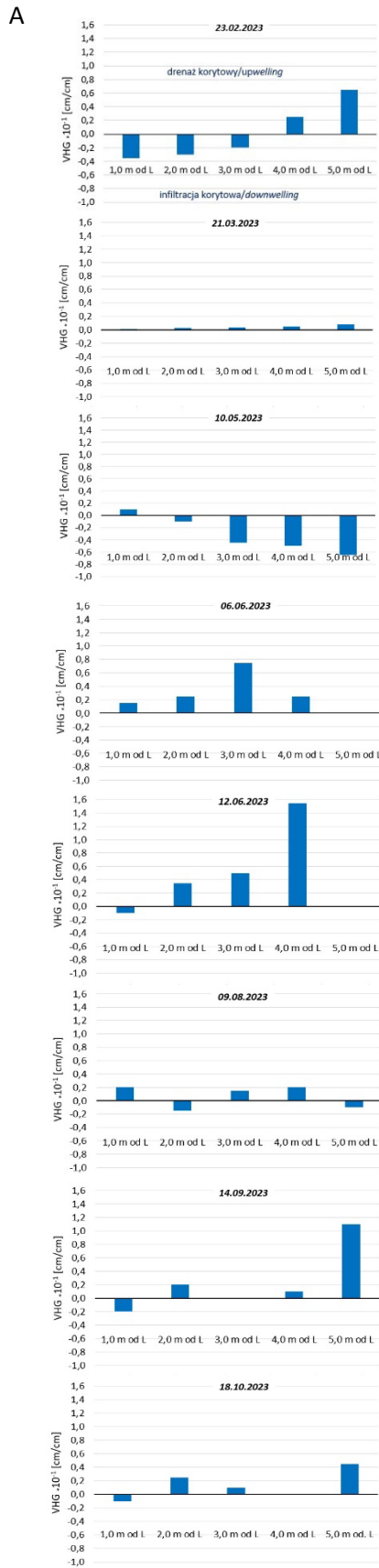
Rys. 5. Zakres stężeń jonu chlorkowego w badanych wodach rzecznych i hyporeicznych w profilu A-90

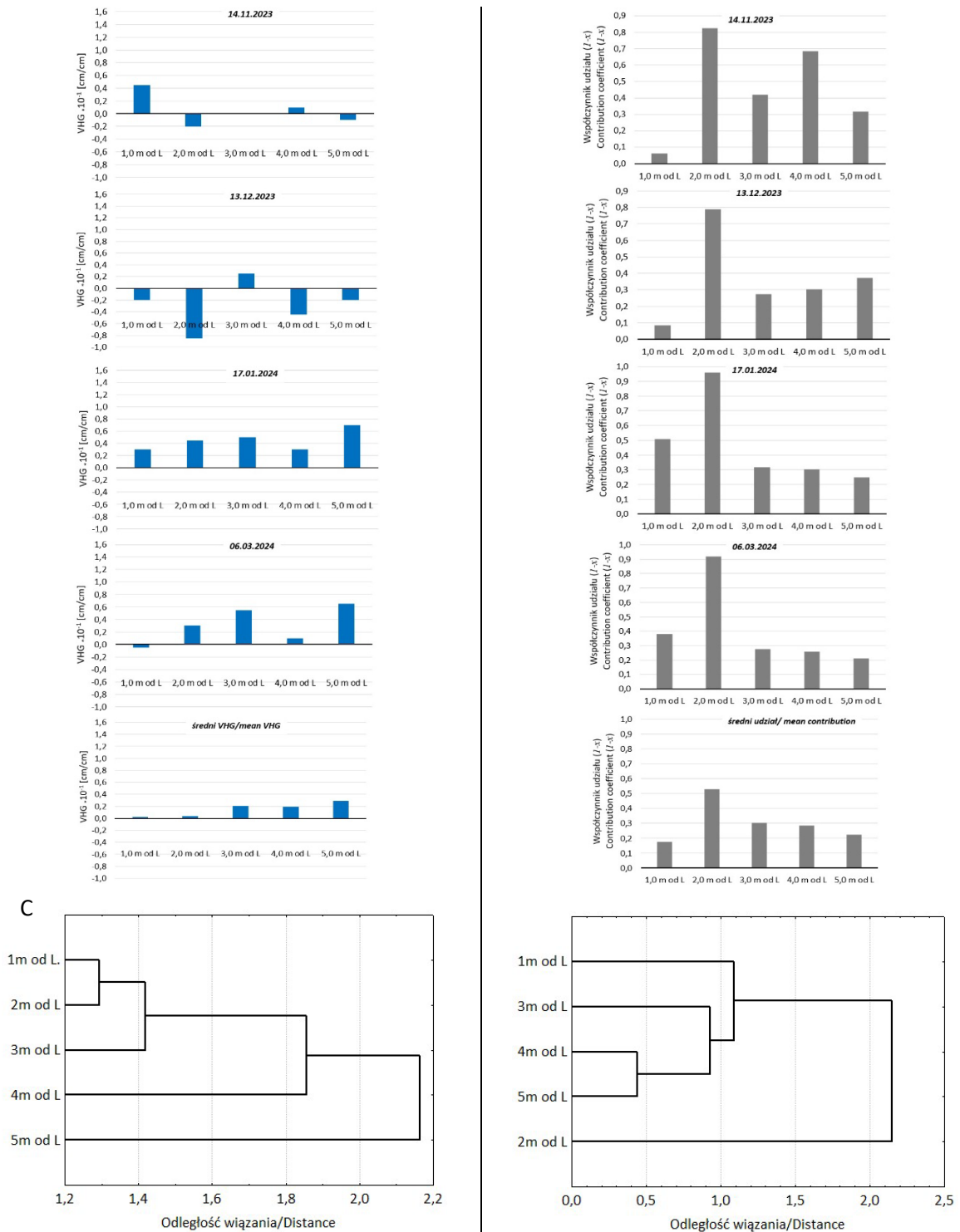
The range of chloride ion concentrations in the river and hyporheic waters in the A-90 research profile

brzegu rzeki. Wystąpiły również przypadki bardzo dynamicznych zmian kierunku i wielkości VHG pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi, które zdominowały sezon letnio-jesienny. W całym okresie obserwacji dominował drenaż korytowy (*upwelling*), z tym że jego siła rosła stopniowo od brzegu lewego (zachodniego) do prawego (wschodniego). Dokładnie w tym samym porządku malało względne podobieństwo punktów pomiarowych pod względem wielkości i zmian VHG (rys. 6C).

Nie mniej dynamiczny obraz współtworzy ocena udziału zasolonych wód głębszych w mieszaniu wód strefy hyporeicznej. Na uwagę zasługują przypadki braku ich reprezentacji w większej części punktów badawczych HZ we wrześniu

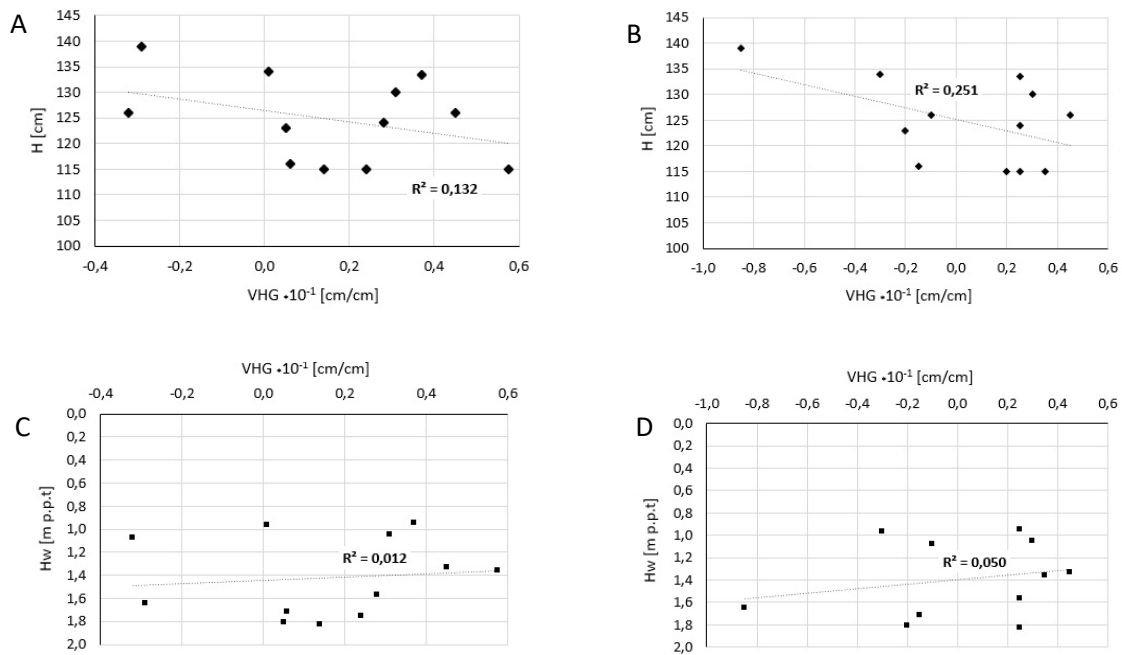
i października 2023 roku. Szczególnie interesujący jest przypadek pierwszego terminu czerwowego, kiedy w „przybrzeżnych” punktach badawczych wyniki obliczeń nie wykazały obecności wód głębszych, natomiast w profilu środkowym ich udział był bardzo czytelny i sięgnął poziomu (0,75), który ani wcześniej, ani później już się w tym punkcie nie powtórzył. Sześć dni później obraz hydrochemiczny uległ zupełnej zmianie; w tym czasie wyraźnie obniżył się stan Moszczenicy i jednocześnie minął epizod obniżenia zwierciadła wód gruntowych (rys. 4A, B). Największy udział wód głębszych wyróżnia punkt 2 m od L, choć jest to też miejsce, gdzie oddziaływanie głębszego środowiska hydrogeochemicznego jest najbardziej dynamiczne: od 0,0 do 0,98. Dużo bar-





Rys. 6. Gradienty hydrauliczne w punktach pomiarowych profilu badawczego (A), udział wód głębszych w wodach hyporeicznych Moszczenicy w miejscach pomiaru VHG (B) oraz dendrogramy podobieństwa punktów badawczych (C) odpowiednio: pod względem VHG i współczynnika udziału ($I-x$) wód głębszych

Hydraulic gradients at the measurement points of the research profile (A), the contribution of deep groundwaters in the hyporeic zone of Moszczenica river in the VHG measurement sites (B), the similarity dendrograms of research points (C) respectively: in terms of VHG and contribution coefficient ($I-x$) of deep groundwater



Rys. 7. Relacja VHG do stanów wody Moszczenicy na wodowskazie w Giecznie i do stanów wód gruntowych w studni obserwacyjnej w Wypychowie: A i C dla wartości średnich VHG ze wszystkich punktów pomiarowych oraz B i D dla VHG w punkcie badawczym o najwyższym udziale wód głębszych w strefie hyporeicznej, to jest w 2 m od L

Relationship of VHG to the Moszczenica water stages at the IMWM water gauge station in Gieczno and to the groundwater levels in the observation well in Wypychów: A and C for the average values of VHG from all measurement points and B and D for VHG at the research point with the highest share of deep groundwaters in the hyporheic zone, i.e. 2 m from L

dziej stabilna partycypacja wód głębszych w HZ wystąpiła w prawej (wschodniej) części profilu koryta rzecznej. Tutaj też podobieństwo punktów badawczych okazało się największe (rys. 6C). Z kolei największą osobliwością wykazał się wspomniany wcześniej punkt 2 m od L.

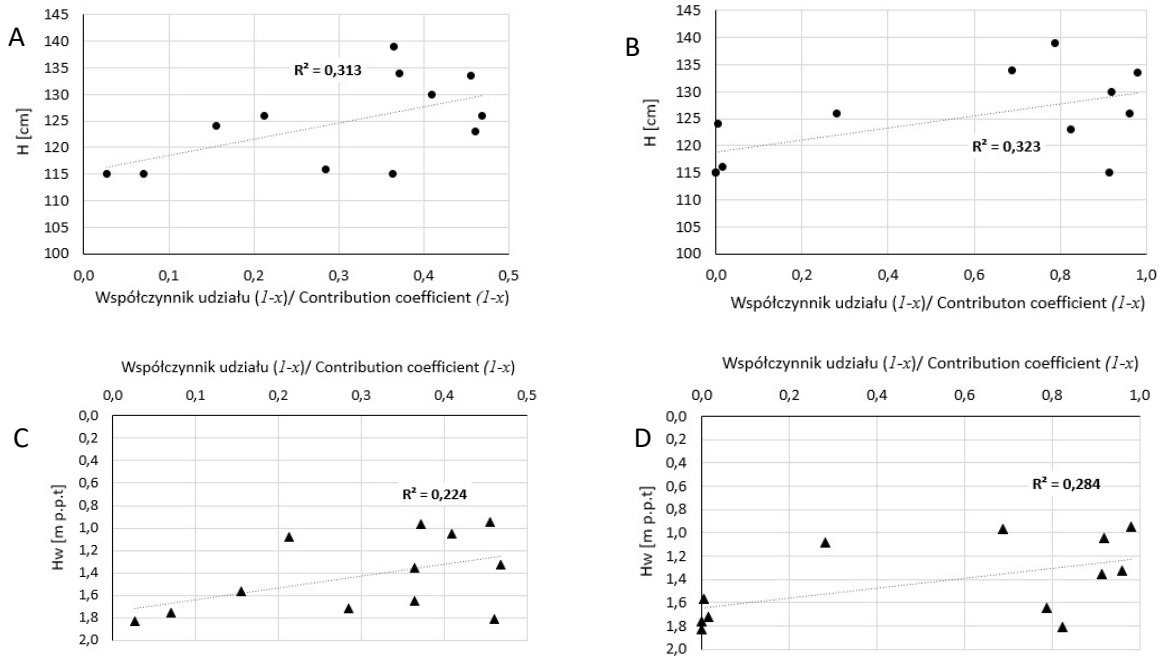
Ocena relacji pomiędzy wielkością i kierunkiem gradientów hydraulicznych a stanem wód Moszczenicy i wód gruntowych w dnie doliny (rys. 7A, C) nie wskazuje, że są to czynniki decydujące o stanie strefy hyporeicznej zarówno w odniesieniu do wszystkich punktów badawczych, jak i najbardziej wyróżniającego się pod względem obecności zasolonych wód głębszych punktu 2 m od L (rys. 7B, D), choć faktem jest, że to w jego przypadku uzyskano najwyższe wartości współczynnika regresji⁴.

Podobnie jak wcześniejsza analiza (rys. 7) odniesienie drugiej miary stanu strefy hyporeicznej Moszczenicy do stanów wód powierzchniowych i gruntowych (rys. 8) nie przynosi rozstrzygnięcia, mimo iż współczynniki regresji są nieco wyższe. Interesujący jest jednak kierunek tych interakcji, który wskazuje, że wraz ze wzrostem stopnia napełnienia koryta rzecznej wodą i podniesieniem się zwierciadła wód gruntowych rośnie udział wód głębszych z strefy hyporeicznej we wszystkich punktach, a w szczególności w punkcie 2 m od L (rys. 8B, D).

Przedstawienie całego zbioru wyników pomiarów VHG i obliczeń współczynnika udziału (1-x) (rys. 9) daje pogląd o zmienności badanego fragmentu środowiska hyporeicznego. Z pozornie bezładnej „chmury” punktów można wydzielić dwa podzbiory cechujące się pewnym uporządkowaniem. W zbiorze „a” wraz ze wzrostem gradientu od zjawiska infiltracji korytovej (*downwelling*) po drenaż (*upwelling*) wzrasta udział wód głębszych w HZ. W zbiorze „b” zmianom VHG nie towarzyszy zmiana udziału wód głębszych

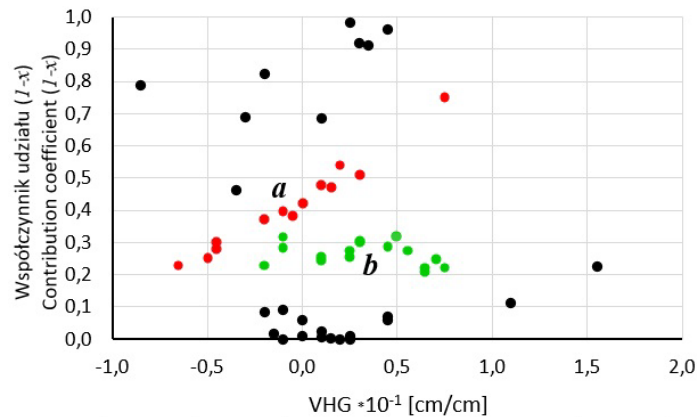
Przedstawienie całego zbioru wyników pomiarów VHG i obliczeń współczynnika udziału (1-x) (rys. 9) daje pogląd o zmienności badanego fragmentu środowiska hyporeicznego. Z pozornie bezładnej „chmury” punktów można wydzielić dwa podzbiory cechujące się pewnym uporządkowaniem. W zbiorze „a” wraz ze wzrostem gradientu od zjawiska infiltracji korytovej (*downwelling*) po drenaż (*upwelling*) wzrasta udział wód głębszych w HZ. W zbiorze „b” zmianom VHG nie towarzyszy zmiana udziału wód głębszych

⁴ Dla VHG i H dla punktów: 1 m od L, **2 m od L**, 3 m od L, 4 m od L, 5 m od L R^2 odpowiednio: 0,031, **0,251**, 0,000, 0,147 i 0,007. Dla VHG i Hw w tym samym porządku R^2 : 0,040, **0,050**, 0,003, 0,017 i 0,027.



Rys. 8. Relacje współczynnika udziału wód głębszych ($I-x$) w HZ do stanów wody Moszczenicy na wodowskazie w Giecznie i do stanów wód gruntowych w studni obserwacyjnej w Wypychowie: A i C dla wartości średnich współczynnika udziału oraz B i D dla współczynnika udziału w punkcie o najwyższym udziale wód głębszych w strefie hyporeicznej, to jest 2 m od L

Relationships of the deep groundwaters contribution coefficient ($I-x$) in the HZ to the Moszczenica water stages at the IMWM water gauge station in Gieczno and to the groundwater levels in the observation well in Wypychów: A and C for the average values of the contribution coefficient and B and D for the share coefficient at the point with the highest contribution of deep groundwaters in the hyporheic zone, i.e. 2 m from L



Rys. 9. Zmiany udziału wód głębszych w HZ Moszczenicy w odniesieniu do wielkości i kierunku VHG w badanym profilu koryta rzeczego „a” i „b” – charakterystyczne zbiory punktów z czasową reprezentacją na rys. 4B

Changes in contribution of deep groundwaters in the HZ of Moszczenica river in relation to the VHG values in the studied riverbed profile “a” and “b” – characteristic sets of points with temporal representation in Fig. 4B

w HZ. Oba te zbiory tworzą zasadniczo punkty: 3 m od L, 4 m od L i 5 m od L, czyli wykazujące największe podobieństwo pod względem współ-

czynnika udziału ($I-x$) (rys. 6C). „Kolektywna” przynależność punktów do któregoś ze zbiorów („a” lub „b”) ma związek z panującymi w danym

terminie stanami wód gruntowych (rys. 4B). Obecność w zbiorze „a” przypada na niskie ich stany, a w zbiorze „b” na wysokie stany.

Interpretacja i dyskusja

Roczne badania niewielkiego wycinka strefy hyporeicznej Moszczenicy na obszarze przypowierzchniowego zasolenia geogenicznego dają świadectwo skali zmienności obserwowanego zjawiska w dynamicznym układzie wzajemnej interakcji wód powierzchniowych, gruntowych i wgłębnych. Uchwycona sekwencja zmian stanów wody w rzece⁵ oraz poziomu wód gruntowych w dolinie stanowi konieczną oprawę w dokumentowaniu zachodzącego pod dnem rzeki mieszania wód powierzchniowych z podziemnymi. Proces mieszania jest według badań Zimmer i Lautz (2014) znacznie ważniejszym procesem dla geochemii HZ niż rozcieńczanie wodami rzecznyymi w czasie wezbrań. Pomiary PEW i analiza stężeń chlorków w obu elementach końcowych mieszania oraz w samej mieszaninie wskazują, poprzez konsekwentną linię mieszania (rys. 3), na rzeczywiste oddziaływanie zasolonych wokółwysadowych wód z utworów jurajskich na HZ Moszczenicy⁶.

Zakresy stężeń jonu chlorkowego w poszczególnych punktach badawczych profilu A-90 (rys. 5) ukazują zasięg oddziaływania wód rzecznych w HZ. Tam, gdzie wysłodzenie jest największe, czyli w lewej (zachodniej) części koryta – minima stężeń w HZ odpowiadają stężeniom Cl⁻ w wodach rzecznych. W prawej (wschodniej) części profilu badawczego to oddziaływanie jest bardzo ograniczone. To właśnie w lewej części profilu udział wód wgłębnych najczęściej spadał do poziomu zera i zbliżonego. Tam wody rzeczne „wypierały” zasolone wody wgłębne. Paradoksalnie działa się to zasadniczo przy najniższych stanach wody w Moszczenicy, to jest między sierpniem i październikiem 2023 roku (rys. 4A). Paradoks ten może być jednak pozorny, gdyż – jak podają Tonina i Buffington (2011) – podczas przepływu podstawowego, gdy efekt oddziaływania riplemarków, kłód, bystrzy, kaskad i innych cech topograficznych dna koryta rzeczno jest największy w wywoływaniu zmian nachylenia lustra wody, następuje zintensyfikowanie indukowanego hydrostatycznie przepływu wód rzecznych

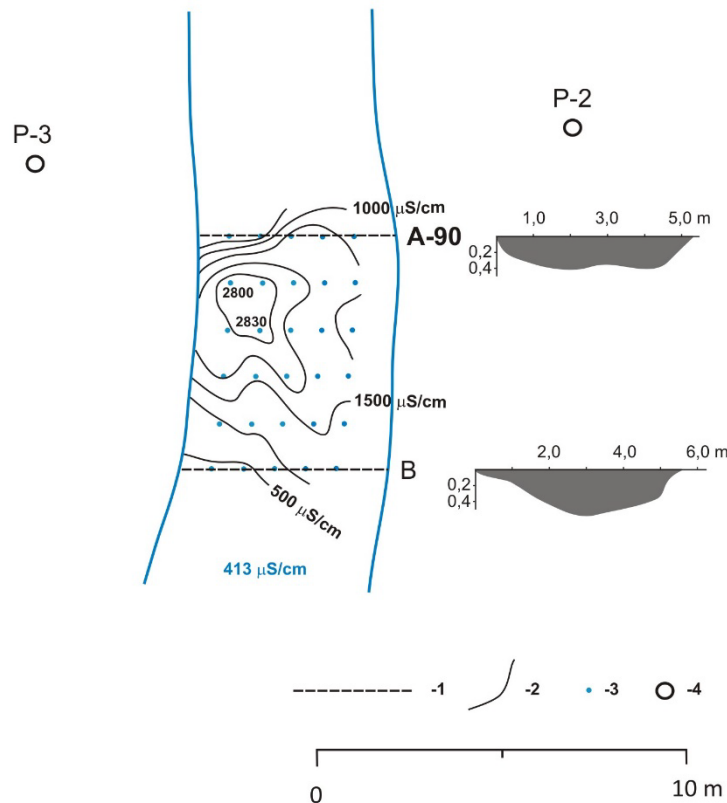
poprzez strefę hyporeiczną. Natomiast w okresach wysokich przepływów w strumieniu wpływ topografii korytowej może zostać osłabiony z powodu zatopienia się w nim topograficznych form dennych i korytowych.

Po prawej (wschodniej) stronie koryta udział wód wgłębnych jest dużo bardziej czytelny i, poza pierwszym terminem czerwcowym i terminem październikowym, można go uznać niemalże za permanentny, choć nieosiągający takiego poziomu, jak w punkcie 2 m od L. Bardzo wysoki udział zasolenia geogenicznego w HZ Moszczenicy w punkcie 2m od L czy w jednym przypadku w punkcie 3 m od L (pierwszy termin czerwcowy) wskazuje, że dopływ wód wgłębnych odbywa się poprzez ograniczoną przestrzennie strefę preferowanego przepływu podziemnego lub że dopływ ten odbywa się silnym strumieniem przy ograniczonych możliwościach mieszania – rozcieńczania w strefie hyporeicznej rzeki. Wielkości VHG w warunkach wystąpienia maksymalnych udziałów wód wgłębnych w HZ (rys. 6A, B), często o charakterze *downwellingu*, jak w lutym, listopadzie i grudniu 2023 roku przeczą tej tezie. Pozostaje hipoteza strefy preferowanego dopływu podziemnego, którą potwierdza wynik kartowania PEW w HZ przeprowadzonego w bezpośrednim sąsiedztwie profilu A-90 we wrześniu 2023 roku (rys. 10).

Warunki hydrologiczne i hydrogeologiczne w rozpoznanym zakresie nie wykazują powiązania z wielkością gradientów i z efektami mieszania wód powierzchniowych z podziemnymi (wgłębnymi) w HZ Moszczenicy (rys. 7, 8). Przeprowadzona analiza pozwoliła zidentyfikować pewną grupę przypadków, która wskazuje na interakcję stanu HZ ze zamianami zwierciadła wód gruntowych w dnie doliny rzecznej (rys. 9, 4B). Ważne wydają się dwa okresy – wysokich stanów w okresie zimowo-wiosennym oraz stanów niskich latem i jesienią (późną). Gdy zwierciadło wód gruntowych jest obniżone, zmiany VHG odpowiadają zmianom udziału wód wgłębnych w HZ – im wyższy gradient, tym wyższy udział wód zasolonych. Można przyjąć, że aktywizuje się wtedy ascenzja przy braku efektywnego „przeciwdziałania” słupem wody nadległych wód gruntowych i rzecznych w korycie. Przy wysokich stanach wód gruntowych to „tłumienie” jest bardziej sprawne i pomimo zmian VHG w szerokim zakre-

⁵ Ocena roli zmian przepływów Moszczenicy na odcinku występowania omawianej osobliwości hydrogeochemicznej stanowi przedmiot innego opracowania, które jest obecnie na ukończeniu

⁶ To jest aktualna hipoteza robocza, nad której weryfikacją trwają obecnie prace badawcze, między innymi przy wykorzystaniu metod izotopowych (Ziulkiewicz, Długosz-Lisiecka 2023; Ziulkiewicz i in. 2024)



Rys. 10. Przestrzenny rozkład wartości przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW) wód hyporeicznych w bezpośrednim sąsiedztwie profilu badawczego A-90 dna koryta Moszczenicy. Pomiary wykonano 25 września 2023 roku przy niskim stanie wody w korycie (113 cm) – według obserwacji na wodowskazie IMGW w Giecznie
 1 – profil sondowania głębokości, 2 – izarytma PEW, 3 – punkt badawczy wód hyporeicznych, 4 – nowo zainstalowane piezometry

Spatial distribution of the specific electrolytic conductivity (SEC) values of hyporheic waters in the research profile A-90 at the bottom of the Moszczenica river. The measurements were made on September 25, 2023, at low water stage in the riverbed (113 cm) – according to observations at the IMWM water gauge in Gieczno
 1 – depth sounding profile, 2 – SEC isoline, 3 – hyporheic water research point, 4 – newly installed piezometers

się, udział wód wgłębnych w HZ nie ulega zmianie. Na uwagę zasługuje fakt, że te zmiany rejestrowane są tylko we wschodniej części profilu badawczego, a nie w bardziej dynamicznej części zachodniej. Powyższe zjawisko obliuguje do próby usankcjonowania roli trzeciego elementu końcowego mieszania w HZ Moszczenicy, jakim są wody gruntowe. Prace badawcze w tym zakresie dopiero rozpoczęto, instalując piezometry na obu brzegach rzeki w bezpośrednim sąsiedztwie profilu A-90 (rys. 10). Jednak wstępne wyniki analiz chemicznych wskazują, że pod względem zasolenia środowisko to na obu brzegach stanowi „ogniwo” pośrednie pomiędzy wodami pozbawionymi znamion zasolenia geogenicznego, tutaj reprezentowanymi przez wody Moszczenicy, a zasolonymi wodami wokółwysadowymi z utworów jurajskich (rys. 3).

Zasolenie wód gruntowych w dnie doliny Moszczenicy przekłada się na wspomnianą wyżej permanentną obecność wód wgłębnych we wschodniej części profilu badawczego, gdzie *upwelling* w całym okresie obserwacji był najsilniejszy (rys. 6A). Obecność ta ma jednak charakter pośredni, poprzez drenowane w tej właśnie części koryta zasolonych geogenicznie wód gruntowych, a nie bezpośredni, choć okresowy, dopływ do HZ zasolonych wód wgłębnych w zachodniej części badanego profilu, co udało się uchwycić zwłaszcza w punkcie 2 m od L.

Pomiary przeprowadzone przez Marciniaka i in. (2022) w Moszczenicy wykazały, że niezależnie od stanów wody w rzece, w jej dnie może następować dopływ wód wgłębnych. Obecne badania wykazały, że jeśli przyjąć za miarę ich obecności stan zasolenia HZ, to ascenzja ta może

okresowo zanikać. Określony przez Ziulkiewicza (2022) udział zasolonych wód wglębnych w HZ Moszczenicy na 18–23% w konkretnych warunkach może sięgać nawet 98% w tej samej części dna koryta rzecznego (profil A-90). Dla porządku należy dodać, że w pierwszym przypadku stan wody w Moszczenicy wynosił 127 cm, a w drugim 133 cm.

Petts i Amoros (1996) podają, że przy ciągłości hydraulicznej warstw wodonośnych ich heterogeniczny charakter powoduje powstanie stref preferowanego przepływu podziemnego, które tworzą mozaikę podsystemów o niesynchronicznej dynamice odpowiedzialnych za inercję reakcji pomiędzy wodami rzeczными i podziemnymi. Taką inercję reakcji w pracy ukazano. Interpretując brak czytelności powiązania stanu badanego fragmentu HZ z warunkami hydrologicznymi w dolinie Moszczenicy, należy pamiętać, że – jak podają Boano i in. (2014) – istnieje wiele skal hyporeicznego przepływu (hydrostatycznego, hydrodynamicznego), które oddziałują zarówno na siebie, jak i na przepływ wody w korycie rzeczonym, a ten z kolei jest konsekwencją istnienia wielu skal przestrzennych, które charakteryzują krajobraz i morfologię rzeki, co jest ostateczną i wielce złożoną determinantą kontrolującą interakcje między wodami powierzchniowymi i hyporeicznymi. Badania Malcolma i in. (2005, 2006), Boano i in. (2007ab) wykazały jednocześnie, że fluktuacje zwierciadła wód podziemnych wywierają większy wpływ na wymianę hyporeiczną niż zmiany w ilości wód spływających korytem rzeczonym. Roczne obserwacje wycinka HZ Moszczenicy wydają się powyższe badania potwierdzać.

W przypadku wysadu solnego Rogóźno i przepływającej niespełna 200 m powyżej jego czapy iłowo-gipsowej Moszczenicy niezwykle ważne są warunki hydrogeologiczne. Obszar badań położony na granicy wału kujawsko-pomorskiego i niecki łódzkiej z otwartym i drugim co do wielkości rozpoznany w kraju diapirem solnym stwarza szereg problemów badawczych. Z uwagi na obecność w bezpośredniej bliskości koryta rzeczego silnie zasolonych wód podziemnych konieczna jest identyfikacja ich genezy i dróg dopływu. Autor ma świadomość, że przyjęta w powyższej pracy koncepcja zasolenia geogenicznego poprzez wody wokółwysadowe wymaga dalszego rozwinięcia i weryfikacji, tym bardziej, że możliwe są inne scenariusze (Ziulkiewicz, Długosz-Lisiecka 2023; Ziulkiewicz i in. 2024), a zasolenie strefy hyporeicznej Moszczenicy w jej „ponadwysadowym” odcinku ujawniło

się również w innych fragmentach koryta (Każmierczak i in. 2024).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania ujawniły skalę zmian stanu niewielkiego fragmentu strefy hyporeicznej w rocznym okresie obserwacji. Badania są pierwszym etapem prac mających zdiagnozować osobliwe zjawisko zasolenia geogenicznego strefy wokółkorytowej rzeki nizinnej. Zasolona strefa hyporeiczna może stanowić zagrożenie dla słodkowodnego ekosystemu rzeki, niepozbawionej zanieczyszczeń antropogenicznych. Rozpoznanie interakcji między zmiennością warunków hydro-meteorologicznych zlewni Moszczenicy i złożonym wokółwysadowym środowiskiem wód podziemnych winno docelowo dać narzędzie prognozowania stanu hydrochemicznego rzeki kształtowanego pod wpływem postępujących zmian warunków klimatycznych. Pojawia się bowiem obawa, że wraz z postępującym obniżaniem się stanów wody Moszczenicy może aktywizować się dopływ zasolonych wód wglębnych do efektywnie drenowanej strefy hyporeicznej, co w nieodległej perspektywie czasowej może doprowadzić do powrotu nad brzegi Moszczenicy obserwowanych w latach 50. i 60. ubiegłego wieku słonorośli.

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.
- Bieniewski J. 1962. Problemy geologiczne złoża węgla brunatnego Rogóźno. *Kwartalnik Naukowo-Techniczny Przemysłu Węgla Brunatnego* 4: 3-8.
- Boano F., Revelli R., Ridolfi L. 2007a. Bedform-induced hyporheic exchange with unsteady flows. *Advances in Water Resources* 30: 148-156.
doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.03.004
- Boano F., Packman A.I., Cortis A., Revelli R., Ridolfi L. 2007b. A continuous time random walk approach to the stream transport of solutes. *Water Resources Research* 33: W10425.
https://doi.org/10.1029/2007WR006062
- Boano F., Harvey J.W., Marion A., Packman A.I., Revelli R., Ridolfi L., Wörman A. 2014. Hy-

- porheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Reviews of Geophysics* 52: 603-679. <https://doi.org/10.1002/2012RG000417>
- Bukowski Z. 1963. O możliwości wykorzystania solanek w okresie halsztackim na terenie Wielkopolski i Kujaw. *Archeologia Polski* 8: 246-273.
- Czapowski G., Tarkowski R. 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 472: 53-82. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6905>
- Dębski J., Werner Z., Podemski M., Szaniawski H. 1963. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Rogóżno, powiat Łęczycza, województwo łódzkie. CAG Warszawa.
- 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. doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00364.x
- Górecki M. 2017. Charakterystyka hydrologiczna i hydrochemiczna wód Moszczenicy w przekroju Gieczno. *Acta Universitatis Lodzianensis. Folia Geographica Physica* 16: 15-22. doi.org/10.18778/1427-9711.16.02
- Górecki M. 2018: Wokółwysadowe wody lecznicze w rejonie Rogóżna w gminie Zgierz. (niepublikowana praca dyplomowa). Uniwersytet Łódzki, Łódź.
- Górecki M., Ziułkiewicz M. 2016. The presence of geogenically saline waters in the area of salt dome Rogóżno (central Poland). *Geology, Geophysics and Environment* 42: 289-310. doi.org/10.7494/geol.2016.42.3.289
- Hooper R.P. 2001. Applying the scientific method to small catchment studies: A review of the Panola Mountain experience. *Hydrological Processes* 15: 2039-2050.
- Hooper R.P. 2003. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resources Research* 39(3). <https://doi.org/10.1029/2002WR001528>
- Hycnar E., Ratajczak T. 2019. Ewaporaty solne a polskie złoża węgla brunatnego. W: E. Lewicka (red.) *Aktualia i Perspektywy Gospodarki Surowcami Mineralnymi*. IGSMiE PAN, Kraków: 191-207.
- IMGW (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy). 2024. Online: http://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/ (data ostatniego dostępu: 15.04.2024).
- Jaworski A. 1964. Powierzchniowe przejawy zasolenia na obszarze wysadu solnego w Rogóżnie koło Łodzi. *Przegląd Geologiczny* 12: 148-149.
- Jewtuchowicz S. 1967. Geneza pradoliny warszawsko-berlińskiej między Nerem i Moszczenicą. *Prace Geograficzne* 62.
- Jodłowski A. 1977. Badania archeologiczne nad początkami eksploatacji soli w Polsce Środkowej. *Sprawozdania Archeologiczne* 29: 179-187.
- Kamiński J. 1993. Późnoplejstoceńska i holocenska transformacja doliny Moszczenicy. *Acta Geographica Lodzianensis* 64.
- Każmierczak K., Lik K., Ślusarczyk T., Ziułkiewicz M. 2024. Przejawy zasolenia geogenicznego w strefie hyporeicznej Moszczenicy na odcinku Gieczno – Wola Rogozińska. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Funkcjonowanie strefy hyporeicznej”, 24-25.04.2024, Poznań.
- Macioszczyk A. 1988. Chemizm wód podziemnych dolin rzecznych oraz główne czynniki kształtujące go. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 347: 205-220.
- Malcolm A., Soulsby C., Youngson A.F., Hannah D.M. 2005. Catchment-scale controls on groundwater-surface water interactions in the hyporheic zone: Implications for salmon embryo survival. *River Resources Application* 21: 977-989.
- Malcolm A., Soulsby C., Youngson A.F. 2006. High-frequency logging technologies reveal state-dependent hyporheic process dynamics: Implications for hydroecological studies. *Hydrological Processes* 20: 615-622.
- Matecki J., Ziułkiewicz M. 2019. Wody zwykłe i termalne niecki łódzkiej – analiza potencjalnych zagrożeń ich eksploatacji w rejonie aglomeracji Łodzi. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 475: 133-142. <https://doi.org/10.7306/bpig.16>
- 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., Ziułkiewicz 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: 143-158.
- Meszczczyński J., Szczerbicka M. 2002. Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz 590 Zgierz. Wyd. Geologiczne.
- Petts G.E., Amoros C., 1996. Fluvial Hydrosystems. Chapman & Hall, London, Wielka Brytania.
- PGI (Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy). 2024. Online: <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/psh/zadania-psh/jcwpd/jcwpd-60-79/4423-karta-informacyjna-jcwpd-nr-63/file.html> (data ostatniego dostępu: 10.04.2024).
- Skorupa J., Dziewińska L. 1976. Kompleksowa interpretacja wyników badań geofizycznych dla strefy Gopło–Pabianice ze szczególnym uwzględnieniem utworów cechsztynu i podłoża. *Kwartalnik Geologiczny* 20: 137-156.
- Sokołowski J. 1966. Rola halokinezy w rozwoju osadów mezozoicznych i kenozoicznych struktury Mogilna i synklinorium mogileńsko-łódzkiego. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Szczepański W. 1995–1996. Atlas posterunków wodowskazowych dla potrzeb państwowego monitoringu środowiska. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Tonina D., Buffington J.M. 2011. Effects of stream discharge, alluvial depth and bar amplitude on hyporheic flow in pool-riffle channels. *Water Resources Research* 47: W08508.
<https://doi.org/10.1029/2010WR009140>.
- Zimmer M.A., Lautz L.K. 2014. Temporal and spatial response of hyporheic zone geochemistry to a storm event. *Hydrological Processes* 28: 2324-2337.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9778>
- Ziulkiewicz M. 2003. Pionowa strefowość hydrochemiczna wód podziemnych na obszarze aglomeracji łódzkiej. *Acta Geographica Lodziensia* 85.
- Ziulkiewicz M. 2022. Zasolenie strefy hyporeicznej rzeki Moszczenicy w rejonie wysadu solnego Rogózno. *Acta Geographica Lodziensia* 112: 163-184.
- Ziulkiewicz M., Długosz-Lisiecka M. 2023. Izotopy radu w wodach strefy hyporeicznej Moszczenicy w rejonie wysadu solnego Rogózno na ziemi łęczyckiej. W: R. Czerniawski, R. Bilski (red.) *Funkcjonowanie i ochrona wód płynących*. WIOŚ O/Szczecin: 257-272.
- Ziulkiewicz M., Grabowski P., Długosz-Lisiecka M. 2024. Ocena warunków geogenicznego zasolenia strefy hyporeicznej Moszczenicy w strefie wysadu solnego Rogózno (powiat zgierski) na podstawie izotopów radu. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „*Funkcjonowanie strefy hyporeicznej*”, 24–25.04.2024, Poznań.

Summary

Inflows of salty groundwater have been known in central Poland since the times of the first settled cultures (Bukowski 1963; Jodłowski 1977). However, this type of tradition does not occur in the area we are visiting. Despite its rich economic history (Kamiński 1993), there is no evidence of prehistoric salt extraction. The occurrence of salt ponds and salt-loving plants was the result of extensive geological exploration works. They were carried out in the years 1949–53 to identify salt deposits in the Rogóżno diapir and pierced the overburden of Mesozoic deposits (Dębski *et al.* 1963; Jaworski 1964). The resulting disturbance to local hydrogeological conditions have caused brackish water to occur in the Gieczno area shallowly below the surface, already in unconfined groundwaters (Meszczynski, Szczerbicka 2002). The Moszczenica flows along the long axis of the diapir contour, draining groundwater resources, including saline confined groundwaters. Observations of vertical hydraulic gradients between the hyporheic zone and the Moszczenica riverbed have shown that upwelling of confined groundwaters may occur in the bottom (Marciniak *et al.* 2022; Ziulkiewicz 2022). Hydrochemical tests, which were carried out next, showed the presence of saline groundwater at the bottom of the river, which is not represented in the preserved wells reaching groundwater in the layers over the salt dome and around. (Ziulkiewicz, Długosz-Lisiecka 2023). It is currently impossible to clearly indicate the hydrogeological environment responsible for the salinity of the Moszczenica hyporheic zone at Gieczno, but it was assumed that the end-member mixed element in the hyporheic zone might be represented by the water obtained for research by Górecki and Ziulkiewicz (2016) from a closed well in Gieczno, reaching the Jurassic salinized aquifer surrounding the Rogóżno diapir in the north (Górecki 2018) (Fig. 2). This is confirmed by graphical verification in the form of a line along which these deep groundwaters mix with water of the Moszczenica (Fig. 3).

The goal of the research is to observe the state of the hyporheic zone HZ expressed by the magnitudes and directions of hydraulic gradients (VHG) and the scale of geogenic salinity, whose characteristics should be influenced by the hydrological conditions of the Moszczenica and the level changes of the groundwater table in the bottom of the valley. The paper presents

the results of annual observations of the river, hyporheic zone and groundwater.

To achieve the research goal, the following scope of work was undertaken: 1) VHG measurements in research points located in the transverse profile of the Moszczenica riverbed (Fig. 1); 2) sampling waters from the HZ to measure electrical conductivity (EC) and determining concentrations of chlorides at the same points as VHG was measured; 3) EC measurement and water sampling to determine the concentration of chlorides in Moszczenica water, as the first end-member mixed element in hyporheic zone; 4) recording the water stages in the Moszczenica at the IMWM station in Gieczno; 5) recording the water level in the groundwater observation well in Wypychów village (Fig. 1).

Water stages in the Moszczenica river changed during observations, from highest in the autumn-winter season to lowest in the summer of 2023, when they were lower than the extremely low stage for the period 1971–90 (according to Szczepański 1995–96) and 3 cm higher than the extremely low stage for the 2013–22 period (Institute of Meteorology and Water Management 2024) (Fig. 4).

The concentration of chloride ions in the Moszczenica waters and in samples of HZ waters vary within wide limits from 28 mg/dm³ to nearly 870 mg/dm³ and at the same measuring point of hyporheic waters: 2 m from left bank of riverbed (Fig. 5).

In the measurement profile, very different scenarios of VHG changes between the banks of the Moszczenica River are determined (Fig. 6a). In March 2023, a pressure balance occurred between the river and its HZ; in February and May 2023, the changes consisted in a gradual transition from downwelling to upwelling between one riverbank and the other. In the summer and autumn seasons, there were cases of very dynamic changes in the direction and size of VHG between individual measurement points. Throughout the entire period of observation, channel drainage (upwelling) dominated, but its strength increased gradually from the left (western) to the right (eastern) riverbank.

An equally dynamic picture is provided by the assessment of the share of saline deep waters in mixture of the hyporheic zone (Fig. 6b). The cases of their whole lack of representation in most of the HZ in September and October 2023 are important. Particularly interesting is the case of the first June date, when no deep water was detected in the "coastal" sampling points, while in

the central profile their role turned out to be very large (share coefficient: 0.75). The greatest share of deep water occurs at the point 2 m from the left bank, although this is also the place where the impact of the deep hydrogeochemical environment is the most dynamic: value of share coefficient changed from 0.0 to 0.98.

The assessment of the relationship between the value and direction of VHG versus the stages of the Moszczenica waters and groundwater in the bottom of the valley (Fig. 7) does not indicate that these are factors determining the state of the hyporheic zone. A similar effect is achieved by the assessment based on the share of deep water in the HZ, although the regression coefficients are slightly higher (Fig. 8). Only the mutual reference of the measures of the HZ state (Fig. 9), i.e. the VHG and the share of deep groundwater, allows us to indicate two relationships. In one case (marked a.), as the gradient increases, the share of deep groundwater in the HZ increases, in the other (marked b.), changes in VHG are not accompanied by a change in the share of deep groundwater in the HZ. The first relationship occurs when groundwater levels are high in winter and spring, while the second occurs during low levels in summer and autumn. When the groundwater table is lowered, ascension of saline deep groundwaters is

active. When groundwater levels are high, the inflow is "suppressed" by the increased groundwater column and the share of deep groundwater in the HZ is low and does not change.

This research revealed the scale of state changes in the small part of the hyporheic zone during the one-year observation period. These investigations are the first stage of work aimed at diagnosing the peculiar phenomenon of geogenic salinity in the zone around the riverbed of a lowland river. The saline hyporheic zone may pose a threat to the freshwater ecosystem of the river, which is not free from anthropogenic pollutants. Knowledge of the interaction between the variability of the hydro-meteorological conditions of the Moszczenica catchment and the complex surrounding groundwater environment should ultimately provide a tool for forecasting the hydrochemical state of the river shaped under the influence of progressive changes in climatic conditions. There is a fear that with the progressive decline in the water stages of the Moszczenica River, the inflow of saline deep groundwaters into the effectively drained hyporheic zone may become more active, which in the near future may lead to a return of salt-loving plants to the banks of the Moszczenica River, as was observed in the 1950s and 1960s.