



Przestrzenne i sezonowe zróżnicowanie wybranych parametrów jakości wody w zlewni zurbanizowanej na przykładzie Potoku Służewieckiego

Spatial and seasonal variability of selected water quality parameters in an urbanised catchment as exemplified by Warsaw's Służewiecki Stream

Agnieszka Halaś • Kaja Czarnecka • Krzysztof Piasecki • Maksym Łaszewski¹

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

¹Zakład Hydrologii

ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

agnieszkahalas95@gmail.com • kajaczarnecka@wp.pl • krzysztofpiasecki96@gmail.com • m.laszewski@uw.edu.pl

Zarys treści. Celem opracowania było określenie przestrzennego i sezonowego zróżnicowania wybranych cech jakości wody w zlewni zurbanizowanej. Pomiary terenowe przeprowadzono w silnie przekształconej zlewni Potoku Służewieckiego, będącego największym dopływem Wisły płynącym w granicach Warszawy. Od listopada 2017 do października 2018 r. w regularnym cyklu dwutygodniowym łącznie w 11 punktach pomiarowych oznaczono temperaturę wody, nasycenie wody tlenem, przewodnictwo elektryczne oraz odczyn, natomiast w cyklu miesięcznym – stężenie azotanów NO_3 i fosforanów PO_4 . Wyniki wskazały, że główną przyczyną przestrzennego zróżnicowania reżimu fizyczno-chemicznego Potoku Służewieckiego są przepływowe zbiorniki wodne, powodujące przekształcenie warunków termiczno-tlenowych oraz unieruchomienie jonów. Wyraźny wpływ na jakość wód Potoku Służewieckiego miały także jego dopływy oraz funkcjonowanie lotniskowej oczyszczalni wód opadowych. Stwierdzono wyraźne sezonowe zróżnicowanie cech fizyczno-chemicznych, uzależnione od warunków meteorologicznych i hydrologicznych, cyklu wegetacyjnego organizmów fotosyntetyzujących oraz zmian antropopresji.

Słowa kluczowe: jakość wody, parametry fizyczno-chemiczne, antropopresja, Potok Służewiecki, zlewnia zurbanizowana.

Wstęp

W związku z dużym znaczeniem ekologicznym, krajobrazowym oraz rekreacyjnym cieków miejskich, problematyka jakości ich wód stanowi w ostatnich latach ważne zagadnienie badawcze i jest często poruszana w literaturze hydrologicznej (Paul i Meyer, 2008). Zainteresowanie tą tematyką należy wiązać również z ogromną presją, jaką miasta wywierają na obiekty hydrograficzne, m.in. poprzez nadmierne uszczelnienie ich zlewni, prowadzące do trwałego zaburzenia obiegu wody (White i Greer, 2006; Bartnik, 2017). W rezultacie cieki płynące w obrębie dużych aglomeracji miejskich w porównaniu do rzek naturalnych są w większym stopniu narażone na występowanie gwałtownych wezbrań oraz długotrwałych i głębokich niżówek (White i Greer, 2006; Bartnik, 2016). Pogorszeniu ulega także

jakość wody, przede wszystkim na skutek bezpośredniego dopływu ścieków siecią kanalizacji deszczowej, jak również intensywnego spływu powierzchniowego, dostarczającego dużą ilość zawiesiny i zanieczyszczeń z uszczelnionych powierzchni miasta (Tong i Chen, 2002; Tu, 2013; Liu i inni, 2014; Mamun i An, 2019).

Potok Służewiecki, płynący przez silnie zurbanizowany obszar południowej części Warszawy, stanowi duże zagrożenie powodziowe, powodując w trakcie obfitych opadów deszczu liczne podtopienia. W ciągu ostatnich kilkunastu lat ciek ten stał się ważnym obiektem badań prowadzonych zarówno przez ośrodki naukowo-badawcze, jak i instytucje ochrony środowiska. Najwięcej uwagi poświęcono przepływowi wezbraniowym Potoku (Oksiuta, 2007; Krajewski i Banasik, 2013; Barszcz, 2017), metodom ich prognozowania (Barszcz, 2009, 2014b, 2015, 2018), jak również wykorzystaniu obiektów małej retencji do redukcji fal kulminacyjnych (Pietrak i Banasik, 2009; Barszcz, 2014a). W związku z intensywną, postępującą zabudową zlewni Potoku Służewieckiego, analizie poddano również wpływ zmian użytkowania terenu na obieg wody w jej obrębie (Oksiuta, 2008). Zagadnienia dotyczące jakości wód Potoku były poruszane w literaturze przedmiotu zdecydowanie rzadziej. Najważniejszymi opracowaniami z tego zakresu są publikacje Bojakowskiej i innych (2012) oraz Wojtkowskiej i innych (2018) wskazujące na złą jakość tychże wód, spowodowaną dostawą chlorków, siarczanów, wapnia i sodu poprzez sieć kanalizacji deszczowej. Warto dodać, że w celu zlokalizowania źródeł zanieczyszczenia, Potok Służewiecki został objęty okresowym monitoringiem jakości wody, m.in. w marcu i kwietniu 2015 r. (Mielnicki i inni, 2015). W zlewni tej nie prowadzono jednak cyklicznych pomiarów podstawowych parametrów fizyczno-chemicznych wody uwzględniających oddziaływanie czynników antropogenicznych (m.in. oddanego do eksploatacji w 2015 r. Stawu Służewieckiego, Stawu Wyścigi oraz oczyszczalni wód opadowych).

Niniejsza praca dotyczy wybranych parametrów jakości wody w silnie zurbanizowanej oraz przekształconej zlewni Potoku Służewieckiego. Szczegółowe cele opracowania objęły: (1) identyfikację zmian parametrów fizyczno-chemicznych wody wzdłuż biegu Potoku Służewieckiego; (2) określenie sezonowego zróżnicowania zmian parametrów fizyczno-chemicznych w zlewni; (3) ocenę wpływu wybranych form antropopresji – przepływowych zbiorników wodnych, oczyszczalni wód deszczowych oraz regulacji cieków – na zmiany parametrów fizyczno-chemicznych wody.

Obszar badań

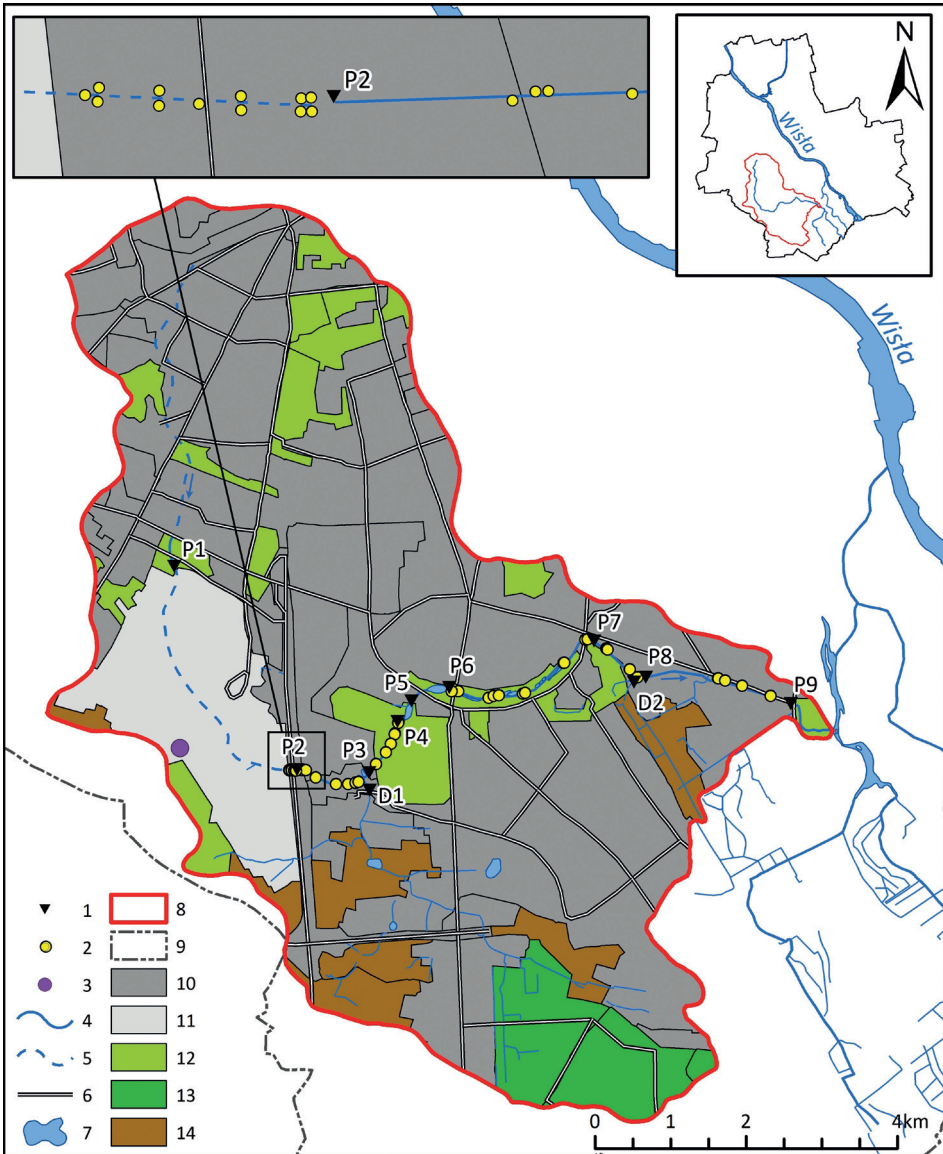
Potok Służewiecki jest niewielkim ciekami o długości 17,1 km i powierzchni zlewni 65,3 km², przepływającym przez południową część lewobrzeżnej Warszawy na granicy dwóch mezo-regionów – Równiny Warszawskiej oraz Doliny Środkowej Wisły (Kondracki, 2011). Rzeźba terenu zlewni charakteryzuje się niewielkim zróżnicowaniem wysokościowym; maksymalna deniwelacja wynosi 46 m, natomiast średni spadek zaledwie 5,7‰. Potok Służewiecki rozpoczyna swój bieg na warszawskiej Ochocie i aż do wylotu z oczyszczalni wód opadowych na Okęciu, płynie krytym kanałem o długości ok. 6,8 km. Poza krótkimi odcinkami w formie kolektorów, przeprowadzonymi pod liniami komunikacyjnymi i zabudowaniami, pozostała część koryta jest odkryta (10,0 km) i ma charakter umocnionego, prostego kanału. Przepływ średni Potoku Służewieckiego w profilu wodowskazowym Wyścigi (poniżej stawu) w latach 2009–2012 wyniósł 0,216 m³/s (Krajewski i Banasik, 2013). W środko-

wym biegu zlokalizowano dwa przepływowe zbiorniki – Staw Wyścigi i Staw Służewiecki. Pierwszy z nich jest zbiornikiem detencyjnym o długości ok. 250 m i powierzchni równej 1,9 ha (Rada m.st. Warszawy, 2010). Pojemność stała Stawu Wyścigi wynosi 28 tys. m³, natomiast pojemność całkowita – 46 tys. m³ (Pietrak i Banasik, 2009). Drugi zbiornik przepływowy, Staw Służewiecki, cechuje się z kolei większą powierzchnią, wynoszącą 2,6 ha oraz długością ok. 300 m. Pojemność stała Stawu Służewieckiego wynosi 29 tys. m³, natomiast całkowita 42 tys. m³. Głębokość zbiornika przy Normalnym Poziomie Piętrzenia jest równa 1,15 m, wzrastając do 1,92 m w przypadku całkowitego napełnienia (Fundacja Promocji m.st. Warszawy, 2015). Potok Służewiecki ma łączność również ze zbiornikami bocznymi (Stawami Berensewicz), których głównym zadaniem jest przechwytywanie wody podczas wezbrań. Ich łączna powierzchnia wynosi 1,1 ha, pojemność stała jedynie 12 tys. m³, natomiast pojemność całkowita – 32 tys. m³. Ciek uchodzi do Jeziora Wilanowskiego, położonego u podnóża tarasu zalewowego Wisły w Wilanowie.

Zlewnia Potoku Służewieckiego jest silnie zurbanizowana, o czym świadczy 86,8% udział zabudowy miejskiej oraz terenów komunikacyjnych, przemysłowych i handlowych w jej całkowitej powierzchni (ryc. 1). Tereny rolnicze oraz zieleń miejska, zajmują jedynie 8,9% powierzchni zlewni. Potok Służewiecki zasilany jest przez liczne dopływy (Banasik, 2002); do największych należy Rów Grabowski oraz Kanał Wolicki. Bezpośrednio do ciek uchodzą również kanały odprowadzające wody deszczowe z obszaru Mokotowa, Ursynowa i Wilanowa, co skutkuje, szczególnie w porze letniej, gwałtownymi wezbrzeniami (Oksiuta, 2008). Podczas inwentaryzacji przeprowadzonej w sierpniu 2018 r. na odkrytym odcinku ciek od wylotu z oczyszczalni wód opadowych do ujścia zidentyfikowano łącznie 51 przyłączy kanalizacji deszczowej.

Materiały i metody

Pomiary parametrów jakości wody w zlewni Potoku Służewieckiego przeprowadzono w okresie pełnego roku hydrologicznego od 1 listopada 2017 r. do 31 października 2018 r. W regularnym cyklu dwutygodniowym zmierzono temperaturę wody [°C], nasycenie wody tlenem [%], przewodnictwo elektryczne [$\mu\text{S}/\text{cm}$] oraz odczyn wody [pH], wykorzystując przenośne urządzenia Hanna HI 98193 (o dokładności 0,1°C i $\pm 1,5\%$ mg/dm³) oraz Hanna HI 9811-5 (o dokładności 0,1 pH oraz $\pm 2,0\%$ $\mu\text{S}/\text{cm}$). Raz w miesiącu, bezpośrednio w terenie, oznaczono również stężenie substancji biogennej – azotanów NO₃ [mg/dm³] i fosforanów PO₄ [mg/dm³] – za pomocą fotometru Slandi LF300 oraz dedykowanych odczynników firmy Aquanal. Wymienione parametry jakości wody cechują się dużą prostotą oraz dokładnością oznaczenia i są jednocześnie relatywnie łatwe do interpretacji, przez co stanowią dobre tło do wstępnej oceny funkcjonowania zlewni. Pomiary oraz oznaczenia chemiczne wykonano łącznie w 11 punktach, rozmieszczonych wzdłuż biegu Potoku Służewieckiego (P1–P9) oraz w odcinkach ujściowych jego dwóch największych dopływów – Rowie z Grabowa (D1) i Kanale Wolica (D2) (ryc. 1). Rozmieszczenie punktów pomiarowych na różnych odcinkach ciek umożliwia ocenę wpływu czynników antropogenicznych oraz cech zlewni na przestrzenne zróżnicowanie parametrów fizyczno-chemicznych wód Potoku. W związku z powyższym zlokalizowano je m.in. poniżej oczyszczalni wód opadowych na Okęciu (P2), ujścia dopływów (P3 i P8) oraz przepływowych zbiorników wodnych (P5 i P6).



Ryc. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych na tle użytkowania terenu zlewni Potoku Służewieckiego

1 – punkt pomiarowy, 2 – wyloty sieci kanalizacyjnej, 3 – stacja meteorologiczna, 4 – ciekie, 5 – kanał kryty, 6 – drogi, 7 – zbiorniki wodne, 8 – granica zlewni, 9 – granica miasta, 10 – tereny zabudowane, 11 – port lotniczy im. Fryderyka Chopina, 12 – zieleń miejska, 13 – tereny leśne, 14 – tereny rolnicze

Location of measurement sites against the background of land use in the Służewiecki Stream catchment area
 1 – measurement site, 2 – sewer outlets, 3 – meteorological station, 4 – watercourses, 5 – underground channel, 6 – roads, 7 – water bodies, 8 – catchment area, 9 – Warsaw city limits, 10 – built-up areas, 11 – Warsaw Chopin Airport, 12 – municipal greenery, 13 – forest, 14 – agriculture areas

Opracowanie własne na podstawie CORINE Land Cover 2018 oraz Mapy Podziału Hydrograficznego Polski 2010/Author's own elaboration based on CORINE Land Cover 2018 and the Digital Hydrographic Map of Poland from 2010.

Na podstawie uzyskanych w terenie danych dla każdego punktu pomiarowego wyznaczono podstawowe miary położenia i zmienności (średnią, maksimum, minimum, medianę, rozstęp międzykwartylowy), które przedstawiono za pomocą wykresów pudełkowych oraz w postaci tabelarycznej. Za pomocą wykresów pudełkowych, w ujęciu miesięcznym, zaprezentowano również sezonowy przebieg parametrów fizyczno-chemicznych. Podobieństwo punktów pomiarowych pod względem poszczególnych parametrów fizyczno-chemicznych określono z kolei za pomocą hierarchicznej metody aglomeracji Warda wykorzystującej odległość euklidesową jako miarę podobieństwa. Analizę statystyczną przeprowadzono w programie Statistica 12.0.

Do oceny tła meteorologicznego podczas pomiarów, wykorzystano wartości średniej dobowej temperatury powietrza oraz dobowych sum opadu ze stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie (IMGW-PIB), położonej w granicach badanej zlewni. Pozyskane i przetworzone dane odniesiono do wartości średnich miesięcznych z wielolecia 1981–2017.

Wyniki

Tło meteorologiczne

Rok hydrologiczny 2018 na stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie można zakwalifikować jako ciepły i suchy. Średnia temperatura wyniosła 10,5°C i była o 1,9°C wyższa niż średnia z wielolecia, natomiast suma opadów osiągnęła jedynie 451 mm, co stanowiło wartość o ponad 110 mm mniejszą od normy z wielolecia (tab. 1). Luty oraz marzec były jedynymi miesiącami, w których temperatura powietrza była niższa od średniej z wielolecia. W pozostałych miesiącach zanotowano wartości wyższe od średniej wieloletniej (nawet o 4,7°C w kwietniu). Począwszy od lutego aż do czerwca notowany był także znaczny niedobór opadów, który najsilniej zaznaczył się w czerwcu (tab. 1). Największy opad dobowy (40 mm) zanotowano 11 sierpnia i spowodował on gwałtowne wezbranie, powodujące lokalne podtopienia w dolinie Potoku Służewieckiego.

Zmiany parametrów fizyczno-chemicznych wody wraz z biegiem rzeki

Na podstawie rozkładu statystycznego wartości temperatury wody w poszczególnych punktach pomiarowych oraz metody aglomeracji można wyróżnić dwie grupy punktów charakteryzujących się zbliżonymi warunkami termicznymi (ryc. 2a, 3a). Do pierwszej należą punkty pomiarowe zlokalizowane przed zbiornikami (P1–P4), natomiast do drugiej punkty położone pomiędzy oraz poniżej tych zbiorników (P5–P9). W punktach P1–P4 zanotowano przeciętnie niższą temperaturę wody oraz jej zdecydowanie mniejsze zmiany w ciągu roku w porównaniu do punktów P5–P9 (tab. 2). Przed zbiornikami maksymalna temperatura nie przekroczyła 19,6°C, podczas gdy poniżej zbiorników wartości maksymalne osiągnęły od 22,8°C do 26,6°C. Temperatura wody w dopływach Potoku była wyraźnie zróżnicowana – Rów Grabowski (D1) wykazał podobieństwo do górnego biegu Potoku, natomiast Kanał Wolicki (D2) był zdecydowanie cieplejszy.

Warunki tlenowe w wodach Potoku Służewieckiego oraz jego dopływach odznaczyły się również wyraźnym zróżnicowaniem przestrzennym (ryc. 2b); najniższe nasycenie tlenem zmierzono pomiędzy Stawem Wyścigi i Stawem Służewieckim (P5) – 12,4%, natomiast najwyższe w Dolinie Służewieckiej (P7) – 137%. Średnio, najniższe nasycenie wody

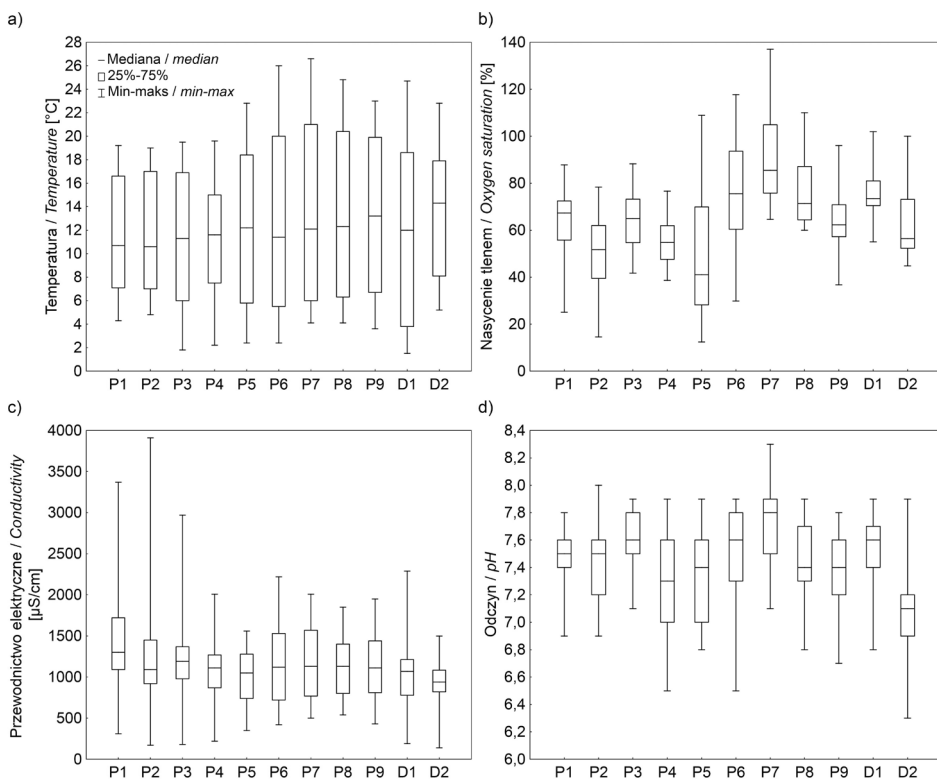
Tabela 1. Temperatura powietrza (Tp) i sumy opadów (P) w poszczególnych miesiącach roku hydrologicznego 2018 na tle wartości średnich z wielolecia 1981–2017
Air temperature (Tp) and precipitation totals (P) in particular months of the hydrological year 2018 against the background of mean values for the multiyear period 1981–2017

| Miesiąc Month | Tp [°C] 2018 | Tp [°C] 1981–2017 | P [mm] 2018 | P [mm] 1981–2017 |
|------------------|-----------------|----------------------|----------------|---------------------|
| XI | 5,0 | 3,4 | 40,9 | 39,7 |
| XII | 2,5 | -0,3 | 37,3 | 37,6 |
| I | 0,7 | -1,9 | 27,8 | 30 |
| II | -3,4 | -0,9 | 8,0 | 28,3 |
| III | 0,4 | 3,0 | 15,3 | 31,5 |
| IV | 13,4 | 8,7 | 17,5 | 37,7 |
| V | 18,8 | 14,3 | 35,3 | 58,8 |
| VI | 19,8 | 17,0 | 22,0 | 71,3 |
| VII | 21,6 | 19,2 | 86,4 | 80,9 |
| VIII | 21,1 | 18,5 | 63,4 | 63,4 |
| IX | 15,8 | 13,7 | 45,2 | 50,0 |
| X | 10,3 | 8,5 | 52,4 | 38,0 |
| Rok/Year | 10,5 | 8,6 | 451,5 | 567,3 |

Opracowanie własne na podstawie danych ze stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie
Author's own elaboration, based on the data from the Warsaw-Okęcie Meteorological Station.

tlenem zanotowano w punkcie P2 położonym poniżej lotniska Okęcie (49,9%), natomiast najwyższe w punkcie P7 (90,8%) (tab. 2). Na podstawie wyników aglomeracji wyróżniono dwie grupy. Pierwszą grupę utworzyły punkty o największym podobieństwie, czyli P1–P4, P9 oraz dopływy (D1, D2), które cechowały się mniejszymi zmianami warunków tlenowych oraz niższymi wartościami maksymalnymi. Nasycenie tlenem w większości z tych punktów nigdy nie przekroczyło 100% (oprócz punktu D1) (ryc. 3b). Osobną grupę stanowiły punkty P6–P8, odznaczające się większymi wahaniami natlenienia, o czym świadczy szerszy rozstęp międzykwartyłowy oraz częste przesylenie wody tlenem. Wyróżniającym okazał się punkt P5, zlokalizowany pomiędzy Stawem Wyścigi i Stawem Służewieckim, w którym zmiany warunków tlenowych były największe.

W przypadku przewodnictwa elektrycznego zdecydowanie wyróżniły się punkty P1 oraz P2 (ryc. 3c), odznaczające się najwyższą średnią konduktywnością (przekraczającą średnio 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) – tab. 2, a także najwyższymi wartościami maksymalnymi (3910 $\mu\text{S}/\text{cm}$ w P2). Wraz z biegiem ciekłu konduktywność zmniejszała się, osiągając najniższe wartości pomiędzy zbiornikami (P5), jednocześnie stabilizując się – od punktu P6 do P9 wyniosła średnio 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ryc. 2c). Warto zauważyć, że w punkcie P5 przewodnictwo elektryczne charakteryzowało się najmniejszymi zmianami oraz najniższą wartością średnią, wynoszącą 992 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Należy dodać, że Kanał Wolicki (D2) odznaczył się najniższym średnim przewodnictwem w całej zlewni, natomiast Rów Grabowski powodował obniżenie przewodnictwa w punkcie P3 z uwagi na dopływ relatywnie dużej ilości wody (o konduktywności niemal 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ niższej w stosunku do P2).



Ryc. 2. Rozkład statystyczny zmierzonych wartości temperatury wody (a), nasycenia tlenem (b), przewodnictwa elektrycznego (c) oraz odczynu (d)

Statistical distribution of measured values of water temperature (a), dissolved oxygen saturation (b), conductivity (c), and pH (d)

Opracowanie własne, tak samo pozostała tabela i ryciny / Author's own elaboration, like remaining table and figures.

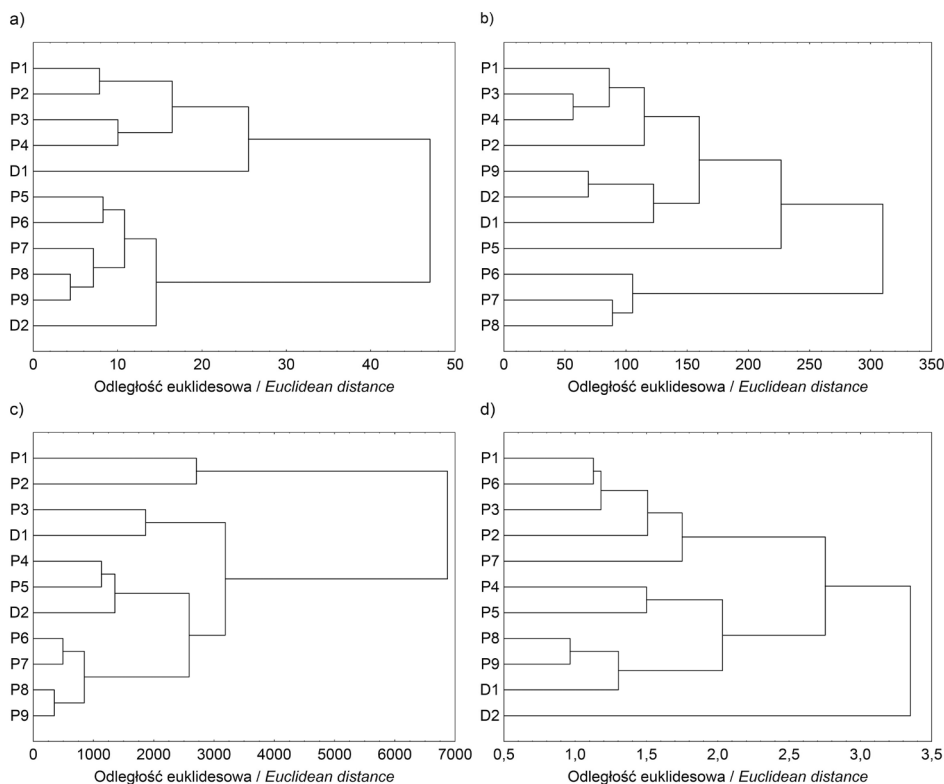
Tabela 2. Średnie wartości poszczególnych parametrów fizyczno-chemicznych w punktach pomiarowych w roku hydrologicznym 2018

Mean values for physico-chemical parameters at measurement sites in the course of the hydrological year 2018

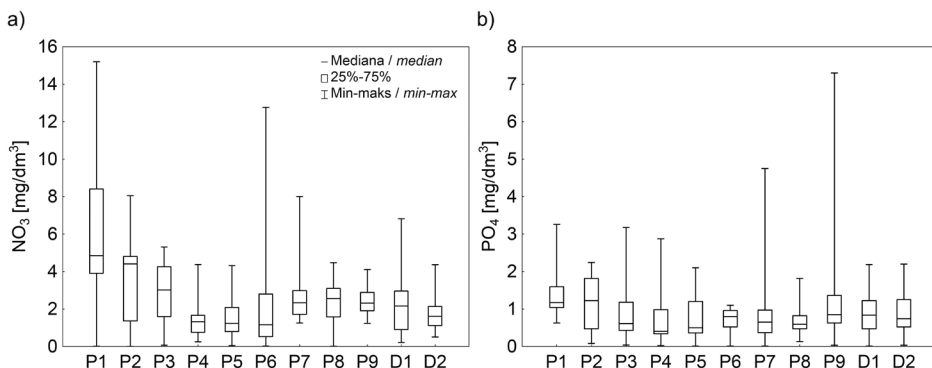
| Punkt pomiarowy Measurement site | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | D1 | D2 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura [°C] Temperature [°C] | 11,9 | 11,7 | 11,5 | 11,1 | 12,5 | 13,2 | 14,2 | 13,7 | 13,2 | 11,7 | 13,3 |
| Nasylenie wody tlenem [%] Oxygen saturation [%] | 62,9 | 49,9 | 64,0 | 55,7 | 50,6 | 76,6 | 90,8 | 76,7 | 64,2 | 76,3 | 62,2 |
| Przewodnictwo elektryczne [µS/cm] Conductivity [µS/cm] | 1429 | 1404 | 1274 | 1082 | 992 | 1112 | 1158 | 1128 | 1110 | 1115 | 938 |
| Odczyn pH | 7,5 | 7,6 | 7,6 | 7,5 | 7,5 | 7,6 | 7,8 | 7,5 | 7,5 | 7,6 | 7,2 |
| Stężenie azotanów NO ₃ [mg/l] Nitrate concentration NO ₃ [mg/l] | 6,24 | 3,74 | 2,84 | 1,59 | 1,57 | 2,7 | 3,12 | 2,41 | 2,37 | 2,39 | 1,84 |
| Stężenie fosforanów PO ₄ [mg/l] Phosphate concentration PO ₄ [mg/l] | 1,46 | 1,13 | 0,96 | 0,76 | 0,73 | 0,68 | 1,02 | 0,79 | 1,43 | 0,87 | 0,96 |

Odczyn wód Potoku Służewieckiego w większości pomiarów był obojętny lub lekko zasadowy (7,1–7,8) (ryc. 2d). Oprócz punktu P7, odznaczającego się średnio najwyższym odczynem (7,8) (tab. 2), maksymalny odczyn nie przekroczył w pozostałych punktach 8 jednostek. Średni odczyn dla większości punktów w zlewni wynosił między 7,5 a 7,6 – jedynym wyjątkiem był Kanał Wolicki (D2) prowadzący wodę o średnim odczynie 7,2 oraz najbardziej zmiennym stopniu kwasowości/zasadowości (ryc. 3d). W punkcie tym zmierzono ponadto najniższy w badanym okresie, lekko kwaśny odczyn, równy 6,3.

Stężenie azotanów w okresie badawczym było wyraźnie zróżnicowane przestrzennie (ryc. 4a). Najniższe średnie stężenie NO_3 zanotowano w punkcie P5, położonym pomiędzy zbiornikami (1,57 mg/dm^3), natomiast najwyższe w punkcie P1 zlokalizowanym w górnym biegu Potoku Służewieckiego (6,24 mg/dm^3) (tab. 2). Stężenie azotanów zmniejszało się wraz z biegiem cieką na odcinku od punktu P1 do P5, o czym świadczy spadek wartości średnich, jak również zmniejszający się zakres absolutny. W punkcie P6 położonym poniżej Stawu Wyścigi, jak również w dolnym biegu reprezentowanym przez punkty P7–P9, zaobserwowano jednak ponowny wzrost stężenia NO_3 , jak również jego większe zróżnicowanie. W dopływach stężenie azotanów było średnio niższe niż w wodach Potoku Służewieckiego,



Ryc. 3. Dendrogramy przedstawiające grupowanie punktów objętych pomiarami temperatury wody (a), nasycenia tlenem (b), przewodnictwa elektrycznego (c) oraz odczynu (d)
Dendrograms showing clustering results for measured values of water temperature (a), dissolved oxygen saturation (b), conductivity (c), and pH (d)

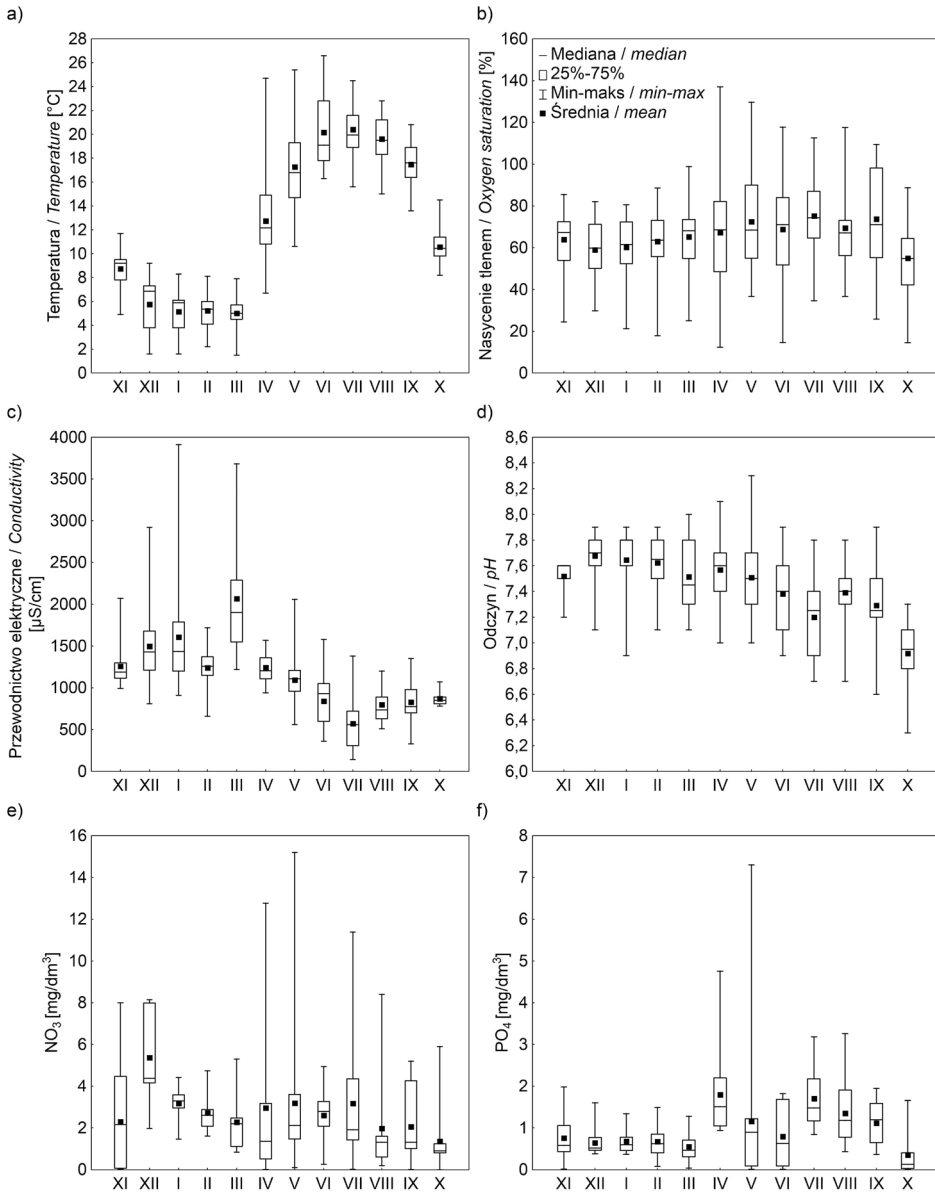


Ryc. 4. Rozkład statystyczny zmierzonych wartości stężeń azotanów NO_3 (a) oraz fosforanów PO_4 (b)
Statistical distribution of measured values of nitrates NO_3 (a) and phosphates PO_4 (b)

co skutkowało spadkiem stężenia NO_3 w punktach położonych poniżej ich ujścia (P4, P8). Przestrzenne zróżnicowanie stężenia fosforanów PO_4 w zlewni Potoku Służewieckiego było zdecydowanie mniejsze niż w przypadku azotanów (ryc. 4b). Najniższe średnie stężenie PO_4 zanotowano w punkcie P6, położonym poniżej Stawu Wyścigi ($0,68 \text{ mg/dm}^3$), natomiast najwyższe przeciętne stężenie PO_4 wystąpiło ponownie w punkcie P1 ($1,46 \text{ mg/dm}^3$) (tab. 2). Zbliżona wartość charakteryzowała również punkt P9, położony w dolnym biegu ($1,43 \text{ mg/dm}^3$), odznaczający się największymi zmianami stężenia PO_4 w badanym okresie. Zróżnicowanie stężenia PO_4 w obrębie dopływów było nieznaczne, na co wskazują zbliżone wartości średnie, jak również podobny rozkład statystyczny.

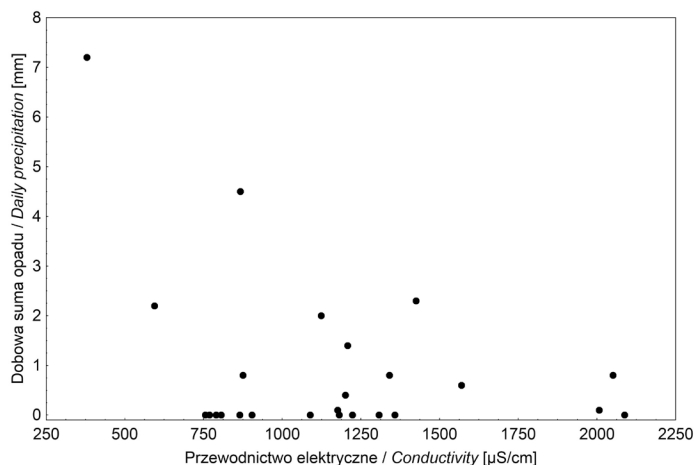
Sezonowe zróżnicowanie parametrów fizyczno-chemicznych

W roku hydrologicznym 2018 temperatura wody odznaczyła się wyraźnymi zmianami sezonowymi, osiągając wartości od $1,5^\circ\text{C}$ do $26,6^\circ\text{C}$ (ryc. 5a). Średnio najniższą wartość temperatury wody w zlewni Potoku Służewieckiego zmierzono podczas ujemnych wartości temperatury powietrza 21 grudnia oraz 18 stycznia i wyniosła wówczas $4,0^\circ\text{C}$. Najwyższa średnia wartość temperatury wody w zlewni została zanotowana 21 czerwca, kiedy osiągnęła $21,2^\circ\text{C}$. W przebiegu temperatury wody wyraźnie zaznaczył się kwiecień, kiedy zaobserwowano gwałtowny wzrost jej wartości po okresie zimowym aż do niespełna $25,0^\circ\text{C}$. Miesiąc ten charakteryzował się w konsekwencji największym zróżnicowaniem termicznym. W sezonowym przebiegu nasycenia wody tlenem również należy wyróżnić dwa okresy (ryc. 5b). Od listopada do marca nasycenie wody tlenem nie przekroczyło 100% i odznaczało się niewielkim zróżnicowaniem. W okresie od kwietnia do września warunki tlenowe w zlewni Potoku Służewieckiego były zdecydowanie bardziej zmienne, na co wskazuje rozstęp międzykwartylowy; w okresie tym woda była często przesycona tlenem. Średnio, najniższe nasycenie wody tlenem w zlewni omawianego cieku zanotowano jesienią, kiedy 23 października wyniosło jedynie 51,8%, natomiast najwyższe 25 lipca, kiedy osiągnęło 83,5%. Przewodnictwo elektryczne wód w zlewni Potoku Służewieckiego wahało się w ciągu 2018 r. od $140 \mu\text{S/cm}$ do $3910 \mu\text{S/cm}$ (ryc. 5c) i było ściśle związane z występowaniem opadów atmosferycznych (ryc. 6) oraz ich rodzajem. W grudniu, styczniu i marcu



Ryc. 5. Rozkład statystyczny zmierzonych wartości temperatury wody (a), nasylenia tlenem (b), przewodnictwa elektrycznego (c), odczynu (d), stężenia NO_3 (e) oraz stężenia PO_4 (f) w poszczególnych miesiącach dla wszystkich punktów pomiarowych

Statistical distribution of all measured values of water temperature (a), dissolved oxygen saturation (b), conductivity (c), pH (d), NO_3 concentration (e) and PO_4 concentration (f) for certain months



Ryc. 6. Zależność pomiędzy średnim przewodnictwem elektrycznym wody w zlewni Potoku Służewieckiego i dobową sumą opadu na stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie w dniu poprzedzającym pomiar
Relationship between mean water conductivity in the Służewiecki Stream catchment and daily precipitation totals at the Warsaw-Okęcie Meteorological Station on the day preceding measurement

zanotowano wysokie wartości przewodnictwa, przekraczające nawet 3000 $\mu\text{S/cm}$. Najwyższa średnia wartość została odnotowana 20 marca (2088 $\mu\text{S/cm}$), trzy dni po wystąpieniu opadów śniegu, które spowodowały utworzenie pokrywy o grubości 6 cm. Odmienna sytuacja panowała od kwietnia do października, kiedy wartości przewodnictwa elektrycznego wynosiły z reguły od 800 do 1200 $\mu\text{S/cm}$, zaś w przypadku wystąpienia opadów deszczu były jeszcze niższe. Najniższą średnią wartość odnotowano 12 lipca (379 $\mu\text{S/cm}$); pomiary poprzedziły wówczas opady deszczu o wysokości 7,2 mm. Sezonowe zróżnicowanie odczynu w zlewni Potoku Służewieckiego, w odróżnieniu od pozostałych parametrów, było niewielkie (ryc. 5d). W ciągu roku obserwowano relatywny wzrost kwasowości, który najbardziej zaznaczył się w okresach od maja do lipca i od września do października.

W przypadku azotanów NO_3 , najniższe stężenie w zlewni Potoku Służewieckiego zanotowano w październiku (1,35 mg/dm^3), natomiast najwyższe w grudniu (5,37 mg/dm^3) (ryc. 5e). Pomiędzy styczniem a marcem zaobserwowano relatywnie niewielkie stężenia NO_3 , co było widoczne szczególnie w przypadku wartości maksymalnych. Od kwietnia do lipca stosunkowo wysokie średnie stężenia NO_3 były efektem wysokich maksymalnych wartości w wybranych punktach pomiarowych, przekraczających 10 mg/dm^3 (przykładowo 12,77 mg/dm^3 w kwietniu oraz 15,2 mg/dm^3 w maju). Począwszy od sierpnia średnie oraz maksymalne wartości stężeń NO_3 ponownie uległy obniżeniu. Zawartość fosforanów PO_4 w zlewni Potoku Służewieckiego charakteryzowała się zdecydowanie większym zróżnicowaniem sezonowym niż w przypadku azotanów (ryc. 5f). Najniższe wartości stężeń wystąpiły w miesiącach zimowych – od listopada do marca oraz w październiku, w którym to zmierzono najniższą wartość średnią dla całej zlewni (0,36 mg/dm^3). Od kwietnia do września stężenie fosforanów było na ogół wyższe, szczególnie w zakresie wartości maksymalnych. Najwyższą wartość średnią w zlewni zaobserwowano w kwietniu (1,80 mg/dm^3).

Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują, że największy wpływ na przestrzenne zróżnicowanie parametrów jakości wody Potoku Służewieckiego w roku hydrologicznym 2018 miały przepływowe zbiorniki wodne. Oddziaływanie Stawu Służewieckiego i Stawu Wyścigi powodowało przerwanie naturalnego kontinuum badanego cieką i umożliwiło wyróżnienie dwóch odcinków, odrębnych pod względem reżimu fizyczno-chemicznego. W efekcie ekspozycji lustra wody na warunki atmosferyczne w obrębie zbiorników w Potoku Służewieckim latem następowało skokowe podwyższenie temperatury wody. Analogiczny wpływ płytkich, niestratyfikowanych zbiorników z powierzchniowym typem upustu wody został udokumentowany w literaturze (m.in. przez Ignatiusa i Rasmussena, 2016 oraz Kozłowskiego i innych, 2017). Warto podkreślić, że o ile w półroczu letnim temperatura wody była wyższa w punkcie pomiarowym poniżej Stawu Wyścigi (P6) średnio o 4,8°C, a maksymalnie nawet o 9,6°C w stosunku do punktu P4, w półroczu zimowym zanotowano odwrotną tendencję – wówczas zbiorniki powodowały obniżenie temperatury wody, średnio o 1°C. Oprócz transformacji reżimu termicznego Potoku Służewieckiego, stawy w istotny sposób modyfikowały również warunki tlenowe, choć wpływ ten należy rozpatrywać oddzielnie dla każdego zbiornika. Staw Służewiecki powodował w półroczu letnim wzrost nasycenia wody tlenem, natomiast w półroczu zimowym – spadek nasycenia. Wzrost natlenienia w zbiornikach należy wiązać z intensywną produkcją tlenu przez organizmy fotosyntetyzujące (głównie fitoplankton oraz makrofity), natomiast spadek – z procesami dekompozycji obumarłej materii organicznej (Rzętała, 2008). Odmienny efekt zaobserwowano w przypadku Stawu Wyścigi, który zarówno w półroczu letnim, jak i zimowym, powodował wzrost nasycenia wody tlenem (pomimo wzrostu temperatury wody).

Oprócz intensywnej produkcji tlenu przez roślinność, wpływ na to miała również re-aeracja wody na jazie i przelewie, a także krótki czas funkcjonowania zbiornika oraz jego położenie, warunkujące mniejszą dostawę osadów i martwej materii organicznej, która była zatrzymywana przez Staw Służewiecki. Prawidłowość ta potwierdza istotny wpływ lokalnych uwarunkowań przepływowych zbiorników wodnych na wielkość i kierunek modyfikacji warunków tlenowych cieków, sugerowany uprzednio przez Bartnika i innych (2013). Zbiorniki powodowały w końcu wyraźne obniżenie przewodnictwa elektrycznego wody oraz jego stabilizację, co wynika z unieruchomienia niektórych jonów w ich obrębie (Bartnik i Moniewski, 2015), m.in. poprzez akumulację metali ciężkich w osadach dennych, a także biosorpcję przez organizmy roślinne (Jarosiewicz, 2007). W przypadku punktów położonych poniżej zbiorników nie zaobserwowano podwyższenia odczynu wody, związanego z absorpcją dwutlenku węgla z wody przez roślinność wodną (Ignatius i Rasmussen, 2016; Kozłowski i inni, 2017). Tendencję taką zanotowano jednak na odcinku pomiędzy punktami P6 i P7, gdzie płytkie i pozbawione zacinienia koryto Potoku Służewieckiego

intensywnie porastają zbiorowiska *Potamogeton pectinaus* (w dolnym biegu cieką nawet 90% szerokości koryta). Warto dodać, iż podczas obserwacji terenowych w sierpniu 2018 r. stwierdzono obecność jeszcze czterech gatunków makrofitów, do których należała rdzestnica pływająca *Potamogeton natans*, jeżogłówka pojedyncza *Sparganium emersum*, trzcina pospolita *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. oraz oczeret jeziorny *Scirpus lacustris*. Jak pokazuje zestawienie wartości średnich, w zbiornikach miała miejsce również bioakumulacja fosforanów PO_4 , jednakże, poniżej stawów nie stwierdzono niższych stężeń NO_3 .

Górny bieg Potoku Służewieckiego był najbardziej odrębny pod względem badanych cech jakości wody, gdyż punkty P1 i P2 odznaczyły się bowiem średnio najwyższymi wartościami przewodnictwa elektrycznego, jak również najwyższym średnim stężeniem NO_3 i PO_4 , przy jednocześnie dużej zmienności omawianych parametrów. Głównym czynnikiem warunkującym reżim fizyczno-chemiczny wody w punkcie P2 było duże zróżnicowanie natężenia przepływu, będące efektem funkcjonowania lotniskowej oczyszczalni wód opadowych. Obserwacje terenowe wykazały, że wypływ wody z oczyszczalni był bardzo niestabilny, a także niezależny od warunków atmosferycznych (lotnisko posiada system podziemnych zbiorników retencyjnych). Duże zróżnicowanie natężenia przepływu powodowało w konsekwencji naprzemienne zateżenie i rozcieńczenie substancji rozpuszczonych w wodzie, co wpływało na zmiany stężenia NO_3 i PO_4 oraz znajdowało odzwierciedlenie w wartościach przewodnictwa elektrycznego. W punkcie P1 wyraźnie zaznaczył się natomiast wpływ użytkowania zlewni – wyższe stężenie NO_3 i PO_4 można wiązać z obecnością ogródków działkowych, znajdujących się bezpośrednio w strefie brzegowej odkrytego fragmentu ciek. Przepływ wód krytymi kanałami, izolującymi od promieniowania słonecznego oraz ograniczającymi wypromieniowanie ciepła w nocy, skutkowało z kolei wykształceniem specyficznych warunków termicznych – temperatura wody w punktach P1 i P2 była bowiem najbardziej stabilna, a jej średnie wartości były wyższe w stosunku do wartości w punktach położonych niżej (P3 i P4), które były zimą chłodniejsze o nawet 3–4°C. Pomimo relatywnie niskich wartości temperatury wody na tle pozostałych punktów pomiarowych górny bieg Potoku Służewieckiego odznaczył się najgorszym natlenieniem, co pośrednio wskazuje na relatywnie większe zanieczyszczenie wody, stwierdzone również w badaniach Wojtkowskiej i innych (2018). Przeciwna sytuacja miała miejsce w biegu dolnym (szczególnie w punkcie P7), gdzie pomimo wysokich wartości temperatury wody duży spadek koryta ciek w dolinie Służewieckiej oraz obecność makrofitów powodowały nierzadko przesylenie wody tlenem.

Regularnie prowadzone pomiary umożliwiły również określenie sezonowego zróżnicowania podstawowych cech fizyczno-chemicznych wód w zlewni Potoku Służewieckiego w roku hydrologicznym 2018. Największymi zmianami sezonowymi odznaczyła się temperatura wody, której przebieg nawiązywał do przebiegu temperatury powietrza i natężenia promieniowania słonecznego. Warto zauważyć jednak, że na skutek adwekcji ciepła z rur kanalizacji deszczowej, a także nieco wyższej temperatury powietrza w mieście w okresie zimowym (Błażejczyk i inni, 2014), temperatura wody nie spadała do 0,0°C, co obserwuje się powszechnie w przypadku cieków naturalnych (Łaszewski i Jeleński, 2013). Przebieg sezonowy nasycenia wody tlenem nawiązywał natomiast do cyklu wegetacyjnego organizmów fotosyntetyzujących – największą saturacją O_2 odznaczyły się miesiące wiosenne i letnie, kiedy dodatkowym źródłem tlenu była roślinność wodna, natomiast najniższe, związane z zużywaniem tlenu w procesach dekompozycji martwej materii organicznej, zaobserwowano w miesiącach zimowych. Przebieg ten koresponduje z wynikami uzyskanymi przez Bartnika i innych (2013) w przypadku Sokołówki i Dzierżąznej, choć w przypadku Potoku Służewieckiego średnie nasycenie tlenem było na ogół niższe niż we wspomnianych ciekach, prawdopodobnie na skutek wyższej temperatury wody. W przypadku wartości przewodnictwa elektrycznego uzyskano charakterystyczny dla cieków miejskich przebieg sezonowy – wyższe wartości w okresie zimowym związane z dostawą chlorków sodu i wapnia, wykorzystywanych w zimowym utrzymaniu dróg (Wysocka-Czubaszek i Wojno, 2014; Moniewski, 2015; Wojtkowska i inni, 2018), natomiast niższe wartości latem związa-

ne z bioakumulacją substancji chemicznych przez fitocenozy oraz z zasilaniem opadowym (Moniewski, 2014). Sezonowy przebieg stężenia azotanów i fosforanów był zdecydowanie bardziej złożony i nie poddawał się jednoznacznej interpretacji, tak jak w przypadku zlewni rolniczych (Kiryłuk i Rauba, 2009). W przypadku azotanów średnio wyższe stężenia (o $0,76 \text{ mg/dm}^3$) notowano w miesiącach półrocza zimowego, kiedy związki te są uwalniane do wód w procesach dekompozycji materii organicznej (Moniewski, 2014). Podwyższone wartości stężeń NO_3 w lecie w niektórych punktach pomiarowych można natomiast wiązać ze spływem tych związków z ulic oraz trawników, nierzadko poprzez sieć kanalizacji burzowej (Wysocka-Czubaszek i Wojno, 2014). W przypadku fosforanów jednym z głównych czynników odpowiedzialnych za ich sezonowe zróżnicowanie jest natężenie przepływu; wyższe wartości stężeń PO_4 w okresie letnim zanotowano podczas niskich stanów wody w Potoku Służewieckim, skutkujących brakiem efektu rozcieńczania (Ostrowska 2010; Wysocka-Czubaszek i Wojno, 2014). Obecność tych substancji w zlewni Potoku Służewieckiego, podobnie jak w przypadku NO_3 , ma również związek z dopływem ścieków z kanalizacji deszczowej, będących istotnym źródłem fosforanów (Jaskuła i inni, 2016). Należy podkreślić, że sezonowy cykl stężenia NO_3 i PO_4 w Potoku Służewieckim mogą zakłócać także nielegalne zrzuty ścieków bytowych oraz przemysłowych (Bojakowska i inni, 2012; Krajewski i Banasik, 2013)

Przedstawione wnioski wydają się istotne z punktu widzenia oceny stanu i funkcjonowania zlewni Potoku Służewieckiego. Przede wszystkim należy dążyć do odpowiedniego zagospodarowania i utrzymania istniejących zbiorników przepływowych (Stawu Wyścigi oraz Stawu Służewieckiego), które będą mogły wówczas pełnić rolę filtrów biologicznych, absorbujących część zanieczyszczeń (Bartnik i Moniewski, 2015; Moniewski, 2015). W krajobrazie miejskim zbiorniki takie pełnią dodatkowo funkcję przeciwpowodziową (Pietrak i Banasik, 2009) i rekreacyjną (Świerk i inni, 2010), choć na uwadze należy mieć także ich negatywne skutki środowiskowe, takie jak ograniczenie swobodnej migracji organizmów (Vannote i inni, 1980) oraz skokowe podwyższenie temperatury wody, prowadzące do zmian w funkcjonowaniu ekosystemu rzecznego (Lessard i Hayes, 2003). Z uwagi na znaczące oddziaływanie dopływów na jakość wód Potoku Służewieckiego ważnym zadaniem jest także unormowanie gospodarki ściekowej w ich obrębie oraz objęcie ich regularnym monitoringiem jakości wody, jak również podjęcie działań renaturyzacyjnych, polegających m.in. na odtworzeniu zadrzewionych stref buforowych oraz przywróceniu naturalnego charakteru koryta. Działania te pozwolą na poprawę ogólnego stanu ekologicznego wód Potoku Służewieckiego, jak również Jeziora Wilanowskiego, bezpośrednio przez ciek zasilanego.

Piśmiennictwo

- Banasik K., (red.) 2002, *Operat hydrologiczny Potoku Służewieckiego w przekroju ul. Przyczółkowskiej*, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Barszcz M., 2009, *Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 18, 4, 46, s. 3–21.

- Barszcz M., 2014a, *Analiza wpływu zastosowania obiektów do infiltracji i retencji wód deszczowych na kształtowanie odpływu ze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie*, *Gospodarka Wodna*, 74, 4, s. 134–140.
- Barszcz M., 2014b, *Ocena przydatności konceptualnego modelu Nasha do symulacji hydrogramu przepływów w zlewni zurbanizowanej z uwzględnieniem scenariuszy warstwy opadu*, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 64, 23, 2, s. 113–123.
- Barszcz M., 2015, *Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej*, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 24, 3, 69, s. 209–223.
- Barszcz M., 2017, *Porównanie przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia obliczonych w zlewni miejskiej za pomocą modeli SWMM i SBUH*, *Przegląd Geograficzny*, 89, 3, s. 429–449.
- Barszcz M., 2018, *Radar Data Analyses for a Single Rainfall Event and Their Application for Flow Simulation in an Urban Catchment Using the SWMM Model*, *Water*, 10, 8, 1007, s. 1–18.
- Bartnik A., 2016, *Wieloletnie zmiany odpływu małej rzeki miejskiej pod wpływem antropopresji (na przykładzie Sokołówki – Łódź)*, *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, 39, s. 93–113.
- Bartnik A., 2017, *Mała rzeka w dużym mieście*, *Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego*, Łódź.
- Bartnik A., Moniewski P., 2015, *Funkcjonowanie osadników i zbiorników przepływowych w warunkach zlewni miejskiej i podmiejskiej (Sokołówka i Dzierżązna)*, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin – Polonia, Sectio B*, 70, 2, s. 83–99.
- Bartnik A., Moniewski P., Tomalski P., 2013, *Seasonality of the basic physical and chemical characteristics of water flowing through the cascades of small reservoirs*, *Limnological Review*, 13, 2, s. 63–71.
- Błazejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Dudek W., Kręciszyński B., Błazejczyk A., Szymidło J., Degórska B., Pałczyński C.M., 2014, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie – uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne*, *Wydawnictwo Akademickie SEDNO, IGIPZ PAN*, Warszawa.
- Bojakowska I., Lech D., Jaroszyńska J., 2012, *Wskaźniki zasolenia w wodach Potoku Służewieckiego i Jeziora Wilanowskiego w Warszawie*, *Górnictwo i Geologia*, 7, 2, s. 85–99.
- Fundacja Promocji m.st. Warszawy – *Służewiecki Balaton*, <http://www.warszawa.pl/miasto/sluzewiecki-balaton/>, dostęp: 11.03.2019 r.
- Ignatius A.R., Rasmussen T.C., 2016, *Small reservoir effects on headwater water quality in the rural-urban fringe, Georgia Piedmont, USA*, *Journal of Hydrology – Regional Studies*, 8, s. 145–161.
- Jarosiewicz A., 2007, *Proces samoczyszczania w ekosystemach rzecznych*, *Słupskie Prace Biologiczne*, 4, s. 27–41.
- Jaskuła J., Wicher-Dysarz J., Sojka M., Dysarz T., 2016, *Ocena zmian zawartości związków biogenych w wodach rzeki Ner*, *Inżynieria Ekologiczna*, 46, s. 31–37.
- Kiryłuk A., Rauba M., 2009, *Zmienność stężenia związków azotu w różnie użytkowanej zlewni rolniczej rzeki Ślina*, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 9, s. 71–86.
- Kondracki J., 2011, *Geografia regionalna Polski*, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Kozłowski R., Przybylska J., Kaleta J., 2017, *Wpływ zbiornika zaporowego Cedzyna na wybrane parametry jakości wody rzeki Lubrzanki w okresie letnim*, *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 19, 1, s. 81–89.
- Krajewski A., Banasik K., 2013, *Czas reakcji zlewni zurbanizowanej na opady wywołujące wezbrania*, *Acta Scientiarum Polonorum Seria Architectura*, 12, 4, s. 135–146.
- Liu J.-S., Guo L.-C., Luo X.-L., Chen F.-R., Zeng E.Y., 2014, *Impact of anthropogenic activities on urban stream water quality: a case study in Guangzhou, China*, *Environmental Science and Pollution Research*, 21, s. 13412–13419.

- Lessard J.L., Hayes D.B., 2003, *Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams*, River Research and Applications, 19, s. 721–732.
- Łaszewski M., Jeleński P., 2013, *Porównanie warunków termicznych wód rzek Raby i Świdra*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 22, s. 239–248.
- Mamun M., An K.G., 2019, *The application of chemical and biological multi-metric models to a small urban stream for ecological health assessments*, Ecological Informatics, 50, s. 1–12.
- Mielnicki S., Poszytek K., Rewerski B., 2015, *Sprawozdanie z badań fizyczno-chemicznych próbek wód pobranych w dniu 12, 17, 27, 28 marca oraz 3 i 14 kwietnia 2015 z Jeziora Wilanowskiego, Stawu Południowego oraz Potoku Służewieckiego*, RDLS, Warszawa.
- Moniewski P., 2014, *Sezonowe zmiany wybranych cech fizyczno-chemicznych wód małej rzeki podmiejskiej na przykładzie Dzierżanej*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, 2, 20, s. 407–416.
- Moniewski P., 2015, *Rola zbiorników wodnych w kształtowaniu cech fizykochemicznych wód rzecznych na przykładzie Ciosenki*, Prace i Studia Geograficzne, 58, s. 7–23.
- Oksiuta M., 2007, *Ocena odpływu wezbraniowego ze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie*, Prace i Studia Geograficzne, 38, s. 57–71.
- Oksiuta M., 2008, *Przemiany sieci hydrograficznej i zagospodarowania terenu na obszarze miejskim (zlewnia Potoku Służewieckiego, Warszawa)*, Prace Geograficzne IGiGP UJ, 120, s. 105–115.
- Ostrowska M., 2010, *Zmienność stężenia biogenów w wodzie rzeki Mała Panew pod wpływem opadów atmosferycznych i przepływów w rzece*, Problemy Ekologii, 14, 3, s. 139–143.
- Paul M.J., Meyer J.L., 2008, *Streams in the Urban Landscape*, [w:] J.M. Marzluff, E. Shulenberger, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, U. Simon, C. ZumBrunnen (red.), Urban Ecology, Springer, Boston, MA, s. 207–231.
- Pietrak M., Banasik K., 2009, *Redukcja fali wezbraniowej Potoku Służewieckiego za pomocą małych zbiorników*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 18, 4, 46, s. 22–34.
- Rada m.st. Warszawy, *Załącznik tekstowy i tabelaryczny do Programu Ochrony Środowiska dla miasta stołecznego Warszawy na lata 2009–2012 z uwzględnieniem perspektywy do 2016 r.*, Załączniki do uchwały Rady m.st. Warszawy Nr XCIII/2732/2010 z dnia 21 października 2010 r., Warszawa.
- Rzętała M., 2008, *Funkcjonowanie zbiorników wodnych oraz przebieg procesów limnicznych w warunkach zróżnicowanej antropopresji na przykładzie regionu górnośląskiego*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Świerk D., Szpakowska B., Dudzińska A., 2010, *Wartości rekreacyjne naturalnych i sztucznych zbiorników położonych na terenie Poznania*, Krajobrazy rekreacyjne – kształtowanie, wykorzystanie, transformacja. Problemy Ekologii Krajobrazu, 27, s. 495–503.
- Tong S.T.Y., Chen W., 2002, *Modeling the relationship between land use and surface water quality*, Journal of Environment Management, 66, s. 377–393.
- Tu J., 2013, *Spatial Variations in the Relationships between Land Use and Water Quality across an Urbanization Gradient in the Watersheds of Northern Georgia, USA*, Environmental Management, 51, s. 1–17.
- Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E., 1980, *The River Continuum Concept*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 37, s. 130–137.
- White M.D., Greer K.A., 2006, *The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California*, Landscape and Urban Planning, Elsevier, 74, s. 125–138.

- Wojtkowska M., Matula M., Kozińska P., 2018, *The water quality of streams located in large urban agglomeration, case study of the Służewiecki Stream*, 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018, 44, 00193
- Wysocka-Czubaszek A., Wojno W., 2014, *Sezonowa zmienność chemizmu wody w małej rzece w zlewni zurbanizowanej*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 23, 1, 63, s. 64–76.

Summary

Urban streams have recently become an important topic of diversified scientific research. This reflects their ecological and recreational significance. It is well known that progressive urbanisation in large cities poses a threat to natural ecosystems like water bodies and watercourses. Changes in stream morphology caused by regulation and inflows from municipal and industrial wastewater treatment plants influence water quality and interfere with the water cycle.

The 65.3 km² catchment of the Służewiecki Stream is located in the south-western part of Warsaw. It flows 17.1 km through five districts of the capital city and is the largest tributary of the River Vistula in the Warsaw area. Due to a huge (86.8%) contribution of built-up areas, including land associated with communications, industry and commerce, the stream is under a constant, wide-ranging anthropopressure. Upstream, from source to outlet from the Airport rainwater treatment plant, the Służewiecki Stream flows mainly through an underground channel. However, downstream there is a significant modification introduced in the catchment thanks to two artificial water bodies (called Staw Wyścigi and Staw Służewiecki).

The aim of this study was to determine the spatial and seasonal variability of selected quality parameters of water in the Służewiecki Stream catchment. Research sought to identify changes in physical and chemical parameters along the Stream and its two tributaries, as well as to determine seasonal variation in these parameters. For those purposes, the field investigations run from November 2017 through to October 2018, over a regular two-week cycle, involved water temperature, oxygen saturation, conductivity and pH. A monthly cycle was in turn applied in determining concentrations of nitrates and phosphates. Measurements were conducted at 11 sites across the catchment, of which nine (P1-P9) were along the Stream itself, and two (D1, D2) on its largest tributaries (the Rów Grabowski and Kanał Wolicki). Measurement sites were selected to ensure assessment of the impacts of various forms of anthropopressure on the selected water-quality parameters; with the Warsaw Airport rainwater treatment plant and two artificial water bodies considered to influence most. On the basis of the data obtained, magnitude and variability parameters were calculated, while the similarity of measurement sites was determined using the Ward agglomeration method. Additionally, in August 2018, field investigation of aquatic vegetation was carried out, indicating the presence of five species of macrophyte along the Służewiecki Stream.

The results indicate that the physico-chemical regime along the Służewiecki Stream is mostly disturbed by the two artificial water bodies, which interrupt the natural continuum of the river. Thermal and oxygen conditions undergo the greatest transformation. The water bodies also cause a change in phosphate concentration due to their bioaccumu-

lation and immobilisation of ions. However, tributaries and the operation of the Airport rainwater treatment plant also exert a significant impact on spatial variability to investigated parameters along the Służewiecki Stream. Seasonal differentiation in physico-chemical characteristics was mainly related to meteorological conditions, the vegetative cycle of photosynthetic organisms and changes in anthropopressure. Most of the tested parameters displayed a clear seasonal cycle, though the exceptions were nitrate and phosphate, whose cycles reflect the impact of various, independent factors, such as hydrological conditions, decomposition processes and wastewater inflow.

