



Funkcjonowanie geosystemu zlewni miejskiej Różanego Strumienia w Poznaniu pod wpływem presji antropogenicznej

The functioning of the geosystem of the Różany Stream urban catchment in Poznań under anthropogenic pressure

Maciej Major^{1,2}  Maria Chudzińska¹  Robert Kruszyk²  Mikołaj Majewski^{1,2} 
Małgorzata Stefaniak¹ 

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

¹ Stacja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Poznań-Morasko

² Instytut Geoekologii i Geoinformacji

ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań

maciej.major@amu.edu.pl (autor korespondencyjny) • maria.chudzinska@amu.edu.pl •

robert.kruszyk@amu.edu.pl • mikolaj.majewski@amu.edu.pl • m.stefaniak@amu.edu.pl

Zarys treści. Zlewnia Różanego Strumienia położona w północnej części Poznania stanowi poligon badawczy Stacji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Poznań-Morasko, pierwszej Stacji Bazowej w programie ZMŚP zlokalizowanej na terenie dużej aglomeracji miejskiej. Rok hydrologiczny 2023 był ósmym rokiem pomiarowym w ramach monitoringu zintegrowanego. Badania przeprowadzono w oparciu o 12 programów pomiarowych ZMŚP. W opracowaniu przedstawiono wybrane wyniki dotyczące warunków termiczno-opadowych, składu chemicznego opadów, stanów oraz składu chemicznego wód powierzchniowych i podziemnych. Rok 2023 zaliczono do kategorii lat ciepłych i wilgotnych; suma opadów przewyższyła normę o 17%, przy dużej zmienności miesięcznej. Opady atmosferyczne cechowały się niską mineralizacją i normalnym odczynem, a w opadzie podkoronowym odnotowano prawie czterokrotny wzrost ładunku jonów w porównaniu z otwartą przestrzenią. Wody Różanego Strumienia charakteryzowały się lekko zasadowym odczynem (pH 7,83) i wysoką mineralizacją (SEC 91,5 mS · m⁻¹) oraz typem hydrogeochemicznym wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowym. Na podstawie obowiązujących kryteriów jakość wód powierzchniowych określono jako poniżej stanu dobrego. Z kolei wody podziemne, mimo wysokiej mineralizacji, zachowały dobry stan chemiczny. Bilans wodny wskazał na znaczną przewagę dopływu atmosferycznego nad odpływem rzeczny (610,8 mm), a bilans materii rozpuszczonej – na przewagę procesów wymywania nad akumulacją. Uzyskane wyniki potwierdziły, że funkcjonowanie geosystemu małej zlewni miejskiej zależy od warunków hydrometeorologicznych i narastającej presji antropogenicznej.

Słowa kluczowe: zlewnia Różanego Strumienia, ZMŚP, presja antropogeniczna, bilans wodny, skład chemiczny opadów, wody powierzchniowe i podziemne.

Keywords: *Różany Strumień catchment, IMNE, anthropogenic pressure, water balance, precipitation chemistry, surface waters, groundwater.*

Wstęp

Przedmiotem badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) jest przestrzeń przyrodnicza, która składa się ze wzajemnie na siebie oddziałujących podsystemów, takich jak: atmosfera, biosfera, pedosfera, litosfera, hydrosfera i antroposfera. Jednostką przestrzenną, umożliwiającą całościowe ujęcie przepływu energii i obiegu

materii, jest zlewnia rzeczna, względnie jeziorna. W analizowanym przypadku jest to zlewnia Różanego Strumienia (ryc. 1).

Stacjonarne badania terenowe zaplanowano i przeprowadzono w oparciu o system monitoringu atmosfery i hydrosfery przy Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM, będący częścią infrastruktury Stacji ZMŚP Poznań-Morasko. Jest to także pierwsza Stacja Bazowa w programie ZMŚP w Polsce działająca w granicach dużej aglomeracji miejskiej i podlegająca silnej presji antropogenicznej (Major et al., 2017).

Podstawą analiz określających funkcjonowanie geoekosystemu badanej zlewni były dane w zakresie: warunków termiczno-opadowych w roku hydrologicznym 2023, składu chemicznego opadów atmosferycznych, zestawienia stanów i przepływów wód w Różanym Strumieniu oraz właściwości fizykochemicznych wód podziemnych w analizowanym okresie.

Rok hydrologiczny 2023 był ósmym rokiem pomiarowym w zlewni Różanego Strumienia w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Badania prowadzono w oparciu o 12 programów pomiarowych ZMŚP, a wyniki kilku z nich przedstawiono w niniejszym opracowaniu. Na podstawie uzyskanych wyników określono aktualny stan i funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia w analizowanym roku pod wpływem silnej presji antropogenicznej.

Obszar badań

Zlewnia Różanego Strumienia zlokalizowana jest w północnej części Poznania i zajmuje powierzchnię ok. 7,7 km² (ryc. 1). Według podziału fizycznogeograficznego Richlinga et al. (2021) badana zlewnia położona jest w obrębie dwóch mezoregionów: Pojezierza Poznańskiego (315.51) i Poznańskiego Przełomu Warty (315.52). Oba wymienione obszary stanowią część makroregionu Pojezierze Wielkopolskie (315.5).

Zgodnie z podziałem geomorfologicznym zaproponowanym przez Krygowskiego (1961) zlewnia znajduje się w obrębie Wysoczyzny Poznańskiej. Reprezentuje typowy krajobraz młodoglacjalny i znajduje się w obrębie strefy marginalnej stadiu poznańskiego zlodowacenia bałtyckiego (Galon, 1972). Analizowany obszar charakteryzuje się znacznymi deniwelacjami, przekraczającymi 100 m.

W zlewni dominują trzy główne formy rzeźby polodowcowej. Na północy znajduje się ciąg pagórów czołowomorenowych z kulminacją na Górze Moraskiej. Ponadto w okolicy rezerwatu Meteoryt Morasko występuje m.in. wysoczyzna morenowa falista, a na południe od moren czołowych rozciąga się równina sandrowa, tzw. Sandr Naramowicki.

Głównym ciekim w zlewni jest lewobrzeżny dopływ Warty – Różany Strumień – o długości 6,9 km. Źródło strumienia zlokalizowane jest w mokradle położonym na południowy wschód od Góry Moraskiej. Pozostała sieć cieków ma charakter okresowy.

Zlewnia Różanego Strumienia jest przykładem obszaru poddawanego procesowi silnej presji antropogenicznej. W strukturze użytkowania ziemi dominują użytki zielone (30,3%), lasy (22,2%) i grunty orne (20,3%). Znaczący udział mają również tereny zurbanizowane (17,4%), które występują w centralnej części zlewni. Istotny wpływ na kształtowanie krajobrazu tej zlewni ma postępująca, trwająca od 1999 r., rozbudowa Kampusu Morasko, który obecnie skupia wiele wydziałów i jednostek Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza oraz zwiększający się obszar osiedli mieszkaniowych wraz z towarzyszącą im infrastrukturą drogową i komunalną (Major et al., 2022).



Ryc. 1. Lokalizacja zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu i rozmieszczenie stanowisk pomiarowych
 A1 – posterunek meteorologiczny, C1 – stanowisko pomiarowe składu chemicznego opadu na otwartej przestrzeni, C2 – stanowisko pomiarowe składu chemicznego opadu podkoronowego, F2 – posterunek hydrogeologiczny, H1 – posterunek hydrologiczny
Location of the Różany Strumień catchment in Poznań and testing plots placement
 A1 – meteorological station, C1 – precipitation chemistry site, C2 – throughfall chemistry site, F2 – hydrogeological station, H1 – hydrological station

Metody badań

Funkcjonowanie geosystemu zlewni Różanego Strumienia określono na podstawie systematycznych pomiarów szeregu komponentów środowiska przyrodniczego. Badania realizowano na stanowiskach pomiarowych zlokalizowanych na obszarze zlewni. System pomiarowy i metodyka badań terenowych odpowiadały założeniom metodologicznym i metodycznym Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (Kostrzewski et al., 1995; Kostrzewski i Majewski, 2021). Jednocześnie były one zgodne z wytycznymi europejskiego programu ICP Integrated Monitoring (Integrated Cooperative Programme on Integrated Monitoring on Air Pollution Effects, ICP/IM) (Manual, 1998). Pozwala to na porównywanie uzyskanych rezultatów z wynikami badań prowadzonych w innych geosystemach Polski. Zakres pomiarów w Stacji Poznań-Morasko obejmował m.in.:

- codzienne, automatyczne oraz manualne rejestracje podstawowych elementów meteorologicznych, w szczególności opadów atmosferycznych i temperatury powietrza, które stanowią kluczowe parametry oceny funkcjonowania geosystemu (Kejna, 2021), dane termiczne i opadowe zostały odniesione do wyników zebranych w okresie referencyjnym 1991-2020 na stacji synoptycznej IMGW-PIB Poznań Ławica;

- comiesięczną analizę składu chemicznego opadów atmosferycznych na otwartej przestrzeni oraz pod koronami drzew (opad podkoronowy). Monitoring opadu podkoronowego prowadzono w oparciu o 12 chwytaczy ustawionych co 4 m w węzłach siatki prostokątnej (Degórska i Żyfka-Zagrodzińska, 2021a, b). W składzie gatunkowym badanego drzewostanu dominowała sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*) w wieku około 60 lat i zwarciu 50% oraz czeremcha amerykańska (*Padus serotina*);
- badania parametrów fizykochemicznych wód Różanego Strumienia – codzienne pomiary stanów i przepływów, a także, z częstotliwością 1 raz na miesiąc, analizy składu chemicznego (Lenartowicz, 2021);
- monitoring parametrów fizykochemicznych wód podziemnych (1 raz na 2 miesiące) w 2 punktach pomiarowych: IGF2 i IGF4 (Marciniak, 2021).

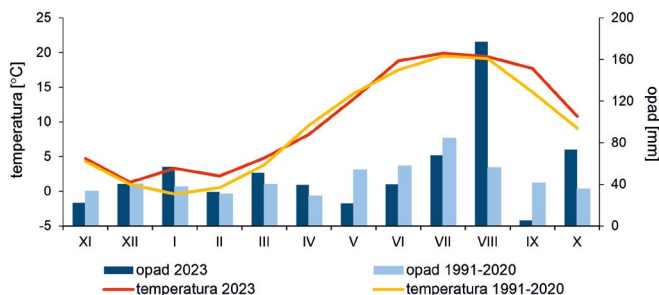
Analizy chemiczne próbek wody wykonano w Laboratorium Geoekologicznym Stacji ZMŚP Poznań-Morasko na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM oraz w Laboratorium Hydrochemicznym Stacji Geoekologicznej UAM w Storkowie. Pomiary pH i przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) oznaczono potencjometrycznie (CPC 411 Elmetron). Kationy: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} oraz Ca^{2+} (tylko dla próbek opadu) oznaczono przy użyciu spektrometrii absorpcji i emisji atomowej (AAS/AES, SpectrAA-20 plus firmy Varian). Jony Ca^{2+} , w próbkach wód powierzchniowych i podziemnych, oznaczono metodą miareczkowania kompleksometrycznego. Stężenia jonów NH_4^+ określono za pomocą spektrofotometru Nanocolor UV/VIS II Macherey-Nagel. Z kolei oznaczenia anionów SO_4^{2-} , NO_3^- i Cl^- przeprowadzono za pomocą chromatografii jonowej (DX-120 firmy Dionex).

Wyniki

Uwarunkowania termiczno-opadowe

Dostawa atmosferyczna w zlewni odgrywa istotną rolę w funkcjonowaniu geoekosystemu i w kształtowaniu obiegu wody. Zgodnie z klasyfikacją termiczną przyjętą w Zintegrowanym Monitoringu Środowiska Przyrodniczego rok hydrologiczny 2023 został zaliczony do lat ciepłych (Lorenc, 1998). Średnia roczna temperatura powietrza wyniosła $10,4^\circ\text{C}$ i była zbliżona do wartości z lat 2018-2020 i 2022 (od $10,3^\circ\text{C}$ do $10,7^\circ\text{C}$), jednocześnie przewyższając średnią z roku 2021 o $0,9^\circ\text{C}$. W ujęciu miesięcznym tylko kwiecień został sklasyfikowany jako miesiąc chłodny (średnia temperatura $8,2^\circ\text{C}$). Z kolei 5 miesięcy zaliczono jako ciepłe (anomalnie ciepły był wrzesień z temperaturą $17,7^\circ\text{C}$; ciepły był również styczeń oraz lekko ciepłe: luty, czerwiec i październik). Znaczniejsze odchylenia od normy wieloletniej dotyczyły opadów atmosferycznych. W roku hydrologicznym 2023 suma opadów wyniosła 628,4 mm, co kwalifikuje go jako rok wilgotny (o 17% powyżej średniej z wielolecia). Występowała przy tym duża zmienność miesięcznych sum opadów istotnie odbiegających od wartości typowych z wielolecia. Największe opady zanotowano w sierpniu (177,3 mm; 317% normy wieloletniej) oraz w październiku (73,4 mm; 208% normy). Z kolei najsuchszym miesiącem, z sumą opadów równą 5,3 mm, był wrzesień (ryc. 2). Do kategorii miesięcy suchych zaliczono również: listopad, maj i czerwiec. Podobnie jak w latach wcześniejszych, pokrywa śnieżna nie miała wpływu na retencję wody w zlewni (wystąpiła zaledwie w jednym dniu w grudniu).

Zdecydowanie najdłużej trwającą porą roku było lato (124 dni), z kolei termiczna zima w ogóle nie wystąpiła. Sezon wegetacyjny (ze średnią dobową temperaturą powietrza $\geq 5^\circ\text{C}$)

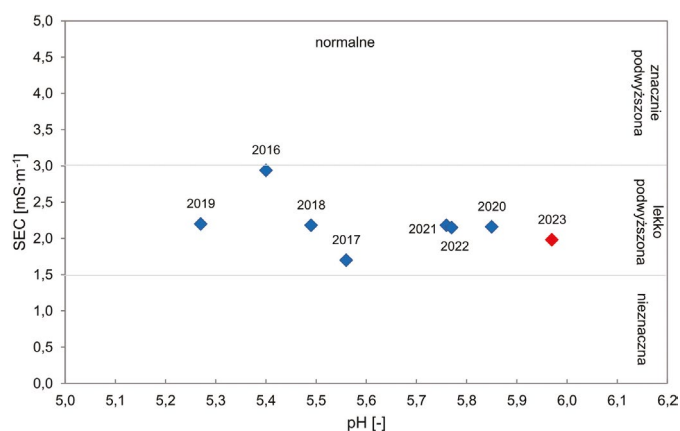


Ryc. 2. Miesięczne sumy opadów i średnie miesięczne temperatury powietrza w roku hydrologicznym 2023 w zlewni Różanego Strumienia na tle wartości z wielolecia 1991-2020 w stacji IMGW-PIB Poznań Ławica
Monthly precipitation totals and average monthly air temperatures in the Różany Strumień catchment during the 2023 hydrological year set against the 1991-2020 multi-year values at the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute station Poznań Ławica

trwał 244 dni, od 18 marca do końca roku hydrologicznego i jego przedział był identyczny jak średni czas trwania z wielolecia. Z kolei okres intensywnej wegetacji (ze średnią dobową temperaturą wyższą niż 10°C) trwał 178 dni, od 24 kwietnia do 19 października.

Skład chemiczny opadów atmosferycznych

Opady atmosferyczne na otwartej przestrzeni w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko cechowały się niską mineralizacją i normalnym odczynem. Średnia wartość przewodności elektrolitycznej w 2023 r. wyniosła $1,97 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ i była niższa w porównaniu do lat poprzednich (średnia z wielolecia 2016-2022 wyniosła $2,25 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$). Pomimo tego jej wartości nadal utrzymały się na poziomie lekko podwyższonym. Z kolei pH (5,97) było najwyższe ze wszystkich wartości uzyskanych w latach 2016-2022, mieszcząc się nadal na poziomie odczynu normalnego (ryc. 3).



Ryc. 3. Wartość pH i przewodność elektrolityczna właściwa opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023 na tle wielolecia 2016-2022
The pH and specific electrical conductivity of precipitation in the Różany Strumień catchment in the hydrological year 2023 in the context of the 2016-2022 multi-year period

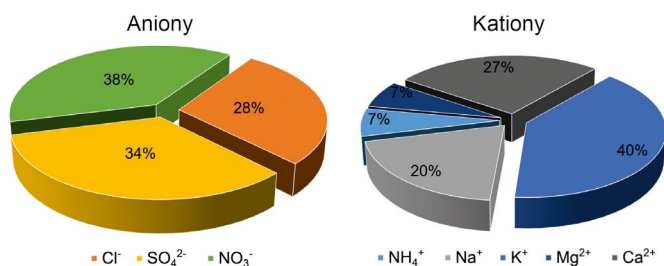
Badania składu chemicznego opadów atmosferycznych na otwartej przestrzeni wykazały, że wśród anionów największy udział procentowy w strukturze opadów miały azotany, siarczany i chlorki, a wśród kationów dominowały jony amonowe i wapń (ryc. 4). W stosunku do lat poprzednich, w 2023 r. odnotowano niższe stężenia badanych jonów. Spadki stężeń jonów azotanowych i siarczanowych przełożyły się na wartość wskaźnika udziału czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów (stosunek średnich ważonych stężeń jonów NO_3^- do średnich ważonych stężeń jonów SO_4^{2-}), osiągając najwyższą wartość (1,14) w porównaniu do wyników uzyskanych w latach 2016-2022. Tym samym po raz pierwszy od początku prowadzonych pomiarów jego wartość przekroczyła 1. Wynika z tego, że udział jonów siarczanowych obniżył się w stosunku do jonów azotanowych w zakwaszaniu wód opadowych w zlewni Różanego Strumienia. Ponadto w 2023 r. odnotowano najniższe stężenia siarczanów w opadach atmosferycznych (ich wartości obniżają się od 2021 r.). Wyniki te są zgodne z ogólną tendencją zwiększającej się roli NO_3^- nad SO_4^{2-} w Polsce północnej i zachodniej, świadczącej m.in. o większym wpływie zanieczyszczeń komunikacyjnych na kwasowość opadów (Majewski i Kostrzewski, 2023).

W zlewni Różanego Strumienia po raz drugi w ośmioletniej serii pomiarowej stwierdzono większy udział NO_3^- w zakwaszaniu opadów. Tendencja czasowa wskaźnika udziału czynników kwasogennych ukazuje większą presję w zakwaszaniu opadów czynnika związanego z zanieczyszczeniami komunikacyjnymi (azotany) niż z zanieczyszczeniami pochodzącymi ze spalania paliw kopalnych (siarczany) (Majewski i Kostrzewski, 2023).

W strukturze średnich rocznych stężeń poszczególnych składników rozpuszczonych w opadach najczęściej występowało jonów N-NH_4^+ (23%), następnie Ca^{2+} i N-NO_3^- (po 16%) oraz S-SO_4^{2-} (14%), Na (11%) i Cl^- (12%). Mniejszy udział stwierdzono dla jonów Mg^{2+} (4%) i K^+ (4%). Wysokie stężenia jonów zasadowych (Ca^{2+} i N-NH_4^+), które są głównymi czynnikami wpływającymi na neutralizację opadów atmosferycznych (Keresztesi et al., 2020), wpłynęły również na uzyskiwanie wyższych wartości pH wód opadowych w 2023 r. ($\text{pH} = 5,97$).

O regionalnym zróżnicowaniu antropogenicznego zanieczyszczenia opadów atmosferycznych w strefach krajobrazowych Polski można wnioskować na podstawie wartości stężenia jonów chlorkowych i sodowych. Zawartość sodu oraz chlorków w opadzie atmosferycznym zależy głównie od napływu mas powietrza polarnomorskiego, zasobnego w aerozole pochodzenia morskiego (Cl^- i Na^+) (Majewski i Kostrzewski, 2023).

Stężenia chlorków i sodu w opadach w zlewni Różanego Strumienia są na wyższym poziomie niż powinno wynikać to z ich naturalnego pochodzenia i tendencji w zachodnim



Ryc. 4. Procentowy udział kationów i anionów w opadzie atmosferycznym w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023

Percentage shares of cation and anion in precipitation in the Różany Strumień catchment during the 2023 hydrological year

transekcje południkowym. Stężenia tych jonów powinny zmniejszać się wraz z oddalaniem od morza, które jest ich głównym naturalnym źródłem w opadach atmosferycznych. Przyczyną takiej sytuacji było zanieczyszczenie opadów w zlewni Różanego Strumienia spowodowane oddziaływaniem aglomeracji poznańskiej.

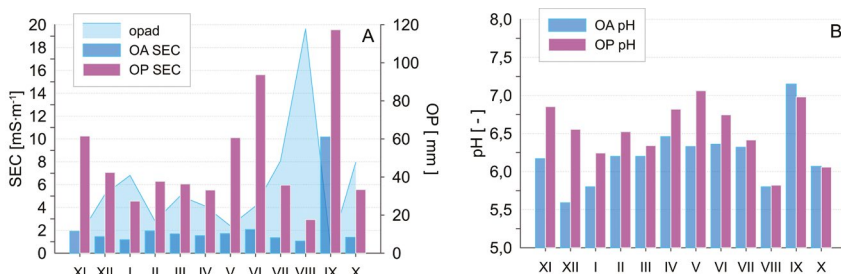
Depozycja atmosferyczna w roku hydrologicznym 2023, przy uwzględnieniu rocznej sumy opadów na poziomie 628,4 mm, wyniosła 2,17 t · km⁻². Wśród anionów największą depozycją charakteryzowały się: chlorki (465 mg Cl · m⁻²), następnie siarczany (250 mg S-SO₄²⁻ · m⁻²) i azotany (250 mg N-NO₃⁻ · m⁻²). Depozycja kationów przedstawiała się następująco: jony amonowe (356 mg N-NH₄⁺ · m⁻²), wapń (343 mg Ca²⁺ · m⁻²), sód (290 mg Na⁺ · m⁻²), potas (166 mg K⁺ · m⁻²) i magnez (51 mg Mg²⁺ · m⁻²).

Transformacja składu chemicznego opadów atmosferycznych w drzewostanie sosnowym

W kontakcie z powierzchnią roślin wody opadowe przepływające przez strefę koron drzew w postaci opadu podkoronowego zmieniają swoje właściwości fizykochemiczne i skład chemiczny. Zmiany te najczęściej przejawiają się wzrostem stężeń jonów oraz modyfikacją kwasowości wód opadowych (Herrmann et al., 2006; Kowalska et al., 2016; Kozłowski i Józwiak 2017).

W roku hydrologicznym 2023 suma roczna opadu podkoronowego wyniosła 408,7 mm, co stanowiło 65,0% sumy rocznej opadu na terenie otwartym. Wartość ta określana jest mianem przepuszczalności drzewostanu i w poszczególnych miesiącach mieściła się w przedziale od 49,2% do 77,3%. Rozkład wysokości opadu podkoronowego był ściśle zależny od wysokości opadu na terenie otwartym. Zależność ta miała postać funkcji liniowej; wartość współczynnika korelacji $r=0,996$ ($n=12$) wskazywała na silną dodatnią zależność między badanymi zmiennymi.

Średnia ważona roczna przewodność elektrolityczna (\pm odchylenie standardowe) wyniosła $5,9 \pm 4,7$ mS · m⁻¹ i była trzykrotnie większa od obserwowanej na terenie otwartym. Według klasyfikacji Jansena et al. (1988) jest to wartość silnie podwyższona. W skali roku wartości dla poszczególnych miesięcy mieściły się w zakresie od 2,9 do 19,6 mS · m⁻¹, przy czym najwyższe wartości odnotowano w czasie występowania niskich sum opadów



Ryc. 5. Rozkład przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) opadu na terenie otwartym (OA SEC) i opadu podkoronowego (OP SEC) na tle sum opadów podkoronowych (opad) (A) oraz rozkład pH opadu na terenie otwartym (OA pH) i opadu podkoronowego (OP pH) (B)

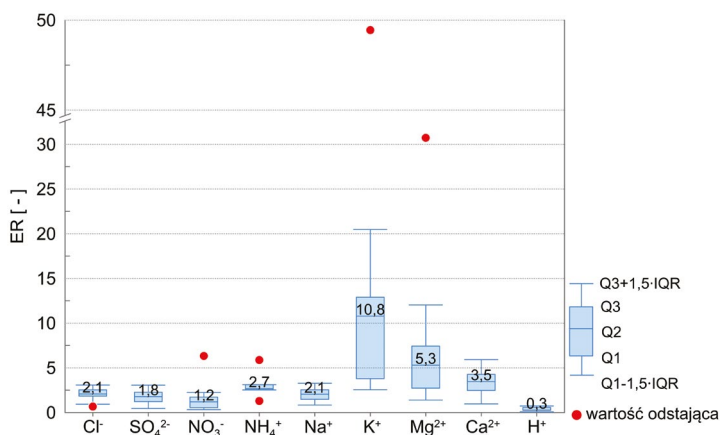
Distribution of specific electrical conductivity (SEC) of bulk precipitation (OA SEC) and throughfall (OP SEC) against the background of throughfall totals (opad) (A) and pH distribution of bulk precipitation (OA pH) and throughfall (OP pH) (B)

($r=-0,607$; $n=12$) (ryc. 5A). Czasowy rozkład SEC w opadzie podkoronowym był skorelowany z rozkładem obserwowanym dla opadu na terenie otwartym ($r=0,790$; $n=12$).

Średnie ważone roczne pH opadu podkoronowego (6,13) zostało zaliczone, wg wspomnianej klasyfikacji, do wartości lekko podwyższonych i było wyższe o 0,17 jednostki od pH opadu na terenie otwartym. W poszczególnych miesiącach pH opadu podkoronowego mieściło się w zakresie od 5,82 (sierpień) do 7,06 (maj) i poza wrześniem oraz październikiem było wyższe od pH opadu na terenie otwartym (ryc. 5B).

Łączna roczna depozycja jonów pod koronami drzew wyniosła $8,65 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ i była prawie czterokrotnie wyższa od obserwowanej na terenie otwartym. W przypadku wszystkich badanych jonów, poza H^+ , uzyskane ładunki pod koronami drzew przekraczały wartości obserwowane na terenie otwartym. Miarą określającą stopień zmian właściwości chemicznych wód opadowych w zbiorowiskach leśnych jest współczynnik wzbogacenia (ang. enrichment ratio, ER). Stanowi on iloraz ładunku danego jonu w opadzie pod koronami drzew do ładunku tego samego jonu w opadzie na terenie otwartym.

Wartości większe od jedności wskazują na wzbogacenie opadu podkoronowego względem opadu na terenie otwartym, natomiast mniejsze – na zubożenie w zakresie danego jonu. W roku hydrologicznym 2023 największe wartości ER obserwowano dla potasu, magnezu oraz wapnia (ryc. 6). Obecność jonów K^+ oraz Mg^{2+} związana była z procesami wymywania tych jonów z organów asymilacyjnych (Herrmann et al., 2005; Kozłowski et al., 2012, 2020). Udział tych procesów w badanym drzewostanie sosnowym określono na 62% całkowitej depozycji K^+ na dnie lasu (Kruszyk i Major, 2017). Wartości ER zbliżone do jedności odnotowano dla azotanów oraz siarczanów. Tylko w przypadku H^+ depozycja pod koronami drzew była mniejsza od obserwowanej na terenie otwartym. Łączny roczny ładunek azotu wniesiony do gleby z opadem podkoronowym wyniósł $14 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, z czego forma amonowa stanowiła 75%. Wartość ta nie przekroczyła poziomów krytycznych ($15\text{-}20 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) podawanych przez Małka i Astela (2008) dla zbiorowisk lasów iglastych.



Ryc. 6. Miesięczne wartości współczynnika wzbogacenia ER

Q1 – I kwartył, Q2 – II kwartył, Q3 – III kwartył, IQR – rozstęp międzykwartyłowy; wartości podane na wykresie oznaczają mediany

Monthly values of the ER enrichment ratio

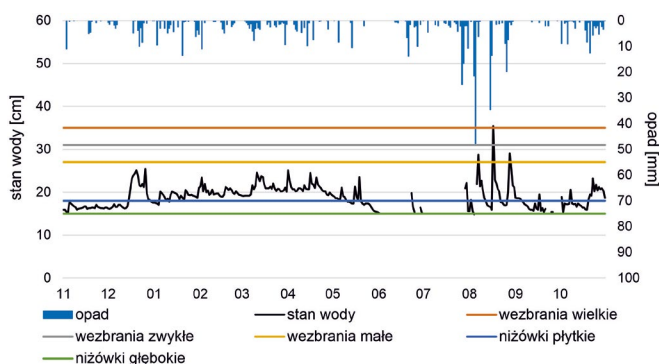
Q1 – first quartile, Q2 – second quartile, Q3 – third quartile, IQR – interquartile range; values in the chart indicate medians

Wody powierzchniowe

Sytuacja hydrologiczna w Różanym Strumieniu była bezpośrednio uzależniona od warunków hydrometeorologicznych. Stosunkowo niskie stany, mieszczące się w przedziale od 14 do 35 cm, ze średnią 19 cm powyżej zera łaty wodowskazowej (ryc. 7), stanowiły kontynuację niekorzystnej sytuacji hydrologicznej zapoczątkowanej w półroczu letnim 2018 roku. Wyższe stany wód wystąpiły w grudniu oraz w sierpniu i były następstwem wysokich sum opadów atmosferycznych.

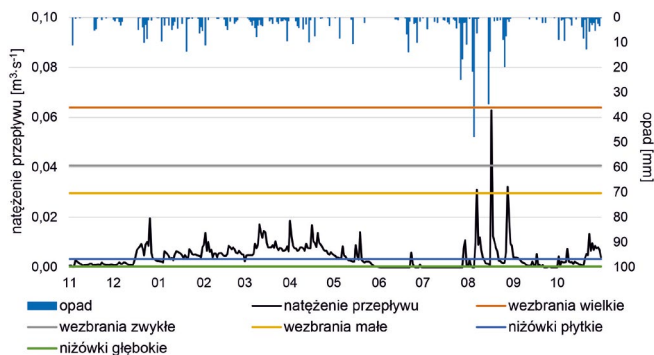
Przebieg hydrogramu odpływu odzwierciedla charakter zmian stanów wody w Różanym Strumieniu. W roku 2023 wartości przepływów mieściły się w zakresie od $0,0000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,0628 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średni roczny przepływ wyniósł $0,0043 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co stanowiło wartość nieco niższą niż w suchych latach 2019-2022 (średnio $0,0054 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz o około 55% mniejszą w porównaniu ze średnią z okresu 2015-2018. Roczna amplituda względna przepływów w 2023 r. osiągnęła wartość 14,58 – najwyższą od początku pomiarów, czyli od 2015 r. (średnia dla lat 2015-2022 kształtuje się na poziomie 8,94). Progi przepływów odpowiadających wezbraniom i niżówkom wyznaczono zgodnie z kryteriami zaproponowanymi przez Ozgę-Zielińską i Brzezińskiego (1994). Górną granicę występowania płytkiej niżówki określono dla przepływu $0,0033 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a dla niżówki głębokiej – $0,0003 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Z kolei dolny próg wezbrania małego wyniósł $0,0296 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, wezbrania zwykłego – $0,0407 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a wezbrania wielkiego $0,0639 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przepływy poniżej wartości granicznej wystąpienia niżówki odnotowano przez 190 dni, z czego 73 dni miały charakter niżówki głębokiej. Ponadto przez 62 dni (od czerwca do października) rejestrowano zerowy przepływ wody (24 dni w czerwcu, 28 dni w lipcu, 2 dni w sierpniu, 7 dni we wrześniu i 1 dzień w październiku). W okresie od 2 czerwca do 28 lipca przepływ wystąpił tylko w 5 dniach i był następstwem opadów o dobowej sumie ponad 10 mm. Wezbrania wystąpiły w 3 dniach, w tym jednokrotnie pojawiło się wezbranie zwykłe – 17 sierpnia. Minimalny przepływ w ciągu roku wyniósł $0,0000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i taka sytuacja utrzymuje się już od 2018 r. (ryc. 8).

Najwyższe wartości średniego miesięcznego odpływu jednostkowego odnotowano w marcu, kwietniu oraz w sierpniu. Poza sierpniem, maksymalne dobowe wartości



Ryc. 7. Średnie dobowe wartości stanów wody [cm] na tle sum dobowych opadów atmosferycznych [mm] w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023

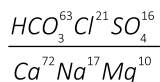
Mean daily water levels [cm] against daily precipitation totals [mm] in the Różany Strumień catchment during the 2023 hydrological year



Ryc. 8. Średnie dobowe wartości przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] na tle dobowych sum opadów atmosferycznych [mm] w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023
Mean daily discharge [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] against daily precipitation totals [mm] in the Różany Strumień catchment during the 2023 hydrological year

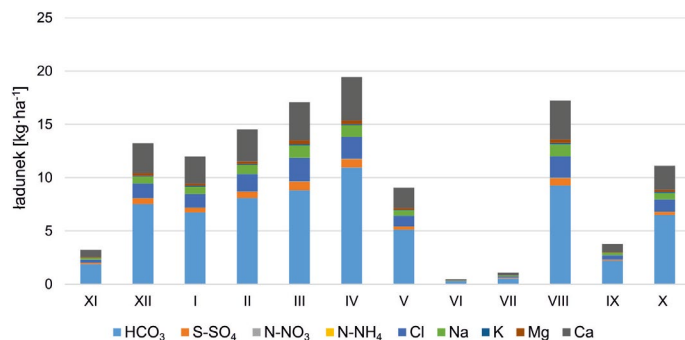
odpływu jednostkowego nie przekraczały $0,0030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Z kolei najwyższy dobowy odpływ jednostkowy, równy $0,0081 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, wystąpił w sierpniu w związku z intensywnymi opadami poprzedzającymi to zdarzenie. Minimalne dobowe odpływy jednostkowe wyniosły $0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ i rejestrowano je w dniach bez przepływu wody w Różanym Strumieniu. Brak takich dni odnotowano tylko w okresie od grudnia do kwietnia (ryc. 8).

Wody Różanego Strumienia charakteryzowały się lekko zasadowym odczynem (średnia ważona pH – 7,83). Wyniki pomiarów przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) w próbkach pozwoliły zaliczyć te wody do wysoko zmineralizowanych. Średnia ważona wartość przewodności wyniosła $91,5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$, przy niewielkiej zmienności ($\text{SD} \pm 16,0 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$). Wysoka wartość SEC związana była m.in. z przekształceniami antropogenicznymi w zlewni, jak również z dostawami zanieczyszczonych wód do cieków oraz ze sptywami powierzchniowymi z obszarów rolniczych (Majewski i Kostrzewski, 2023). Według klasyfikacji Altowskiego-Szwieca wody Różanego Strumienia należą do typu hydrogeochemicznego wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowego.



Sumy ładunków wszystkich jonów w 2023 r. były porównywalne z latami 2019-2020, mimo wyższych wartości odpływu w tych latach. Struktura jonów nie uległa zmianie i na podstawie uzyskanych wartości stwierdzono, że największymi ładunkami wśród anionów odznaczały się jony wodorowęglanowe, następnie chlorki i siarczany, a wśród kationów – wapń, sód i magnez. W przypadku większości jonów zaobserwowano zależność wielkości ich ładunku od przepływu. W miesiącach letnich i jesiennych przepływów odnotowano obniżone wartości ładunków, co wiąże się z mniejszym wskaźnikiem odpływu. Ponadto, najniższe ładunki wystąpiły w miesiącach o najniższych warstwach odpływu – w czerwcu, lipcu i we wrześniu (ryc. 9).

Na podstawie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Dz.U. 2021, poz. 1475) dokonano oceny

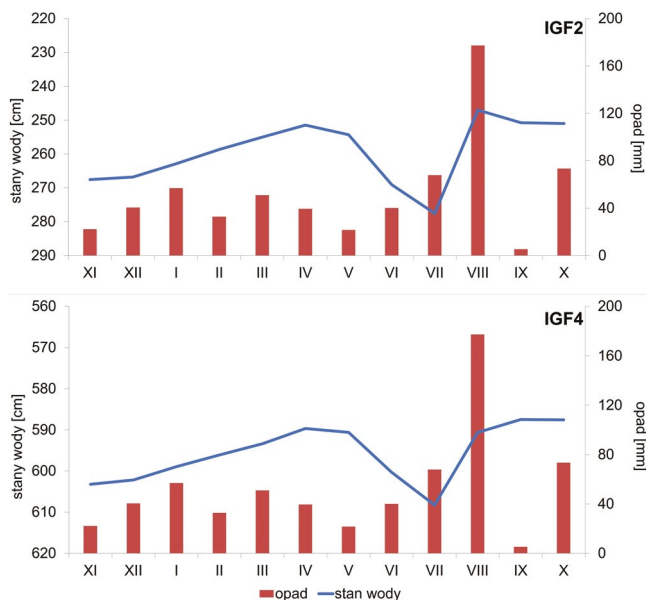


Ryc. 9. Miesięczne ładunki w wodach Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023
Monthly ions loads in the waters of Różany Strumień during the hydrological year 2023

jakości wód Różanego Strumienia. Z 12 wskaźników fizykochemicznych dwa (Na i K) nie podlegały klasyfikacji w rozporządzeniu, sześć zaliczono do I klasy czystości (pH, Mg, S-SO₄, N-NO₃, PO₄ i N-NH₄), a cztery były poza III klasą czystości (przewodność elektrolityczna, HCO₃, Ca i Cl). W porównaniu do 2022 r. charakterystyki badanych parametrów nie uległy zmianom. Na tej podstawie jakość wód Różanego Strumienia określono jako poniżej stanu dobrego.

Wody podziemne

Roczny przebieg miesięcznych sum opadów atmosferycznych determinował zmienność średnich miesięcznych stanów wód podziemnych w 2023 r. W wyniku występowania wilgotnych miesięcy zimowych obserwowano systematyczny wzrost poziomu zwierciadła wód w półroczu zimowym. Z kolei niższe opady wiosną skutkowały znacznym obniżeniem stanów. Skrajnie wilgotny sierpień spowodował przywrócenie stanów do poziomu sprzed lata 2022 r. W 2023 r. amplitudy średnich miesięcznych stanów były niższe niż w roku 2022 i wyniosły 30,5 cm w piezometrze IGF2 oraz 20,8 cm w piezometrze IGF4 (ryc. 10). W obu stanowiskach pomiarowych (IGF2 i IGF4) średnie stany wód podziemnych w 2023 r. utrzymywały się na równie niskim poziomie jak w czterech poprzednich latach. Niskie stany były następstwem dwóch suchych i bardzo ciepłych lat 2018 oraz 2019. Korzystniejsza sytuacja opadowa w 2020 r. nie przełożyła się na zauważalną poprawę warunków hydrologicznych, co można wiązać z systematycznym wzrostem średniej rocznej temperatury powietrza, prowadzącym do intensywniejszej ewapotranspiracji. Stosunkowo niskie sumy opadów atmosferycznych w 2021 i 2022 r. oraz utrzymujące się wysokie średnie roczne temperatury również nie wpłynęły korzystnie na stany wód podziemnych. W 2023 r. zarejestrowano najniższe minimalne stany wód od 2016 r. Korzystna sytuacja pluwalna pod koniec 2023 r. może skutkować odbudową zasobów wód podziemnych w kolejnych miesiącach. W roku 2023, w punkcie pomiarowym IGF2, zwierciadło wód podziemnych przez około połowę roku (179 dni) utrzymywało się w strefie średnich stanów. W pozostałych miesiącach (głównie od listopada do lutego oraz w czerwcu i w lipcu) poziom wód pozostawał w strefie stanów niskich. Wysokie stany zwierciadła odnotowano jedynie przez 4 dni w sierpniu. W punkcie IGF4 zarejestrowano większą liczbę dni z niskim stanem



Ryc. 10. Średnie miesięczne stany wód podziemnych i miesięczne sumy opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023
Mean monthly groundwater levels and monthly precipitation totals in the Różany Strumień catchment during the 2023 hydrological year

wód (257) i 108 dni ze stanem średnim. Podobnie jak w dwóch poprzednich latach, w tym punkcie pomiarowym nie wystąpiły dni zaliczone do strefy wysokiej wody.

W porównaniu z okresem 2016-2022 miesiące od listopada do lipca 2023 r. charakteryzowały się wyraźnie obniżonymi średnimi poziomami wód podziemnych. W tym okresie miesięczne wartości były niższe średnio o 19 cm w piezometrze IGF2 i o 16 cm w piezometrze IGF4. Największe ujemne odchylenia zanotowano w lipcu (28 cm dla IGF2 i 26 cm dla IGF4). Po wystąpieniu intensywnych opadów w sierpniu sytuacja uległa poprawie – w punkcie IGF2 odnotowano dodatnie odchylenie, natomiast w IGF4 było ono nieznacznie ujemne. We wrześniu i w październiku w obu punktach odchylenia nie przekraczały 1 cm. W skali całego roku hydrologicznego 2023 zwierciadło wód podziemnych w obu piezometrach pozostawało poniżej średnich stanów wód podziemnych (SGW) z okresu 2016-2022. Jedynie w sierpniu w piezometrze IGF2 wystąpiły stany powyżej średnich stanów siedmioletnich. W obu punktach pomiarowych w czerwcu i w lipcu, a w punkcie IGF4 również od listopada do stycznia, rejestrowano stany niższe od średnich niskich wartości z lat 2016-2022.

Typy hydrogeochemiczne wód podziemnych, zgodnie z klasyfikacją Altowskiego-Szwieca (Macioszczyk, 1987), w obu piezometrach określono jako wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowe ze znaczną mineralizacją wynoszącą ponad $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (wody słodkie). Na podstawie średnich wartości parametrów fizykochemicznych badanych wód podziemnych określono ich klasę monitoringową wg Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz. U. 2019, poz. 2148). W porównaniu do roku poprzedniego żaden z parametrów nie uległ zmianie. Średnie roczne

ilości badanych parametrów mieściły się w I klasie jakości wód podziemnych z wyjątkiem przewodności elektrolitycznej właściwej, siarczanów i chlorków, które zaliczono do II klasy czystości oraz wapnia przyporządkowanego do III klasy (tab. 1).

Na podstawie uzyskanych klas jakości wód określono stan chemiczny wód podziemnych. W przypadku I, II lub III klasy czystości stan chemiczny ocenia się jako dobry (wg Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r.). Dlatego w zlewni Różanego Strumienia stan chemiczny wód podziemnych określono jako dobry.

Tabela 1. Wybrane wskaźniki fizykochemiczne wód podziemnych i określone dla nich klasy jakości wód w piezometrach IGF 2 i IGF 4 w roku hydrologicznym 2023
Selected physico-chemical indicators of groundwater and their corresponding water quality classes at IGF 2 and IGF 4 piezometers during the hydrological year 2023

Punkt pomiar.	pH	SEC	Ca	Na	Mg	K	PO ₄	HCO ₃	Cl	S-SO ₄	N-NO ₃	N-NH ₄	Mineralizacja	Stan chemiczny zlewni
	[-]	[mS · m ⁻¹]	[mg · dm ⁻³]											
IGF 2	7,01	96,2	152,5	43,2	12,4	3,78	0,05	410,6	79,91	30,84	0,44	0,06	733,75	dobry
	Klasa													
	I	II	III	I	I	I	I	III	II	II	I	I		
IGF 4	7,01	98,2	159,9	43,1	13,5	2,97	0,05	409,4	83,81	32,30	0,86	0,04	745,85	dobry
	Klasa													
	I	II	III	I	I	I	I	III	II	II	I	I		

Podsumowanie

Funkcjonowanie geosystemu zlewni Różanego Strumienia w 2023 r. uzależnione było przede wszystkim od panujących warunków hydrometeorologicznych. Analizowany rok hydrologiczny zaliczono do kategorii lat ciepłych (Lorenc, 1998), a jego średnia roczna temperatura powietrza, wynosząca 10,4°C, była porównywalna z latami 2018-2020 i 2022. Roczna suma opadu atmosferycznego wyniosła 628,4 mm (rok wilgotny) i była wyższa od normy z wielolecia o 17%. Opady cechowały się dużą zmiennością sum miesięcznych, odbiegających znacząco od średnich przebiegów wieloletnich.

Opady atmosferyczne na otwartej przestrzeni w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko cechowały się niską mineralizacją i normalnym odczynem. Badania składu chemicznego wykazały, że wśród anionów największy udział procentowy w strukturze opadów miały azotany, siarczany i chlorki, a wśród kationów dominowały jony amonowe i wapń.

Pomimo straty wody w trakcie przenikania opadów przez korony drzew, sumaryczny ładunek jonów przekroczył prawie czterokrotnie wartości obserwowane na terenie otwartym.

Wyniki badań prowadzonych w zbiorowiskach lasów iglastych wskazują na wzrost kwasowości wód opadowych (Pajuste et al., 2006; Kozłowski et al., 2012; Kowalska et al. 2016). W badanym drzewostanie procesy zakwaszania nie wystąpiły. Wartości pH były wyższe od obserwowanych na terenie otwartym. Był to efekt obecności jonów alkalicznych, których występowanie w opadzie podkoronowym należy łączyć z procesami wymywania

z organów asymilacyjnych (potas, magnez) oraz wypłukiwania przez opad zanieczyszczeń pyłowych zgromadzonych na powierzchniach roślin (magnez, wapń).

Niskie stany Różanego Strumienia, mieszczące się w przedziale od 14 do 35 cm, ze średnią 19 cm powyżej zera łaty wodowskazowej, stanowiły kontynuację niekorzystnej sytuacji hydrologicznej zapoczątkowanej w półroczu letnim 2018 r. Wyższe stany wód wystąpiły w grudniu oraz w sierpniu i były następstwem wysokich sum opadów atmosferycznych. Przepływy w 2023 r. mieściły się w przedziale od $0,0000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,0628 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średni roczny przepływ, który wyniósł $0,0043 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, był nieznacznie niższy niż w suchych latach 2019-2022 (średnio $0,0054 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) i zdecydowanie niższy niż w latach wcześniejszych (o 55% w stosunku do średniej z okresu 2015-2018).

Wody Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023 charakteryzowały się lekko zasadowym odczynem (pH 7,83), a średnia ważona wartość przewodności elektrolitycznej właściwej wyniosła $91,5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$, co pozwoliło zaliczyć te wody do wysoko zmineralizowanych. Według klasyfikacji Altowskiego-Szwieca wody Różanego Strumienia należały do typu hydrogeochemicznego wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowego. Z 12 badanych wskaźników fizykochemicznych dwa (Na i K) nie podlegały klasyfikacji w rozporządzeniu, sześć zaliczono do I klasy czystości, a cztery były poza III klasą czystości. Na tej podstawie jakość wód Różanego Strumienia określono jako poniżej stanu dobrego.

Badania składu chemicznego wód podziemnych wykazały, że w porównaniu do roku poprzedniego żaden z parametrów nie uległ zmianie. Średnie roczne ilości badanych parametrów mieściły się w I klasie jakości wód podziemnych z wyjątkiem przewodności elektrolitycznej właściwej, siarczanów i chlorków, które zaliczono do II klasy czystości oraz wapnia przyporządkowanego do III klasy. Na podstawie uzyskanych klas jakości stan chemiczny wód podziemnych w zlewni Różanego Strumienia określono jako dobry. Typy hydrogeochemiczne wód podziemnych w obu piezometrach były takie same – wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowe – ze znaczną mineralizacją wynoszącą ponad $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Skrócony bilans wodny w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023 wskazuje na znaczną przewagę dopływu atmosferycznego nad odpływem rzeczny (610,8 mm), co świadczy o dużym potencjale retencyjnym analizowanego ekosystemu (tab. 2). Bilans denudacyjny wykazał straty rzędu $-48,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, co wskazuje na przewagę procesów eksportu materii mineralnej ze zlewni, głównie w postaci jonów wapnia i chlorków. Odmienny charakter wykazał bilans jonów biogennych, w którym wystąpił ładunek dodatni ($16,0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), związany głównie z obecnością azotanów i jonów amonowych. Łączny bilans materii rozpuszczonej w zlewni był ujemny ($-32,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), co potwierdza przewagę procesów wymywania nad akumulacją składników chemicznych. Zwiększony odpływ materii rozpuszczonej ze zlewni charakteryzującej się silną presją antropogeniczną wiąże się z większym udziałem terenów użytkowanych rolniczo, które z kolei wpływają na szybsze odprowadzanie substancji rozpuszczonych ze zlewni. Ujemny bilans jonów pochodzących z procesów denudacyjnych jest efektem przewagi ługowania gleb, wietrzenia chemicznego i dalszego odprowadzania fluwialnego nad ich dostawą z opadów atmosferycznych. Odpływ powierzchniowy ze zlewni stanowi główną drogę odprowadzania substancji rozpuszczonych (Tylkowski i Kostrzewski, 2017).

Analizę bilansu denudacyjnego zlewni Różanego Strumienia można uznać jako dobry wskaźnik określania wielkości presji antropogenicznej, zwłaszcza jako indikator nadmiernego wprowadzania biogenów (z nawozami i ściekami bytowymi) do środowiska przyrodniczego (Major et al., 2018).

Tabela 2. Skrócony bilans wodny i bilans materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023
Summary water balance and dissolved matter balance in the Różany Strumień catchment during the 2023 hydrological year

Rodzaj bilansu	Parametr	Wartość
Składowe obiegu wody	P – opad atmosferyczny [mm]	628,4
	H – odpływ rzeczny [mm]	17,6
	P-H [mm]	610,8
Bilans jonów denudacyjnych [kg · ha ⁻¹]	SO ₄ ²⁻	-6,8
	Cl ⁻	-9,3
	Ca ²⁺	-26,4
	Mg ²⁺	-2,0
	Na ⁺	-4,1
	Suma JD	-48,6
Bilans jonów biogenych [kg · ha ⁻¹]	NO ₃ ⁻	10,3
	NH ₄ ⁺	4,6
	K ⁺	1,2
	Suma JB	16,0
	Bilans materii rozpuszczonej [kg · ha ⁻¹]	Suma JB+JD

Realizacja programów pomiarowych w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko pozwoliła określić aktualny stan i funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2023 pod wpływem silnej presji antropogenicznej. Badania wykonywane w kolejnych latach umożliwią wykazanie związków przyczynowo-skutkowych, ukazanie tendencji zmian wybranych komponentów środowiska geograficznego oraz sformułowanie prognoz krótko- i długoterminowych pod kątem zagrożeń środowiska małej zlewni miejskiej wynikających ze wzrastającej presji antropogenicznej i większej dostawy zanieczyszczeń. Wyniki monitoringu zintegrowanego realizowane w zlewni Różanego Strumienia stanowią dobre uszczegółowienie monitoringu regionalnego oraz służą ochronie dziedzictwa przyrodniczego zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Degórska, A., & Żyfka-Zagrodzińska, E. (2021a). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program C1 – Chemizm opadów atmosferycznych. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 100-111). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Degórska, A., & Żyfka-Zagrodzińska, E. (2021b). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program C2 – Chemizm opadu podkoronowego. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 111-120). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.

- Galon, R. (1972). *Geomorfologia Polski* (T. 2, Niż Polski). Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Herrmann, M., Pust, J., & Pott, R. (2006). The chemical composition of throughfall beneath oak, birch and pine canopies in Northwest Germany. *Plant Ecology*, 184(2), 273-285.
<https://doi.org/10.1007/s11258-005-9072-5>
- Jansen, W., Block, A., & Knaack, J. (1988). Acid rain. History, generation, results. *Aura*, 4, 18-19.
- Kejna, M. (2021). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program A1 – Meteorologia. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 72-91). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Keresztési, A., Nita, I.A., Birsan, M.V., Bodor, Z., Pernyeszi, T., Micheu, M.M., & Szép, R. (2020). Assessing the variations in the chemical composition of rainwater and air masses using the zonal and meridional index. *Atmospheric Research*, 237, 104846.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104846>
- Kostrzewski, A., & Majewski, M. (red.). (2021). *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego: organizacja, system pomiarowy, metody badań, wytyczne do realizacji*. Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Kostrzewski, A., Mazurek, M., & Stach, A. (1995). *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań*. Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Kowalska, A., Astel, A., Boczoń, A., & Polkowska, Ż. (2016). Atmospheric deposition in coniferous and deciduous tree stands in Poland. *Atmospheric Environment*, 133, 145-155.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.033>
- Kozłowski, R., & Józwiak, M. (2017). The transformation of precipitation in the tree canopy in selected forest ecosystems of Poland's Świętokrzyskie Mountains. *Przegląd Geograficzny*, 89(1), 133-153. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2017.1.7>
- Kozłowski, R., Józwiak, M., Józwiak, M., & Bochenek, W. (2012). Ocena wielkości wymywania jonów K^+ , Ca^{2+} i Mg^{2+} w wybranych drzewostanach w warunkach kwaśnej depozycji. *Sylwan*, 156(8), 607-615.
- Kozłowski, R., Kruszyk, R., & Małek, S. (2020). The effect of environmental conditions on pollution deposition and canopy leaching in two pine stands (West Pomerania and Świętokrzyskie Mountains, Poland). *Forests*, 11(5), 535. <https://doi.org/10.3390/f11050535>
- Kruszyk, R., & Major, M. (2017). Właściwości fizykochemiczne i skład chemiczny opadu podkoronowego w drzewostanie sosnowym na obszarze miejskim (zlewnia Różanego Strumienia, Poznań). *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 19(1), 69-79.
- Krygowski, B. (1961). *Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej. Cz. 1 Geomorfologia*. Warszawa: PTPN, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Komisja Fizjograficzna.
- Lenartowicz, M. (2021). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program H1 – Wody powierzchniowe rzeki. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 195-228). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.

- Lorenc, H. (1998). Ocena stopnia realizacji programu „Obserwacje meteorologiczne i badania klimatyczne w systemie zintegrowanego monitoringu środowiska” oraz synteza uzyskanych wyników badań za okres 1994-1997. W: A. Kostrzewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski. IX Sympozjum ZMŚP* (s. 113-119). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Macioszczyk, A. (1987). *Hydrogeochemia*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Majewski, M., & Kostrzewski, A. (2023). *Stan geoekosystemów Polski w 2022 roku*. Pobrane z: https://centrumzmsp.web.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2024/02/Raport_2022.pdf (20.07.2025).
- Major, M., Chudzińska, M., & Majewski, M. (2022). Wielkość dostawy wybranych zanieczyszczeń atmosferycznych i ich wpływ na jakość wód w zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w latach hydrologicznych 2016-2020. *Przegląd Geograficzny*, 94(4), 415-436. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2022.4.1>
- Major, M., Chudzińska, M., Majewski, M., & Zięba, M. (2018). Bilans materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2017. W: W. Bochenek, M. Kijowska-Strugała (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – Ocena funkcjonowania i kierunków zmian środowiska przyrodniczego Polski na podstawie wieloletnich badań stacjonarnych* (s. 175-182). Szymbark: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Major, M., Majewski, M., Olejarczyk, M., & Zięba, M. (2017). Stan i funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2016. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 19(1), 31-39.
- Małek, S., & Astel, A. (2008). Throughfall chemistry in a spruce chronosequence in southern Poland. *Environmental Pollution*, 155(3), 517-527. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.031>
- Manual for Integrated Monitoring. (1998). *International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems*. Helsinki: ICP IM Programme Centre. Pobrane z: <http://www.syke.fi/nature/icpim> (20.07.2025).
- Marciniak, M. (2021). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program F2 – Wody podziemne. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 175-188). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Ozga-Zielińska, M., & Brzeziński, J. (1994). *Hydrologia stosowana*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Pajuste, K., Frey, J., & Asi, E. (2006). Interactions of atmospheric deposition with coniferous canopies in Estonia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 112(1-3), 177-196.
- Richling, A., Solon, J., Macias, A., Balon, J., Borzyszkowski, J., & Kistowski, M. (red.). (2021). *Regionalna geografia fizyczna Polski*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz.U. 2019, poz. 2148).
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. (Dz.U. 2021, poz. 1475).
- Tylkowski, J., & Kostrzewski, A. (2017). *Stan geoekosystemów Polski w 2016 roku*. Pobrane z: https://centrumzmsp.web.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2016.pdf (13.08.2025).

Summary

The Różany Strumień catchment, located in the northern part of Poznań, is one of the research areas of the Integrated Monitoring of the Natural Environment (IMNE) programme and serves as a field laboratory of the Poznań-Morasko station. This is the first IMNE base station in Poland located within a large urban agglomeration and subjected to strong anthropogenic pressures. The 2023 hydrological year marked the eighth year of continuous monitoring in this urban catchment, with investigations carried out in accordance with twelve IMNE measurement programmes. The present paper discusses selected results that together enable an assessment of the functioning of the catchment geocosystem under the hydrometeorological conditions of 2023.

Meteorological observations showed that the hydrological year 2023 was classified as a warm year. The mean annual air temperature reached 10.4°C, comparable to the recent warm years of 2018-2020 and 2022, and clearly higher than the 1991-2020 long-term average. Only April was classified as a cool month, whereas five months were warm or very warm, including an exceptionally warm September. The annual precipitation total reached 628.4 mm, which was 17% above the long-term average. However, precipitation was extremely unevenly distributed throughout the year. Very wet months (August and October) alternated with extremely dry ones, most notably September with only 5.3 mm of rainfall. Snow cover was insignificant, occurring on a single day in December, and had no impact on catchment retention. The length of the thermal growing season (244 days) matched the multiannual mean, although the lack of thermal winter is a signal of the ongoing climatic shift.

Precipitation chemistry measurements revealed low mineralization and normal pH values, although conductivity remained slightly elevated compared to the long-term reference. Among the anions, nitrates, sulphates and chlorides dominated, whereas ammonium and calcium were the most abundant cations. Compared with previous years, the concentrations of nitrates and sulphates declined, with the nitrate-to-sulphate ratio exceeding unity for the first time, indicating a growing role of traffic-related emissions in precipitation acidity in western Poland. The role of forest canopies in modifying precipitation was also confirmed. Throughfall accounted for about 65% of bulk precipitation, and despite lower volumes, ion loads were nearly four times higher than those of open-field precipitation. This was particularly evident for potassium, magnesium and calcium, which are largely leached from assimilation organs or washed from dust deposits on the canopy surface. Contrary to common expectations that coniferous stands intensify precipitation acidity, the studied Scots pine stand contributed to neutralization instead due to elevated loads of alkaline ions.

Hydrological observations of the Różany Strumień indicated very low water stages and discharges, continuing the unfavorable situation observed since the summer of 2018. Water levels mostly ranged between 14 and 35 cm above the gauge zero, with higher values recorded only in December and August. Discharge fluctuated from zero to 0.0628 m³ · s⁻¹, with an annual mean of 0.0043 m³ · s⁻¹. This was lower than in the dry years 2019-2022 and more than 50% lower than the mean for 2015-2018. A record-high flow variability was noted, and zero-flow conditions occurred for 62 days, mostly in summer and early autumn. These extreme low flows were only occasionally interrupted by short-lived flood waves induced by intense rainfall.

The chemical composition of stream water was characterized by slightly alkaline pH (7.83) and high mineralization, with a mean specific electrical conductivity of $91.5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$. The waters belonged to the $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ hydrogeochemical type. Ion load calculations confirmed bicarbonates, chlorides and sulphates as the dominant anions, and calcium, sodium and magnesium as the main cations. According to national regulations, six of the twelve evaluated indicators corresponded to class I water quality, while four (including conductivity, bicarbonates, calcium and chlorides) were classified below class III. As a result, the overall ecological status of the stream was assessed as below good.

Groundwater levels in two observation wells reflected the pattern of atmospheric supply. After a favorable winter and very wet August, water tables increased, although generally remained at low levels comparable to those observed during the last four years. Both piezometers recorded the lowest minimum groundwater levels since 2016, a legacy of the extremely dry years 2018-2019 and intensified evapotranspiration driven by rising air temperatures. Hydrochemical analyses indicated $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ waters with mineralization above $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Most parameters corresponded to class I groundwater quality, with conductivity, sulphates and chlorides classified as class II, and calcium as class III. Accordingly, the overall chemical status of groundwater was assessed as good, in contrast to the surface waters of the catchment.

The annual water balance revealed a strong dominance of atmospheric input over river discharge (610.8 mm), highlighting the considerable retention capacity of the urban geoecosystem. The dissolved matter balance was negative ($-32.6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), with significant losses of calcium and chlorides, while the nutrient balance was positive ($+16.0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), dominated by nitrates and ammonium. These findings confirm the predominance of leaching processes over accumulation within the catchment and emphasize the role of both natural conditions and anthropogenic impacts in shaping material fluxes.

In conclusion, the functioning of the Różany Strumień catchment in 2023 was strongly controlled by variable hydrometeorological conditions and by the increasing anthropogenic pressure typical of urban areas. The study demonstrates the usefulness of integrated monitoring for identifying short-term responses and long-term trends in small urbanized catchments. Continued observations will provide the basis for detecting cause-effect relationships, recognizing environmental risks, and supporting sustainable management strategies under conditions of ongoing climate change and urban expansion.

