



## Wielkość dostawy wybranych zanieczyszczeń atmosferycznych i ich wpływ na jakość wód w zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w latach hydrologicznych 2016-2020

### *The level of supply of selected atmospheric pollutants and their impact on water quality in the urban catchment of Różany Strumień in Poznan, Poland, in hydrological years 2016-2020*

Maciej Major  Maria Chudzińska  Mikołaj Majewski 

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Stacja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego „Poznań-Morasko”

ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań

maciej.major@amu.edu.pl • maria.chudzinska@amu.edu.pl • mikolaj.majewski@amu.edu.pl

**Zarys treści.** Celem opracowania było przedstawienie wielkości i struktury wybranych zanieczyszczeń atmosferycznych dostarczanych głównie z opadem do zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu oraz określenie ich wpływu na skład chemiczny wody na kolejnych etapach jej obiegu. Badania realizowano w latach hydrologicznych 2016-2020 w ramach ogólnopolskiego programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) przy wykorzystaniu infrastruktury Stacji ZMŚP „Poznań-Morasko” Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Wymieniona jednostka jest pierwszą Stacją Bazową w programie ZMŚP w Polsce zlokalizowaną w granicach dużej aglomeracji miejskiej. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że w badanej zlewni występuje dodatni bilans jonów biogennych, dostarczanych w wyniku działalności człowieka (np. poprzez nawożenie) –  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{K}^+$ . Z kolei pozostałe składniki chemiczne (jony denudacyjne) występujące w wodach krążących w zlewni cechują się ujemnym bilansem.

**Słowa kluczowe:** monitoring, zlewnia Różanego Strumienia, dostawa zanieczyszczeń, skład chemiczny, bilans jonowy, jakość wód.

**Keywords:** monitoring, Różany Strumień catchment, supply of pollutants, chemical composition, ion balance, water quality.

## Wstęp

Opad atmosferyczny na otwartej przestrzeni jest jednym z etapów obiegu wody, który jest elementem „wejścia” do geosystemu (Kostrzewski, 1986). Poprzez opad doprowadzane są do powierzchni terenu różne zanieczyszczenia pochodzące z atmosfery zarówno z bliskich, jak i dalekich odległości, którymi są najczęściej rozpuszczone składniki chemiczne. Dlatego ważne jest ilościowe określenie wybranych parametrów fizykochemicznych już na tym etapie obiegu wody, aby następnie móc określić zachodzące procesy w środowisku przyrodniczym (Major, 2012).

Obieg materii rozpuszczonej w zlewni jest odzwierciedleniem naturalnych procesów hydrometeorologicznych, hydrochemicznych oraz działalności antropogenicznej (Majewski i Kostrzewski, 2021). Przy określaniu bilansu denudacyjnego zlewni niezbędne jest

oszacowanie zarówno wielkości dopływu jak i odpływu ładunku substancji rozpuszczonych, będących funkcją ilości wody i stężenia substancji chemicznych (Szpiłkowska i Tytkowski, 2006).

Jednostką przestrzenną, która umożliwia całościowe ujęcie przepływu energii i obiegu materii, jest zlewnia rzeczna, względnie jeziorna (Kostrzewski et al., 1995). W analizowanym przypadku jest to zlewnia Różanego Strumienia. Stacjonarne badania terenowe zaplanowano i przeprowadzono przy wykorzystaniu infrastruktury Stacji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego „Poznań-Morasko” Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Jest to równocześnie pierwsza Stacja Bazowa w programie ZMŚP w Polsce działająca w granicach dużej aglomeracji miejskiej, charakteryzująca się silną presją antropogeniczną (Major et al., 2016).

Celem prowadzonych badań było rozpoznanie wielkości i struktury wybranych zanieczyszczeń atmosferycznych dostarczanych głównie z opadem do zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu i określenie ich wpływu na skład chemiczny wody na kolejnych etapach jej obiegu.

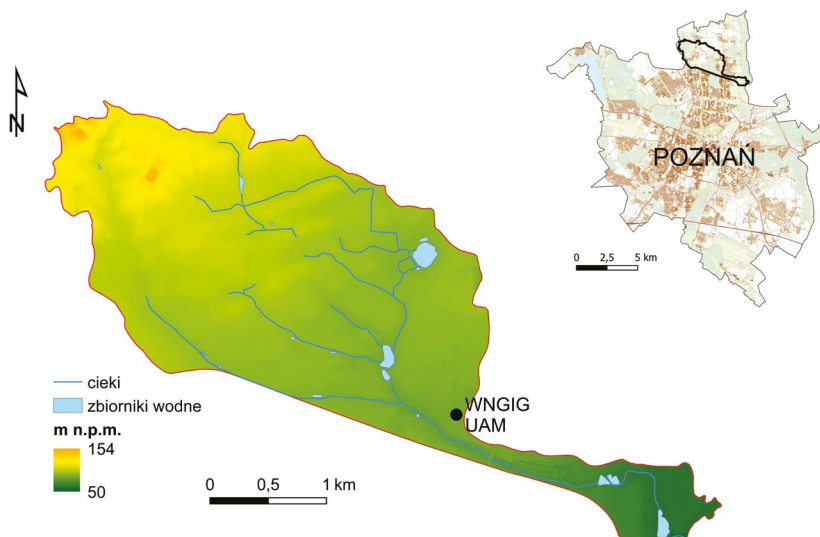
Lata hydrologiczne 2016–2020 były pierwszym okresem pomiarowym w zlewni Różanego Strumienia w ramach ZMŚP (Kostrzewski et al., 2021). Wyniki obserwacji z kilku programów pomiarowych przedstawiono w poniższym opracowaniu. Zanieczyszczenia pochodzące z atmosfery i dostarczane z opadem atmosferycznym do geosystemu tej zlewni miały wpływ na kształtowanie się składu chemicznego wody na kolejnych etapach jej obiegu.

## Obszar badań

Zlewnia Różanego Strumienia zlokalizowana jest w północnej części Poznania i zajmuje powierzchnię ok. 7,7 km<sup>2</sup> (ryc. 1). Według podziału fizycznogeograficznego Richlinga et al. (2021), badana zlewnia znajduje się 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 stadiału poznańskiego zlodowacenia bałtyckiego (Galon, 1972). Analizowany obszar charakteryzuje się znacznymi deniwelacjami, przekraczającymi 100 m. Najwyższy punkt zlewni, Góra Moraska, będąca zarazem najwyższym wzniesieniem miasta Poznania, wznosi się na wysokość 154 m n.p.m. Z kolei najniższy punkt, w miejscu ujścia Różanego Strumienia do Warty, znajduje się na wysokości ok. 50 m n.p.m.

W północnej części Poznania, w tym w zlewni Różanego Strumienia, wyróżnia się wysoczyznę morenową falistą, równiny sandrowe, wały moren akumulacyjnych oraz plejstoceńskie równiny terasowe (Rosa i Kozarski, 1980). W samej zlewni wyróżniają się trzy główne formy rzeźby polodowcowej. Na północy znajduje się ciąg pagórów czołowo-morenowych z kulminacją na Górze Moraskiej. Ponadto w okolicy rezerwatu „Meteoryt Morasko” występuje między innymi wysoczyzna morenowa falista, której wysokość waha się od 102 do 110 m n.p.m. Na południe od moren czołowych rozciąga się równina sandrowa, tzw. Sandr Naramowicki.



**Ryc. 1.** Lokalizacja zlewni badawczej ZMŚP Różanego Strumienia w Poznaniu

Źródło: geoportal.gov.pl; zmienione.

*Location of the Różany Strumień IMNE research catchment in Poznań*

W związku z działalnością lądolodu plejstoceniowego, litologia w zlewni Różanego Strumienia jest urozmaicona. Wśród utworów powierzchniowych największe powierzchnie zajmują gliny zwałowe, piaski i żwiry (Chmal, 1990). Z kolei wśród gleb dominują gleby brunatne i rdzawe. Na obszarach porośniętych lasami przeważają gleby brunatne wylugowane, a w okolicy Góry Moraskiej występują gleby rdzawe i rdzawe brunatne. W obniżeniach terenu występują także utwory bagienne – torfy i mursze (Moczko, 2012).

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. Największy dopływ Różanego Strumienia stanowi ciek płynący z Hub Moraskich i Umultowa. Na jego przepływie znajduje się Jezioro Umultowskie, o powierzchni zlewni wynoszącej 60 ha i powierzchni zwierciadła wody 3 ha (Gołdyn et al., 1996). Jezioro, będące polodowcowym zbiornikiem wytopiskowym, cechuje się umiarkowaną eutrofizacją. W dolnej części zlewni, w okolicach ujścia Różanego Strumienia do Warty, znajdują się stawy rybne oraz zbiornik retencyjny.

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. Postępujący proces przeobrażania naturalnej zlewni w zlewnię o cechach typowych dla obszarów zurbanizowanych polega z jednej strony na wkraczaniu na jej teren budownictwa mieszkaniowego i związanej z nim infrastruktury komunalnej, drogowej itp., a z drugiej na zmianie stosunków wodnych (Major et al., 2016).

Środowisko przyrodnicze zlewni Różanego Strumienia charakteryzuje się znacznymi przekształceniami będącymi rezultatem działalności człowieka. Do najważniejszych problemów środowiskowych istniejących na omawianym obszarze należy zaliczyć zagrożenie związane z zanieczyszczeniem wód powierzchniowych i podziemnych na skutek nieuporządkowanej gospodarki wodno-ściekowej (Major et al., 2016).

## Metody badań

Wielkość dostawy zanieczyszczeń do zlewni Różanego Strumienia określono na podstawie systematycznych, kompleksowych pomiarów wybranych komponentów środowiska przyrodniczego. Badania prowadzono na powierzchniach testowych zlokalizowanych na obszarze całej zlewni. System pomiarowy oraz zastosowana metodyka badań terenowych podporządkowana została założeniom metodologicznym funkcjonowania systemu, celom i programowi pomiarowemu ZMŚP (Kostrzewski et al., 1995) oraz założeniom europejskiego programu *Integrated Monitoring (Integrated Cooperative Programme on Integrated Monitoring on Air Pollution Effects, ICP/IM)* (Manual, 1998). Standaryzowana metodyka badań pozwala na porównanie otrzymanych wyników z wynikami pochodzącymi z innych geosystemów Polski. Zakres pomiarów w latach 2016-2020 obejmował m.in.:

- codzienne automatyczne i manualne pomiary podstawowych elementów meteorologicznych, a w szczególności opadów atmosferycznych i temperatury powietrza, które były podstawą oceny funkcjonowania geosystemu badanej zlewni,
- pomiary zanieczyszczenia powietrza (dwutlenku siarki i dwutlenku azotu) metodą pasywną z miesięcznym okresem ekspozycji próbników (Degórska, 2021),
- pomiary pH i przewodności elektrolitycznej właściwej w próbkach opadów z częstotliwością raz na dobę (Degórska i Żyfka-Zagrodzińska, 2021a),
- oznaczanie składu chemicznego wód opadowych na otwartej przestrzeni (analizy wykonywano raz w miesiącu na podstawie próbek zbiorczych) (Degórska i Żyfka-Zagrodzińska, 2021a),
- pomiary pH i przewodności elektrolitycznej właściwej w próbkach wód powierzchniowych wykonywano raz na miesiąc (Lenartowicz, 2021),
- pomiary właściwości fizykochemicznych wód powierzchniowych – Różanego Strumienia (codzienne pomiary stanu i przepływu oraz comiesięczne analizy hydrochemiczne) (Lenartowicz, 2021),
- pomiary właściwości fizykochemicznych wód podziemnych z częstotliwością raz na kwartał (Marciniak, 2021).

Próbki opadu całkowitego pobierane były do kolektorów opadu atmosferycznego. Z kolei próbki wody rzecznej pobierano ręcznie przy profilu wodowskazowym, ze środkowego nurtu, raz na miesiąc lub częściej w zależności od przepływu (Lenartowicz, 2021).

Oznaczenia odczynu pH i przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) wykonano potencjometrycznie (CPC 411 Elmetron). Technika spektrometrii absorpcji i emisji atomowej (AAS/AES, SpectrAA-20 plus firmy Varian) oznaczono kationy:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Ca}^{2+}$ . Granica oznaczalności wynosiła  $0,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Oznaczenia jonów  $\text{NH}_4^+$  przeprowadzono metodą spektrofotometryczną (Nanocolor UV/VIS II Macherey-Nagel), której próg wykrywalności równał się  $0,05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Natomiast stężenia anionów:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  i  $\text{Cl}^-$  oznaczano metodą chromatografii jonowej (DX-120 firmy Dionex), przy granicy wykrywalności wynoszącej  $0,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Ocenę poprawności oznaczeń chemicznych w próbkach opadów atmosferycznych uzyskano poprzez uczestnictwo w porównaniach międzylaboratoryjnych organizowanych przez GAW/WMO (*Global Atmosphere Watch / World Meteorological Organization*). Dodatkowo, dla kontroli jakości wszystkich prezentowanych wyników, obliczono bilans jonowy jak również porównano wartości przewodności elektrolitycznej właściwej zmierzonej i obliczonej na podstawie stężeń poszczególnych jonów oraz współczynników przeliczeniowych (Manual for the GAW, 2004; Degórska i Żyfka-Zagrodzińska, 2021b).

W przypadku próbek opadów atmosferycznych, dla każdego parametru chemicznego obliczono wartość średnią ważoną, gdzie wagą była wysokość opadu. Natomiast w przypadku średnich wartości pH, najpierw wykonano przeliczenie na stężenie jonów wodorowych, które po wykonanych obliczeniach ponownie zamieniono na wartość pH. Zgodnie z definicją odczynu, pH jest ujemnym logarytmem dziesiętnym z aktywności jonów wodorowych ( $\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) (Degórska i Żyfka-Zagrodzińska, 2021a). Również w przypadku próbek wody ze strumienia, średnie wartości oznaczanych parametrów chemicznych wyrażone były jako średnie ważone, w których wagą był przepływ (Lenartowicz, 2021).

Jednym z celów prowadzonych badań w ramach ZMŚP jest ocena geoindykacji wybranych elementów przyrody nieożywionej, dotyczących m.in. warunków pogodowych, wód powierzchniowych i podziemnych, które są dobrymi indykatorami zmian środowiskowych (Kostrzewski et al., 2011; Majewski et al., 2020). W opracowaniu wykorzystano klasyfikacje i wskaźniki dotyczące zarówno ilościowych, jak i jakościowych właściwości obiegu wody w geoekosystemie zlewni, które są zgodne z przyjętymi założeniami ZMŚP: klasyfikację termiczno-opadową (Kaczorowska, 1962; Lorenc, 1998; Kejna, 2021), klasyfikację pH/SEC opadów atmosferycznych, czy wskaźnik udziału czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów (Kostrzewski et al., 2011; Majewski et al., 2020).

## Wyniki

### Uwarunkowania termiczno-opadowe

Głównym czynnikiem inicjującym przepływ energii w geoekosystemie jest energia słoneczna, natomiast podstawowym obiegiem materii jest obieg wody (Kostrzewski, 1986; Major, 2010). Wielkość dostawy atmosferycznej do zlewni ma wpływ na obieg materii na kolejnych etapach. Właściwe rozpoznanie warunków hydrometeorologicznych jest zatem podstawą oceny funkcjonowania poszczególnych geoekosystemów.

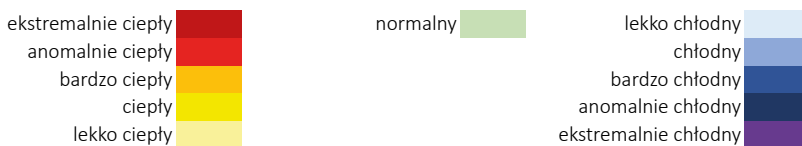
Średnie roczne temperatury powietrza we wszystkich 5 analizowanych latach były wyższe od średniej wieloletniej ze Stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica z okresu 1981-2010 wynoszącej  $8,8^{\circ}\text{C}$ . Najchłodniejszym rokiem był 2017 ze średnią roczną temperaturą  $9,3^{\circ}\text{C}$ ; z kolei najcieplejsze były lata 2019 i 2020 (średnia roczna temperatura w obu przypadkach wyniosła  $10,7^{\circ}\text{C}$ ). Zgodnie z klasyfikacją termiczną stosowaną w ZMŚP, wszystkie lata były ciepłe (2016 – bardzo ciepły, 2017 – lekko ciepły, a 2018, 2019 i 2020 – anomalnie ciepłe). W ujęciu miesięcznym, tylko 5 takich okresów uznano za chłodne (w porównaniu ze średnimi wieloletnimi z Ławicy), a aż 36 miesięcy uznano za ciepłe. Pozostałych 18 miesięcy było normalnych pod względem termicznym. Najwyższą średnią miesięczną temperaturę zanotowano w czerwcu 2019 r. ( $22,7^{\circ}\text{C}$ ), najniższą zaś w lutym 2018 r. ( $2,7^{\circ}\text{C}$ ) (tab. 1).

Większa zmienność czasowa dotyczyła sum opadów atmosferycznych. Atmosferyczna dostawa wody do zlewni była zdecydowanie mniejsza w suchych latach 2018-2019

i wyniosła odpowiednio 437,8 mm oraz 467,5 mm. Najbardziej obfitym w opady był rok 2017 (744,2 mm), przewyższając średnią roczną sumę z wielolecia 1981-2010 o 222 mm, co stanowiło 42% średniej rocznej sumy opadów. W pozostałych dwóch latach roczna suma opadów wyniosła 652,5 mm (2016 r.) i 592,8 mm (2020 r.). Typowy przebieg roczny z przewagą opadów w okresie letnim stwierdzono w latach 2016-2018 i 2020, z kolei w 2019 r. najwyższe opady zarejestrowano wiosną. Maksimum opadów wystąpiło w lipcu 2017 r. z najwyższą sumą miesięczną wynoszącą 154,7 mm. Z kolei zdecydowanie najsuchszymi miesiącami były: wrzesień 2016 r. (4,0 mm), czerwiec 2019 r. (4,1 mm) i kwiecień 2020 r. (4,1 mm) (tab. 2).

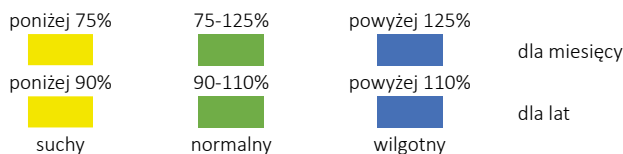
**Tabela 1.** Klasyfikacja termiczna (Lorenc, 1998) w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020 na podstawie wartości normowych ze stacji meteorologicznej Poznań-Ławica z okresu 1981-2010  
*Thermal classification (Lorenc, 1998) in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive, based on standard values from the Poznań-Ławica Meteorological Station over the 1981-2010 period*

Rok	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Rok
2016	6,1	5,8	-1,6	3,7	4,1	9,0	15,6	18,5	19,1	17,7	16,3	8,1	10,2
2017	3,0	1,9	-2,3	0,6	6,7	7,8	14,1	18,0	18,4	18,8	13,5	10,7	9,3
2018	5,3	2,8	2,0	-2,7	0,9	13,2	17,5	19,1	20,8	21,2	15,7	10,4	10,5
2019	4,9	2,8	-0,2	3,5	6,6	10,9	12,4	22,7	19,4	20,7	14,3	10,4	10,7
2020	6,3	3,5	3,3	4,9	5,1	9,8	12,0	18,6	18,9	20,3	14,9	10,9	10,7
średnia	5,1	3,4	0,2	2,0	4,7	10,1	14,3	19,4	19,3	19,7	14,9	10,1	10,3



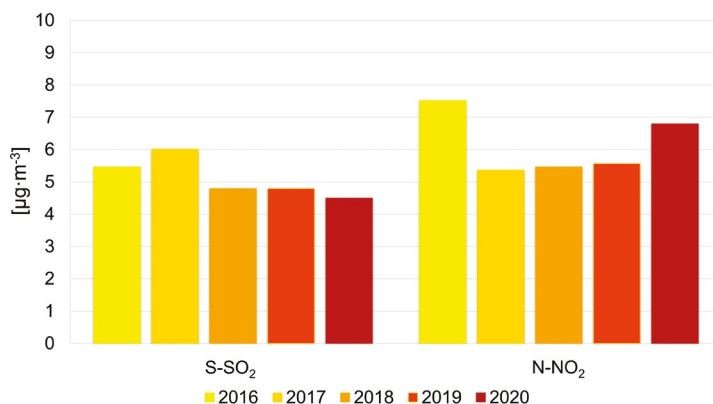
**Tabela 2.** Klasyfikacja opadowa (Kaczorowska, 1962) w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020 na podstawie wartości normowych ze stacji meteorologicznej Poznań-Ławica z okresu 1981-2010  
*Classification of precipitation (Kaczorowska, 1962) in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive, by reference to standard values from the Poznań-Ławica Meteorological Station over the 1981-2010 period*

Rok	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Rok
2016	57,4	29,3	45,9	45,0	46,3	35,6	40,7	72,1	136,3	38,6	4,0	101,3	652,5
2017	43,5	48,2	21,9	29,2	38,7	34,0	45,9	69,5	154,7	93,7	72,9	92,0	744,2
2018	50,7	42,5	44,3	10,2	24,4	32,4	19,4	53,0	69,1	11,0	48,7	32,1	437,8
2019	12,5	63,9	54,6	18,6	45,5	7,2	97,7	4,1	34,1	34,5	66,4	26,9	466,0
2020	55,7	21,9	37,0	71,5	25,6	4,1	49,4	73,9	73,6	91,5	39,8	48,8	592,8
średnia	43,0	41,2	40,7	34,9	36,1	22,7	50,6	54,5	93,6	53,9	46,4	60,2	578,7



## Zanieczyszczenie powietrza

Położenie zlewni Różanego Strumienia w granicach dużego miasta (Poznania) nie wpłynęło negatywnie na jakość powietrza atmosferycznego, którą w omawianym pięcioleciu, określono jako dobrą (w oparciu o pomiary  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_2$ ). Dopuszczalne stężenia dwutlenku siarki ( $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) oraz dwutlenku azotu ( $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) nie zostały przekroczone w żadnym roku pomiarowym (zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu – Dz. U. z 2012 r. poz. 1031) (ryc. 2). Najwyższe miesięczne stężenia rejestrowano w półroczu zimowym, co spowodowane było okresem grzewczym i spalaniem paliw kopalnych.



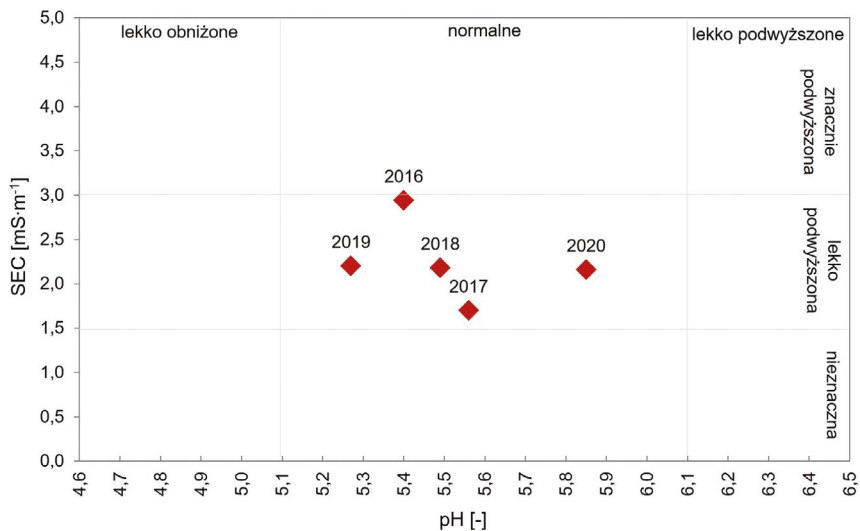
**Ryc. 2.** Średnie roczne stężenia S-SO<sub>2</sub> i N-NO<sub>2</sub> w powietrzu w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020  
*Mean annual S-SO<sub>2</sub> and N-NO<sub>2</sub> concentrations in the air in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*

## Opady atmosferyczne

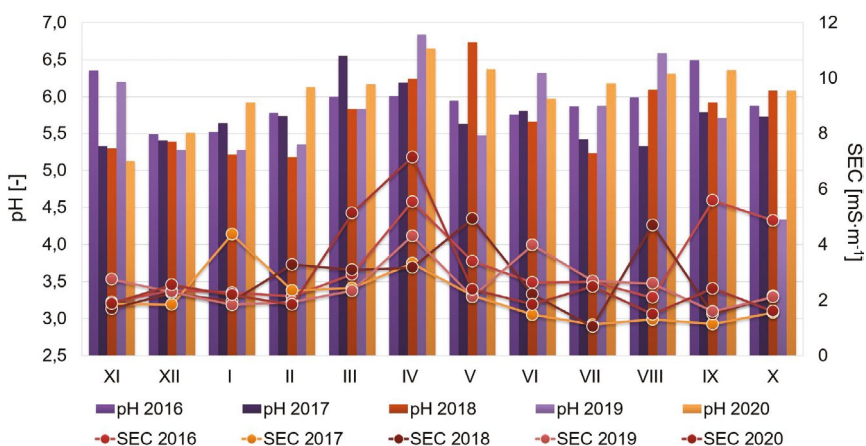
Niewielki wpływ aglomeracji miejskiej w przypadku zanieczyszczenia powietrza, ma swoje przełożenie na wyniki składników chemicznych w opadach atmosferycznych, które cechują się stosunkowo niską mineralizacją i normalnym odczynem (ryc. 3). Przewodność elektrolityczna właściwa opadów atmosferycznych (wg Jansena et al., 1988), w pięcioletnim okresie badań, utrzymywała się na tym samym poziomie – lekko podwyższonym, a jej średnia wartość wyniosła  $2,26 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ . W przypadku odczynu opadów, w 39% badanych próbek kwasowość sklasyfikowano jako normalną (pH w przedziale 5,1-6,0). Pozostałe to: 0,29% silnie obniżone (pH < 4,1); 0,86% znacznie obniżone (pH < 4,5); 6,3% lekko obniżone (pH 4,6-5,0); 27% lekko podwyższone (pH 6,1-6,5) i 26% podwyższone (pH > 6,5). Miesięczne wartości pH i przewodności elektrolitycznej właściwej zmieniały się w ciągu roku. Najwyższe zaobserwowano w miesiącach wiosennych z najniższymi sumami opadów atmosferycznych (głównie w kwietniu) w latach 2017-2020 oraz we wrześniu 2016 r. Z kolei najniższe wartości obu wskaźników wystąpiły w lipcu każdego roku (ryc. 4). Prawdopodobnie miało to związek z dostawą większych ilości jonów zasadowych ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ) w okresach wiosennych, co zapewne związane było z rolnictwem, a zwłaszcza uprawami. W miesiącach jesienno-zimowych odnotowano obniżone wartości pH, które zależne było

od wyższych stężeń związków zakwaszających opady. Głównym źródłem pochodzenia jonów kwasogennych w zlewni Różanego Strumienia było spalanie paliw kopalnych.

Wielkość dostawy substancji rozpuszczonych do badanej zlewni określono na podstawie składu chemicznego opadów (Major et al., 2018b). Badania chemizmu opadów atmosferycznych na otwartej przestrzeni wykazały, że skład chemiczny był stały i cechował się niewielkimi zmianami w jego strukturze. Procentowy udział poszczególnych jonów utrzy-



**Ryc. 3.** pH i przewodność elektryczna właściwa opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020  
*pH and specific electrical conductivity in precipitation in the Różany Strumień catchment in the years inclusive 2016-2020 inclusive*

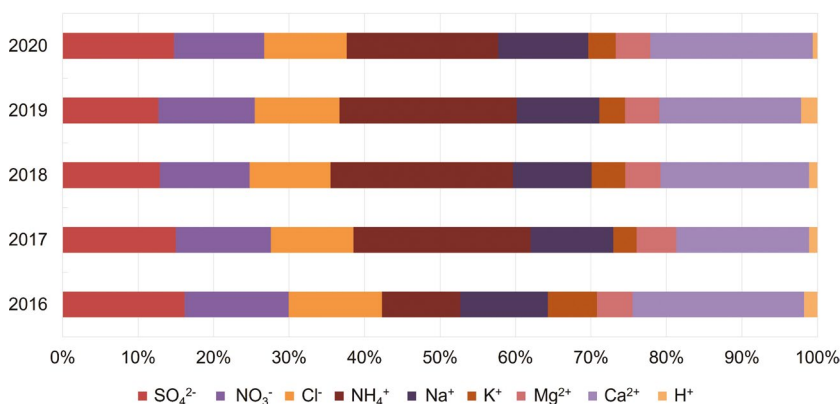


**Ryc. 4.** Średnie miesięczne wartości pH i przewodności elektrycznej właściwej opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020  
*Average monthly pH and specific electrical conductivity values in precipitation in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*



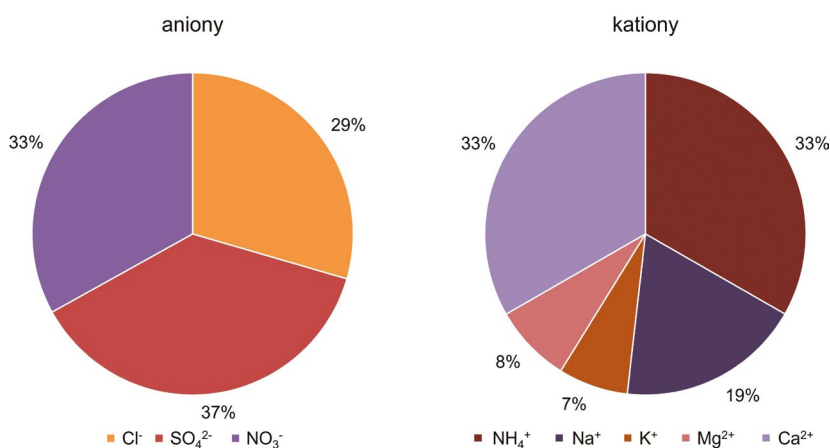
mywał się na podobnym poziomie w poszczególnych latach, bez istotnych różnic (ryc. 5a). Na podstawie obliczonego bilansu jonów, wśród anionów największy udział procentowy miały siarczany, azotany i chlorki, a wśród kationów jony amonowe, wapń i sód (ryc. 5b). Z kolei w strukturze średnich rocznych stężeń poszczególnych składników rozpuszczonych w opadach (ryc. 5a), najwięcej występowało jonów  $\text{NH}_4^+$  (20%),  $\text{Ca}^{2+}$  (20%), następnie  $\text{SO}_4^{2-}$  (14%) i  $\text{NO}_3^-$  (13%). Mniejszy udział stwierdzono dla jonów  $\text{Na}^+$  (11%) i  $\text{Cl}^-$  (11%) oraz  $\text{Mg}^{2+}$  (5%),  $\text{K}^+$  (4%) i  $\text{H}^+$  (1%), których sumaryczny udział wyniósł 31%.

Wysokie stężenia jonów zasadowych, w tym głównie jonów amonowych, zwykle powodują neutralizację wód opadowych (Keresztesi et al., 2020). Podwyższone stężenia tych jonów wystąpiły w zlewni Różanego Strumienia i miały charakter lokalny (Pułyk, 2017).



**Ryc. 5a.** Procentowy udział składników rozpuszczonych w opadach atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020

*Percentage shares of different chemical components dissolved in precipitation in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*



**Ryc. 5b.** Średni procentowy udział kationów i anionów w opadach atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020

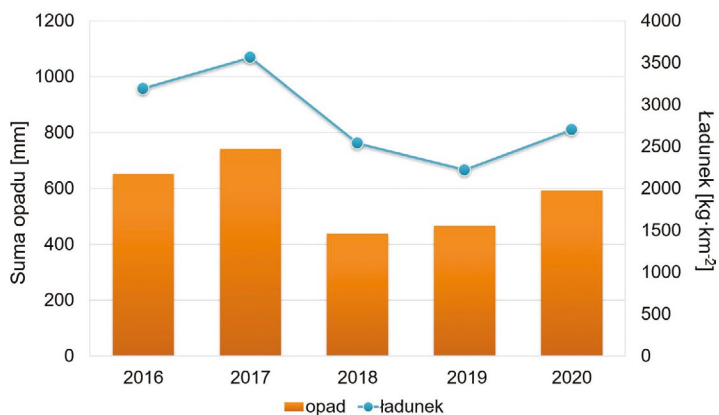
*Mean percentage shares of cations and anions in precipitation in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*

Z kolei związki siarki i azotu miały negatywny wpływ na stan środowiska, gdyż w głównej mierze odpowiadały za kwasowość opadów atmosferycznych. W około 60-70% odpowiada za to dwutlenek siarki, zaś tlenki azotu za pozostałe 30-40% (Isidorov i Jaroszyńska, 1998).

W badanym pięcioleciu, początkowo obserwowany był wzrost wartości wskaźnika udziału czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów atmosferycznych, zdefiniowany jako stosunek średnich ważonych stężeń jonów  $\text{NO}_3^-$  i  $\text{SO}_4^{2-}$ . W roku 2016 wyniósł on 0,85; w 2017 r. – 0,84; a w 2018 r. – 0,92. W 2019 r., pomimo zmniejszenia udziału jonów siarczanowych i niezmiennej ilości jonów azotanowych, udział obu jonów w zakwaszaniu wód opadowych był taki sam, a wskaźnik osiągnął wartość 1. Z kolei w 2020 r. wskaźnik ten ponownie zmniejszył się i był najniższy w wieloletnim okresie 2016–2020, a jego wartość wyniosła 0,81. Wynika z tego, że zmalał udział azotanów i równocześnie zwiększył się udział siarczanów. Tym samym, na podstawie wieloletnich badań ZMŚP, w zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia stosunek ten nie nawiązywał do tendencji zwiększającej się roli  $\text{NO}_3^-$  nad  $\text{SO}_4^{2-}$  w Polsce północnej i zachodniej (większym wpływie zanieczyszczeń komunikacyjnych na kwasowość opadów). Był za to zbliżony do wartości uzyskiwanych w Polsce południowo-wschodniej (Majewski i Kostrzewski, 2021).

W omawianej zlewni stężenia chlorków i sodu w opadach miały zaburzoną naturalną tendencję spadku wraz z oddalaniem od morza, które jest ich głównym, naturalnym źródłem w opadach atmosferycznych. Wartości te były porównywalne do stężeń uzyskiwanych w nadmorskiej zlewni Jeziora Gardno na wyspie Wolin (Tylkowski et al., 2019). Przyczyną wyższych stężeń tych jonów były zanieczyszczenia opadów w zlewni Różanego Strumienia wskutek niewielkiego, ale negatywnego oddziaływania aglomeracji poznańskiej (Majewski i Kostrzewski, 2021).

Średnia depozycja atmosferyczna (ładunki) w badanym pięcioleciu wyniosła  $2800 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ; przy średniej rocznej sumie opadów na poziomie 578,4 mm. Najniższą depozycję atmosferyczną wynoszącą  $2200 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$  zanotowano w 2019 r. (przy rocznej sumie opadów 467,5 mm), a najwyższą  $3500 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$  w 2017 r. (przy opadzie rocznym 741,4 mm; ryc. 6). Z badań składu chemicznego opadów wynika, że struktura depozycji jonów nie



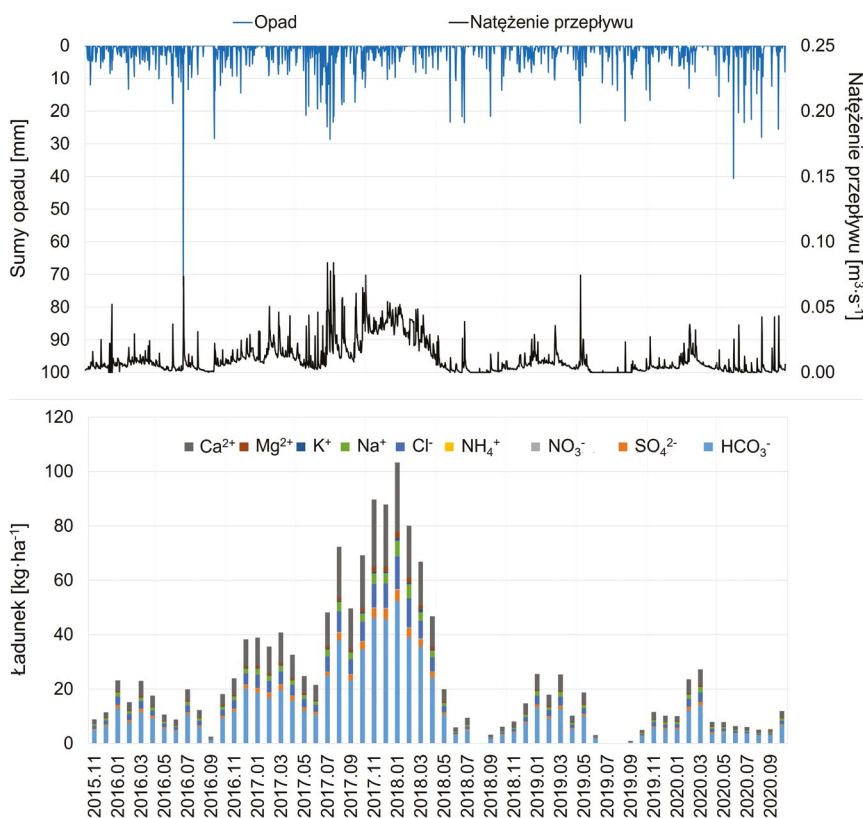
**Ryc. 6.** Całkowity ładunek składników rozpuszczonych wprowadzony do podłoża z opadami atmosferycznymi w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016–2020

*Total ion (dissolved-component) loads in precipitation in the Różany Strumień catchment in the years 2016–2020 inclusive*

uległa zmianom i zarówno w suchym 2019 r., jak i w wilgotnym 2017 r. była podobna. Wśród anionów największą depozycję zarejestrowano dla chlorków ( $570 \text{ kg Cl}^- \cdot \text{km}^{-2}$ ), następnie siarczanów ( $330 \text{ kg S-SO}_4^{2-} \cdot \text{km}^{-2}$ ) i azotanów ( $275 \text{ kg N-NO}_3^- \cdot \text{km}^{-2}$ ). Depozycja kationów przedstawiała się następująco: wapń ( $573 \text{ kg Ca}^{2+} \cdot \text{km}^{-2}$ ), jony amonowe ( $405 \text{ kg N-NH}_4^+ \cdot \text{km}^{-2}$ ), sód ( $368 \text{ kg Na}^+ \cdot \text{km}^{-2}$ ), potas ( $234 \text{ kg K}^+ \cdot \text{km}^{-2}$ ) i magnez ( $83 \text{ kg Mg}^{2+} \cdot \text{km}^{-2}$ ) (Major et al., 2018b).

## Wody powierzchniowe

Dostawa atmosferyczna ma bezpośredni wpływ na wielkość odpływu w Różanym Strumieniu. Każdorazowo po wysokim opadzie atmosferycznym rejestrowano podwyższone stany wód w strumieniu od kilku do kilkunastu centymetrów, w zależności od intensywności i czasu trwania opadów. Najwyższe stany, a także przepływy wody, zawsze odnotowano bezpośrednio po dobowych sumach opadów wyższych od 20 mm (ryc. 7). Najniższe średnie roczne przepływy, pomimo stosunkowo obfitych opadów, zarejestrowano w 2016 r.



**Ryc. 7.** Średnie dobowe przepływy oraz sumy dobowe opadów atmosferycznych na tle miesięcznych ładunków jonów w Różanym Strumieniu w latach 2016-2020

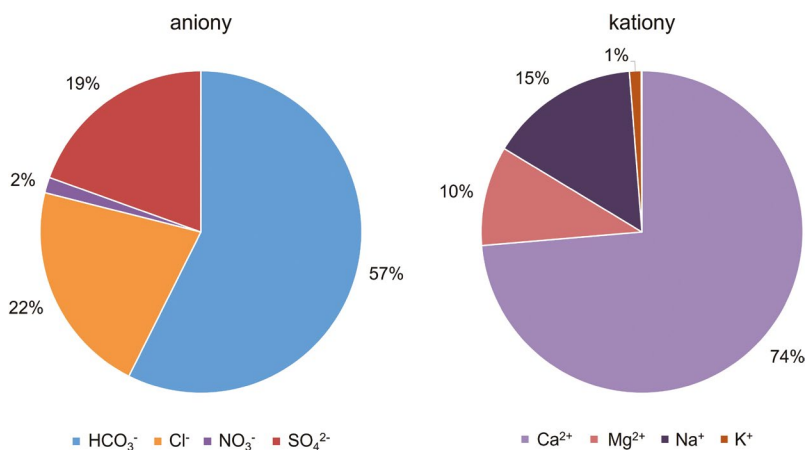
Mean daily flows and precipitation totals against monthly values for ion loads in the Różany Strumień in the years 2016-2020 inclusive

( $0,006 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Wiązać to można z czasem relaksacji, polegającej na odbudowie zasobów wodnych zlewni po suchych latach 2014-2015. Korzystne warunki opadowe w latach 2016-2017 pozytywnie wpłynęły na wielkość przepływów, bowiem najwyższe wystąpiły w Różanym Strumieniu w wilgotnym 2017 r. oraz na początku 2018 r., w którym pierwszy kwartał charakteryzował się intensywnymi opadami. Na hydrogramie przepływu wyraźnie zaznaczyła się wyjątkowo niekorzystna sytuacja hydrometeorologiczna w pozostałej części 2018 r. Przepływy znacznie się obniżyły, a pod koniec lata (przez 45 dni) w ogóle nie było przepływu wody w cieku. Brak większych opadów w 2019 r. podtrzymał tę niekorzystną sytuację hydrologiczną, kiedy latem w ciągu 107 dni, tylko przez 7 dób woda płynęła w strumieniu i każdorazowo było to następstwem wysokiego opadu w dniu poprzedzającym. W 2020 r., normalnym pod względem opadowym, nie stwierdzono wyższych przepływów, co ponownie wiązać należy z suchymi latami poprzedzającymi i czasem relaksacji, który nawiązuje do teorii funkcjonowania geoekosystemu (Kostrzewski, 1986) (ryc. 7).

Wody Różanego Strumienia charakteryzowały się lekko zasadowym odczynem ( $\text{pH} = 8,0$ ) oraz wysoką mineralizacją ( $\text{SEC} = 88,6 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$  w latach 2016-2020; przy stonkowo niewielkiej zmienności  $71\text{-}113 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ ). Wysoka wartość SEC związana była m.in. z przekształceniami antropogenicznymi w zlewni (zmianami użytkowania terenu, deforestacją zlewni dla potrzeb urbanizacji oraz rolnictwem), jak również dostawą zanieczyszczonych wód do cieków, czy też spływami powierzchniowymi z obszarów rolniczych (Majewski i Kostrzewski, 2021). Według klasyfikacji Altowskiego-Szwieca (Macioszczyk, 1987) wody Różanego Strumienia należały do typu hydrogeochemicznego wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowego (ryc. 8).

Wielkość dostawy ładunków substancji rozpuszczonych (2016 r. –  $171,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; 2017 r. –  $494,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; 2018 r. –  $516,2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; 2019 r. –  $129,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; 2020 r. –  $132,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) i odprowadzanych ze zlewni uzależnione były od panujących warunków hydrometeorologicznych, w tym od przepływów skorelowanych z sumami opadów (ryc. 7, 10).

Na podstawie Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału eko-



**Ryc. 8.** Udział kationów i anionów w wodach Różanego Strumienia w latach 2016-2020  
Mean percentage shares of cations and anions in the Różany Stream in the years 2016-2020 inclusive

logicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych dokonano oceny jakości wód Różanego Strumienia. Z badanych wskaźników fizykochemicznych, dwa ( $\text{Na}^+$  i  $\text{K}^+$ ) nie podlegały klasyfikacji, większość (w tym  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NH}_4^+$  i  $\text{PO}_4^{3-}$ ) zaliczono do I klasy czystości, a pozostałe (pH, przewodność elektrolityczną właściwą,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  i  $\text{Cl}^-$ ) zaliczono do III klasy czystości. Na przestrzeni pięciu lat charakterystyki badanych parametrów nie uległy większym zmianom. Jedynie jony fosforanowe w 2016 r. zaliczono do II klasy. W 2017 i 2018 r. azotany zaliczono do II klasy, a w 2018 r. wartości pH i fosforanów zmieniły klasę z I na III. Pomimo tego jakość wód Różanego Strumienia określono jako dobrą (Major et al., 2018a, 2019).

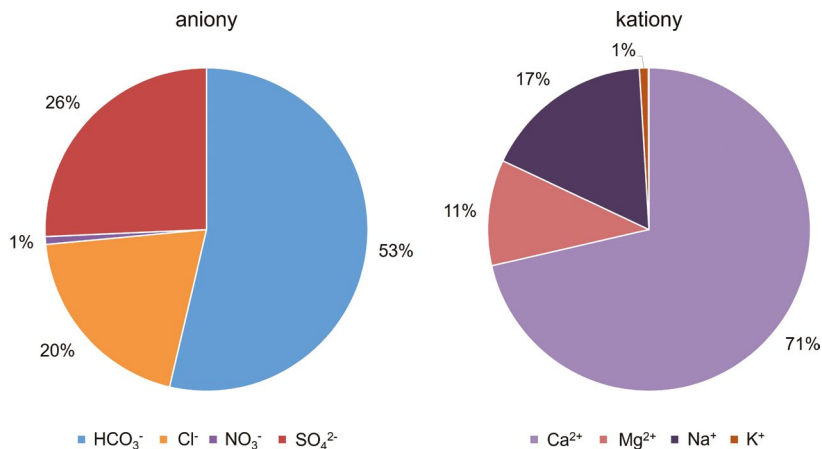
### Wody podziemne

Wielkość dostawy zanieczyszczeń do zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia i jej zmiany widoczne były na kolejnych etapach obiegu wody, także po dotarciu do poziomu wód podziemnych.

Wody gruntowe w zlewni Różanego Strumienia charakteryzuje między innymi zmienność czasowa i zróżnicowanie przestrzenne jonów azotanowych i amonowych. Analizując wyniki badań tych składników zauważono pewne prawidłowości. W piezometrze IGF2 odnotowano wyższe stężenia jonów amonowych, a niższe azotanowych aniżeli w punkcie IGF4, dla którego zależność tych jonów była odwrotna. W badanym pięcioleciu, zaobserwowano także spadek stężeń jonów fosforu ogólnego, które w ostatnich latach (2019-2020) były poniżej granicy wykrywalności oraz wzrost stężeń sodu (tab. 3).

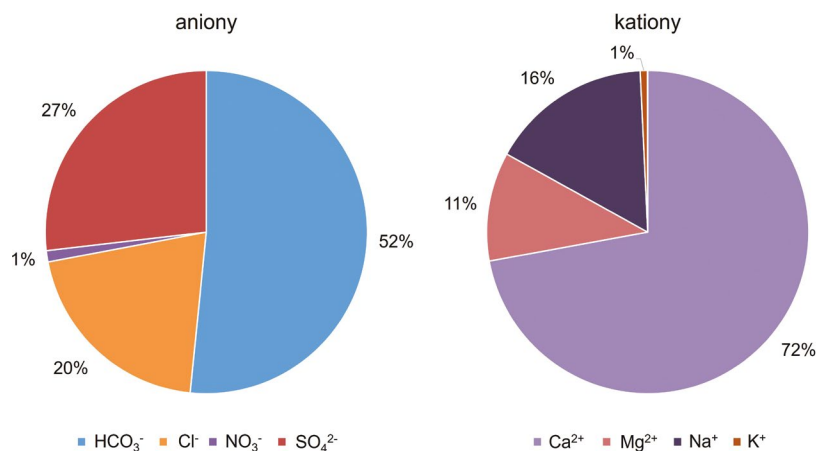
Na podstawie średnich rocznych stężeń składników wód podziemnych określono ich typ hydrogeochemiczny w dwóch badanych punktach pomiarowych (IGF 2 i IGF 4), zgodnie z klasyfikacją Altowskiego-Szwieca (Macioszczyk, 1987). W latach 2016-2020 typ wody w obu piezometrach określono jako wapniowo-wodorowęglanowo-siarczanowo-chlorkowy, ze znaczną mineralizacją wynoszącą ponad  $500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (wody słodkie) (ryc. 9a, b). Procentowy skład chemiczny wód podziemnych w obu punktach pomiarowych był bardzo podobny i nie wykazywał istotnych różnic.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych, określono klasę monitoringową tych wód na podstawie średnich wartości parametrów fizykochemicznych wód podziemnych. Najniżej sklasyfikowane zostały wapń i jony wodorowęglanowe. Stężenia wapnia w obu piezometrach pozwoliły na zaliczenie wody do III klasy jakości, a w 2017 r. nawet do IV klasy. Z kolei wodorowęglany zaliczono do III lub II klasy. Do drugiej klasy zaliczono przewodność elektrolityczną właściwą, siarczan i chlorki. Średnie roczne stężenia pozostałych parametrów mieściły się w I klasie jakości wód podziemnych (tab. 3). Uzyskane klasy jakości wody pozwoliły na określenie stanu chemicznego wód podziemnych w zlewni Różanego Strumienia jako dobry.



**Ryc. 9a.** Średni procentowy udział kationów i anionów w wodach podziemnych w punkcie IGF2 w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020

*Mean percentage shares of cations and anions in groundwater of the Różany Strumień catchment (IGF2 Measuring Point) in the years 2016-2020 inclusive*



**Ryc. 9b.** Średni procentowy udział kationów i anionów w wodach podziemnych w punkcie IGF4 w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020

*Mean percentage shares of cations and anions in groundwater of the Różany Strumień catchment (IGF4 Measuring Point) in the years 2016-2020 inclusive*

**Tabela 3.** Zestawienie wybranych wskaźników składu chemicznego i określonych dla nich klas jakości (środowiskowej) wód podziemnych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020

*Compiled indicators of chemical composition – and quality classes specified for them – in relation to groundwater present in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*

Rok klasa	Punkt pomiar.	pH	SEC	Ca	Na	Mg	K	PO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	Mineralizacja	Stan chemiczny zlewni
		–	[mS·m <sup>-1</sup> ]	[mg·dm <sup>-3</sup> ]											
2020	IGF 2	7,04	93,4	127,4	45,1	12,7	3,8	0,025*	336,7	80,7	27,0	0,28	0,07	633,75	dobry
2019	IGF 2	6,97	94,8	146,1	39,6	13,4	3,1	0,025*	343,7	74,8	34,4	0,26	0,15	655,51	dobry
2018	IGF 2	6,98	92,6	162,5	38,8	16,3	3,8	0,120	391,9	74,9	26,6	0,18	0,10	715,22	dobry
2017	IGF 2	7,10	85,9	198,1	39,8	13,5	3,8	0,100	386,1	87,1	28,9	0,62	0,02	758,01	dobry
2016	IGF 2	7,15	95,7	138,7	37,9	14,2	3,4	0,200	336,7	84,6	32,6	0,79	0,02	648,80	dobry
2020	IGF 2	7,06	93,9	131,8	43,2	13,1	2,7	0,025*	329,4	76,7	32,2	0,84	0,01	629,90	dobry
2019	IGF 4	7,01	98,2	156,8	37,8	14,1	2,8	0,025*	361,4	80,7	31,8	1,49	0,08	686,97	dobry
2018	IGF 4	7,07	86,4	149,4	34,8	15,4	3,5	0,120	334,9	71,2	27,1	1,30	0,02	637,77	dobry
2017	IGF 4	7,02	86,2	202,8	38,7	14,3	3,4	0,100	373,9	87,1	30,3	2,05	0,02	752,68	dobry
2016	IGF 4	7,17	94,4	141,0	28,4	14,2	3,1	0,200	339,1	79,6	30,6	0,68	0,02	636,70	dobry

\*połowa wartości granicy oznaczalności



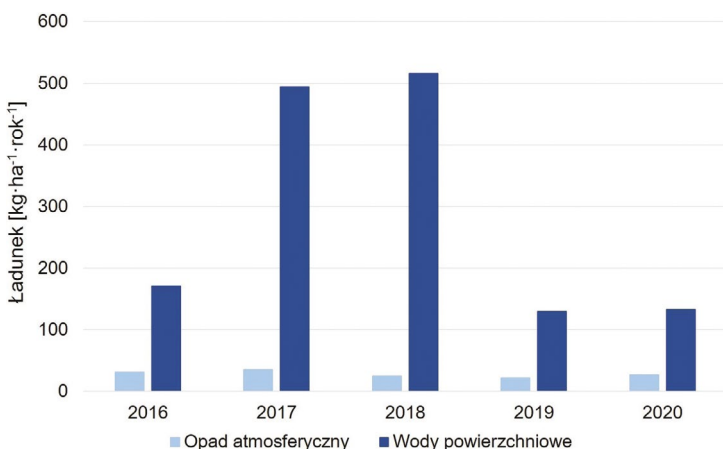
## Podsumowanie

Zanieczyszczenia pochodzące z atmosfery i dostarczane z opadem atmosferycznym do geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia miały wpływ na kształtowanie się składu chemicznego wody na kolejnych etapach jej obiegu.

Na „wejściu” do geoekosystemu, z opadem dostarczane były do powierzchni terenu różne zanieczyszczenia pochodzące z atmosfery, na co wcześniej zwracali już uwagę Szép et al. (2018), Keresztesi et al. (2020) i Kotowski et al. (2020). Z kolei główny udział w materiale rozpuszczonym i odprowadzanym z obszaru zlewni Różanego Strumienia miały składniki związane z procesami wietrzenia chemicznego (Major et al., 2017). Prawidłowością dotyczącą odpływu materii rozpuszczonej w systemie fluwialnym jest większy jej ładunek w strefie nizinnej niż wyżynnej czy górskiej (Majewski i Kostrzewski, 2021).

Wielkości dostarczanych sumarycznych, rocznych ładunków substancji rozpuszczonych w opadach atmosferycznych były kilkukrotnie niższe niż w wodach powierzchniowych Różanego Strumienia (ryc. 10), co było procesem naturalnym i miało związek ze zwiększaniem się stężeń oraz ładunków jonów na kolejnych, niższych etapach obiegu wody. W latach 2016 oraz 2019-2020 różnice te były najmniejsze i kształtowały się na poziomie cztero- oraz pięciokrotnie większych sum ładunków w wodach powierzchniowych. Z kolei w latach 2017-2018 różnice analizowanych ładunków były najwyższe, odpowiednio czter- i dwudziestokrotnie większe w Różanym Strumieniu. Wynikało to z wysokich sum opadów i tym samym wyższych stanów w rzece. Opisana zależność była zgodna z ogólnie przyjętą tendencją oraz wynikami badań prowadzonych w ramach programu ZMŚP na innych Stacjach Bazowych w Polsce (Majewski i Kostrzewski, 2021) oraz m.in. z badaniami Puczko i Jekatierynczuk-Rudczyk (2020).

W regionach nizinnych przeważają procesy denudacji chemicznej (materia rozpuszczona w wodach płynących) nad procesami denudacji mechanicznej (materia zawieszona i wleczona w ciekach) (Tylkowski i Kostrzewski, 2017; Majewski i Kostrzewski, 2020).

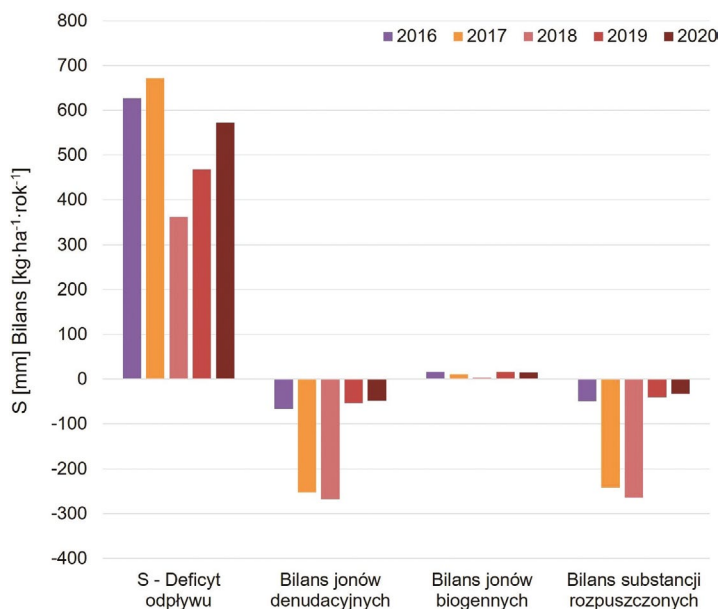


**Ryc. 10.** Roczne sumy ładunków składników rozpuszczonych w opadach atmosferycznych i w wodach powierzchniowych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020  
*Annual totals for loads dissolved in precipitation and in surface waters in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*



W zlewni tej występuje dodatni bilans jonów biogennych dostarczanych przede wszystkim w wyniku działalności człowieka (np. poprzez nawożenie) –  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{K}^+$ . Na zagrożenia wynikające z presji antropogenicznej oraz podwyższone stężenia biogenów pochodzące głównie z postępującej intensyfikacji rolnictwa zwracali uwagę Ruiz i Velasco (2010). Pozostałe składniki chemiczne (jony denudacyjne) występujące w wodach krążących w zlewni cechują się ujemnym bilansem (ryc. 11). Ujemny bilans denudacyjny w zlewni nizinnej jest zjawiskiem naturalnym, dlatego zlewnię Różanego Strumienia można uznać za stabilną w zakresie przepływu energii i obiegu materii (substancji rozpuszczonych) (Tylkowski i Kostrzewski, 2017; Major et al., 2018b, 2019; Majewski i Kostrzewski, 2021).

Odptyw powierzchniowy ze zlewni stanowi główną drogę odprowadzania substancji rozpuszczonych. Zwiększony udział materii rozpuszczonej w odplywie ze zlewni charakteryzującej się silną presją antropogeniczną wiąże się z większym udziałem terenów użytkowanych rolniczo. Pomimo dodatniego bilansu jonów pochodzenia biogenego, w zlewni Różanego Strumienia udział biogenów w odplywie rzeczny był niewielki. Począwszy od roku 2017 zaobserwowano coraz niższe ich stężenia, głównie azotanów i potasu, a stężenia jonów amonowych i fosforu kształtowały się poniżej granicy oznaczalności. Zmienność czasowa jonów biogennych w odplywie rzeczny w badanej zlewni nawiązywała do częstotliwości występowania wysokich sum opadów, okresów zwiększonej dostawy zanieczyszczeń bytowych oraz związana była z działalnością rolniczą. Podobne zależności stwierdzili w swoich badaniach Lepistö et al. (2001) oraz Puczko i Jekatierynczuk-Rudczyk (2020). Na zbliżone źródła pochodzenia i niskie stężenia składników biogennych w zlewniach zagłębi bezodpływowych na obszarach młodogłacjalnych zwracali też uwagę m.in.



**Ryc. 11.** Deficyt odpływu wody i bilans substancji rozpuszczonych w zlewni Różanego Strumienia w latach 2016-2020

*Water outflow shortage and dissolved matter balance in the Różany Strumień catchment in the years 2016-2020 inclusive*

Pietruszyński i Cieśliński (2018) oraz Major et al. (2021). Z kolei ujemny bilans jonów pochodzących z procesów denudacyjnych jest efektem przewagi ługowania gleb, wietrzenia chemicznego i dalszego odprowadzania fluwialnego nad ich dostawą z opadów atmosferycznych (Major et al., 2017).

Tabele i ryciny są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

## Piśmiennictwo

- Chmal, R. (1990). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Poznań*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Degórska, A. (2021). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program B1 – Zanieczyszczenia powietrza. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 91-100). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- 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). Zapewnienie jakości danych. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 344-354). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Galon, R. (1972). *Geomorfologia Polski t. 2 Niż Polski*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Gołdyn, R., Jankowska, B., Kowalczak, P., Pułyk, M., Tybiszewska, I., & Wiśniewski, J. (1996). *Wody powierzchniowe Poznania*. W: L. Kurek (red.), *Środowisko naturalne miasta Poznania. Część 1* (s. 45-68). Poznań: Urząd Miasta Poznania, Wydział Ochrony Środowiska.
- Isidorov, W., & Jaroszyńska, J. (1998). *Chemiczne problemy ekologii*. Białystok: Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku.
- Jansen, W., Block, A., & Knaack, J. (1988). Kwaśne deszcze, Historia, powstawanie, skutki. *Aura*, 4, 18-19.
- Kaczorowska, Z. (1962). *Opady w Polsce w przekroju wieloletnim*. Prace Geograficzne, 33. Warszawa: Instytut Geografii PAN.
- 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.
- Keresztesi, 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104846>
- Kostrzewski, A. (1986). Zastosowanie teorii funkcjonowania geosystemu do badań współczesnych środowisk morfogenetycznych obszarów nizinnych Polski północno-zachodniej. *Spr. PTPN 1984*, 103, 26-28.

- Kostrzewski, A., Majewski, M., & Szpikowski, J. (2021). Założenia metodologiczne i metodyczne Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 21-37). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Kostrzewski, A., Mazurek, M., & Stach, A. (1995). *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań*. Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Kostrzewski, A., Szpikowski, J., & Szpikowska, G. (2011). Stan geoeosystemów Polski – ocena na podstawie wybranych geoskaźników w programie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 12, 9-83.
- Kotowski, T., Motyka, J., Knap, W., & Bielewski, J. (2020). 17-Year study on the chemical composition of rain, snow and sleet in very dusty air (Krakow, Poland). *Journal of Hydrology*, 582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124543>
- Krygowski, B. (1961) *Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej. Cz. 1 Geomorfologia*. Warszawa: PTPN, Wyd. Matem-Przyrod. Kom. Fizjogr.
- 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.
- Lepistö, A., Kenttämies, K., & Rekolainen, S. (2001). Modeling combined effects of forestry, agriculture and deposition on nitrogen export in a northern river basin in Finland. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 30(6), 338-348. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.6.338>
- 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 geoeosystemów Polski* (s. 113-119). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Macioszczyk, A. (1987). *Hydrogeochemia*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Majewski, M., & Kostrzewski, A. (2021). Stan geoeosystemów Polski w 2020 roku. Pobrane z [http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2021/11/Raport\\_2020.pdf](http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2021/11/Raport_2020.pdf) (20.12.2021).
- Majewski, M., Kostrzewski, A., & Tyłkowski, J. (2020). Indywidualność przyrodnicza geoeosystemów Polski w 2019 r. W: A. Olszewski, A. Andrzejewska (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoeosystemów jako cecha wskaźnikowa zmian klimatu* (s. 23-33), Izabelin: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Major, M. (2010). Możliwości zastosowania teorii funkcjonowania geoeosystemu do badań obszarów bezodpływowych. *Przegląd Geograficzny*, 82(1), 103-113. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2010.1.5>
- Major, M. (2012). *Funkcjonowanie zagłębi bezodpływowych w zróżnicowanych warunkach morfologicznych (dorzecze Parsęty, Pomorze Zachodnie)*. Poznań: Studia i Prace z Geografii i Geologii, 27, Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Major, M., Chudzińska, M., Kolendowicz, L., Kruszyk, R., Majewski, M., Marciniak, M., Półrolniczak, M., Okońska, M., Olejarczyk, M., & Zięba, M. (2018a). *Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Różany Strumień w 2017 roku*. Poznań: msr.

- Major, M., Chudzińska, M., Majewski, M., & Staszak-Piekarska, A. (2016). Stacja Bazowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Różany Strumień – założenia, struktura, funkcjonowanie. W: A. Kostrzewski (red.), *Stacje Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu* (s. 153-180). Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Major, M., Chudzińska, M., Majewski, M., & Zięba, M. (2018b). Podstawowe składowe bilansu materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2017. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 20, 61-70.
- Major, M., Chudzińska, M., Majewski, M., & Zięba, M. (2019). Characteristics of the dissolved matter balance in the Różany Strumień catchment in Poznań, Poland, in the hydrological year 2017. W: *70 years Macedonian Geographical Society, New trends in Geography, Physical Geography* (s. 65-75). Ohrid: Macedonian Geographical Society.
- 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.
- Major, M., Pietruszyński, Ł., & Cieśliński, R. (2021). Zróżnicowanie przestrzenne wybranych składników biogenych w śródpolnych oczkach w Polsce Północnej. *Przegląd Geograficzny*, 93(1), 59-81. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2021.1.4>
- Manual for Integrated Monitoring. (1998). Helsinki, Finland: Finnish Environment Institute, ICP IM Programme Centre. Pobrane z: [www.syke.fi/nature/icpim](http://www.syke.fi/nature/icpim) (10.06.2021).
- Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme: Guidelines. (2004). Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures, 160. Pobrane z: <https://qasacamericas.org/files/manualforthegaw-precipitation-chemistry-programme-wmo-gaw-report-no-160.pdf> (12.06.2021).
- 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.
- Moczko, A. (2012). *Prognoza oddziaływania na środowisko dotycząca projektu miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego „Morasko-Radojewo-Umultowo” – Rezerwat Meteoroty Morasko w Poznaniu*. Poznań: Miejska Pracownia Urbanistyczna.
- Pietruszyński, Ł., & Cieśliński, R. (2018). The effects of different land use and hydrological types on water chemistry of young glacial ponds. *Journal of Hydrology*, 564, 605-618. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.049>
- Puczko, K. & Jekatierynczuk-Rudczyk, E. (2020). Extreme Hydro-Meteorological Events Influence to Water Quality of Small Rivers in Urban Area: A Case Study in Northeast Poland. *Scientific Reports*, 10:10255. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67190-4>
- Pułyk, M. (2017). *Stan środowiska w Wielkopolsce. Raport 2017*. Poznań: Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Poznaniu, Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Richling, A., Solon, J., Macias, A., Balon, J., Borzyszkowski, J., & Kistowski, M. (red.). (2021). *Regionalna geografia fizyczna Polski*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Rosa, B., & Kozarski, S. (1980). *Przeglądowa mapa geomorfologiczna Polski 1:500 000, arkusz Poznań*. Warszawa: Instytut Geografii PAN.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 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. 2019, poz. 2149.

- 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 Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu. Dz.U. 2012, poz. 1031.
- Ruiz, M., & Velasco, J. (2010). Nutrient Bioaccumulation in Phragmites australis: Management Tool for Reduction of Pollution in the Mar Menor. *Water Air and Soil Pollution*, 205(1-4), 173-185. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0064-2>
- Szpikowska, G., & Tylkowski, J. (2006). Denudation balance of the Upper Parseta catchment in the years 2000-2004. *Quaestiones Geographicae*, 25a(25), 75-82.
- Szép, R., Mateescu, E., Niță, I.A., Marius-Victor, Birsan, M.V., Bodor, Z., & Keresztesi, A. (2018). Effects of the Eastern Carpathians on atmospheric circulations and precipitation chemistry from 2006 to 2016 at four monitoring stations (Eastern Carpathians, Romania). *Atmospheric Research*, 214, 311-328. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.009>
- Tylkowski, J., & Kostrzewski, A. (2017). *Stan geoekosystemów Polski w 2016 roku*. Pobrane z: [http://zmsp.gios.gov.pl/wpcontent/uploads/2016/11/raport\\_2016.pdf](http://zmsp.gios.gov.pl/wpcontent/uploads/2016/11/raport_2016.pdf) (20.06.2021).
- Tylkowski, J., Czyryca, P., Samołyk, M., & Winowski, M. (2019). *Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Wolin w 2018 roku*. Biała Góra: mscr.

## Summary

Precipitation in open space is one of the stages of the water cycle representing an element of "entry" into the geoecosystem. Rainfall supplies various pollutants from the atmosphere to the ground, with these including dissolved chemical components. This makes it important for selected physicochemical parameters to be quantified at this stage of the water cycle, in order for processes taking place in the natural environment more widely to be properly elucidated.

The research detailed here was conducted over 5 hydrological years (2016-2020 inclusive) within the borders of the urban catchment of the Różany Strumień stream flowing through the northern part of the large Polish city of Poznań. The natural environment of the Różany Strumień catchment is characterised by significant transformations due to human activity. Key environmental problems here include threats relating to the pollution of surface waters and groundwater, as a result of processes associated with the functioning of the urban catchment.

The main aim here is to present the level of supply into the catchment of pollutants, and to determine the temporal variability of matter circulation in this small urban catchment, in years with different pluvial conditions, and therefore quantitatively variable atmospheric supply to the geoecosystem.

Levels of supply of pollutants into the catchment were determined through systematic and comprehensive measuring of the natural environment. The measurement system and field-research methodology relate to the methodological concept of system functioning, as well as the assumptions of Poland's Programme of Integrated Monitoring of the Natural Environment (IMNE).

Results for the measurement of several different environmental components are presented, beginning with core meteorological conditions (precipitation and air temperature). The average annual air temperature in all 5 analysed years was higher than the long-term average for the IMGW-PIB Poznań-Ławica Station over the 1981-2010 period, equal to 8.8°C. The coldest year was 2017 with an average annual air temperature of 9.3°C; in turn, the warmest years were 2019 and 2020 (the average annual air temperature was 10.7°C). Atmospheric water supply to the catchment area was much smaller in the dry years 2018-2019 and equaled to 437.8 mm and 467.5 mm, respectively. The year 2017 was the wettest (744.2 mm), exceeding the average total monthly precipitation from the long-term period 1981-2010 by 222 mm. In the remaining two years, total annual precipitation was 652.5 mm (2016) and 592.8 mm (2020).

Further elements of the research relate to air pollution with SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>, as well as to the chemical composition of precipitation considered to enter the geoecosystem. The permissible concentrations of sulfur dioxide (20 µg·m<sup>-3</sup>) and nitrogen dioxide (40 µg·m<sup>-3</sup>) were not exceeded in any of the analysed year. The highest monthly concentrations were recorded in the winter half-year, which was caused by the heating season and the burning of fossil fuels. At the beginning of the analysed five-year period, an increase indicators of participation of acidic factors in acidulating precipitations (defined as the ratio of the weighted average concentrations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) was observed. In turn, in 2020, this indicator decreased again and was the lowest in the years 2016-2020. This indicates a lower share of nitrates and a greater share of sulphates in precipitation.

Precipitation in the Różany Strumień catchment is characterised by relatively low mineralisation and normal pH. The average atmospheric deposition (loads) in the analysed five-year period was 2800 kg·km<sup>-2</sup>; with an average annual precipitation total of 578.4 mm. The lowest atmospheric deposition of 2200 kg·km<sup>-2</sup> was recorded in 2019 (with an annual precipitation total of 467.5 mm), and the highest 3500 kg·km<sup>-2</sup> in 2017 (with an annual precipitation of 741.4 mm).

Further findings concern physicochemical properties (i.a. levels, flows and chemical composition) of surface waters and groundwater. Highest water level and also water flow, were recorded directly after daily precipitation totals < 20 mm. Favorable rainfall conditions in 2016-2017 had a positive effect on the water flows, as the highest ones occurred in the Różany Strumień in wet a 2017 and at the beginning of 2018. The Różany Strumień waters were characterised by a slightly alkaline pH (8.0) and high mineralisation (SEC = 88.6 mS·m<sup>-1</sup>) in the 2016-2020 period. The high value of SEC was related, among others, to anthropogenic transformations in the catchment area (land use changes, deforestation for urbanization and agricultural purposes), as well as the supply of polluted water to watercourses or surface runoff from agricultural areas.

The denudation balance was also determined. In lowland regions, chemical denudation processes outweigh mechanical denudation processes. In the analysed catchment there is a positive balance of biogenic ions and ions supplied by human activity (e.g. through fertiliser use) – NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and K<sup>+</sup>. Other chemical components (denudation ions) occurring in the waters circulating in the catchment are characterized by a negative balance.

The denudation balance analysis of the Różany Strumień catchment can serve as a good indicator of anthropopressure, and especially the excessive supply of the natural environment in nutrients (from both fertilisers and domestic pollutants).