

UNIWERSYTET PRZYRODNICZY w LUBLINIE
WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
DYSCYPLINA NAUKOWA:
INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

mgr Tadeusz Grabowski

**Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia
oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt
na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego**

Development and implementation of a system for the collection
and use of rainwater for watering animals in the Roztocze National Park

Rozprawa doktorska zrealizowana we współpracy z Roztoczańskim Parkiem Narodowym
w ramach IV edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy”,
finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego –
umowa nr DWD/4/88/2020 z dnia 28.10.2020 r.

Rozprawa doktorska wykonana
w Katedrze Inżynierii Środowiska
pod kierunkiem
prof. dr hab. Krzysztofa Józwiakowskiego

Promotor pomocniczy:
dr hab. Andrzej Bochniak, prof. uczelni

Opiekun pomocniczy ze strony Roztoczańskiego
Parku Narodowego: mgr inż. Jan Słomiany

Lublin – Zwierzyniec 2024

Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego

PODZIĘKOWANIA

Szanowni Państwo

Po przepracowaniu ponad 31 lat w Roztoczańskim Parku Narodowym, w roku jubileuszu 50-lecia Parku przychodzi mi zakończyć czteroletnie zmagania związane z opracowaniem pracy doktorskiej w Katedrze Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Pomimo niemałego doświadczenia zawodowego oraz udziału w wielu projektach, w tym naukowych, było to niezapomniane przeżycie.

Na zakończenie, pragnę podziękować promotorowi, prof. dr. hab. Krzysztofowi Józwiakowskiemu, za to, że przekonał mnie do rozpoczęcia studiów doktoranckich. Dziękuję za wsparcie merytoryczne i udzielaną pomoc związaną z realizacją indywidualnego planu badawczego w ramach doktoratu wdrożeniowego.

Dziękuję dr. hab. Andrzejowi Bochniakowi – promotorowi pomocniczemu, za pomoc w doborze narzędzi statystycznych oraz wszelkie wskazówki i cenne uwagi.

Podziękowania dla wszystkich współautorów publikacji, kieruję na ręce prof. dr. hab. inż. Tadeusza Siwca. Dziękuję za wszechstronną pomoc i poświęcony czas. Promotorowi pomocniczemu, z ramienia RPN, Panu mgr. inż. Janowi Słomianemu dziękuję za wszystkie rozmowy dotyczące konika polskiego.

Dziękuję również Pracownikom Katedry Inżynierii Środowiska za okazaną mi pomoc i życzliwość.

Przeprowadzony dowód naukowy opierał się, m.in., na badaniach własnych, ale też danych wygenerowanych w Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Roztocze oraz stacji meteorologicznej UMCS. Niech to będzie też okazja do podziękowań dla Dyrekcji i Pracowników Roztoczańskiego Parku Narodowego, Kierownictwa i Pracowników Katedry Hydrologii i Klimatologii UMCS oraz Pracowników akredytowanych laboratoriów, w których wykonywano analizy prób wody.

Dziękuję wszystkim, którzy wspierali mnie na różne sposoby w tym przedsięwzięciu.

Pracę dedykuję Córkom i Żonie.

Tadeusz Grabowski

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data .16 września 2024 roku

Podpis promotora 

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadomy odpowiedzialności prawnej oświadczam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mnie samodzielnie pod kierunkiem Promotora/~~Promoterów~~/Promotora pomocniczego* i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.
- przedstawiona rozprawa doktorska nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego.
- niniejsza wersja rozprawy doktorskiej jest tożsama z załączoną na płycie CD wersją elektroniczną.

Data 16 września 2024 roku. Podpis autora



*niepotrzebne skreślić

Spis treści

Streszczenie.....	7
Summary.....	9
1. Zestawienie artykułów naukowych składających się na rozprawę doktorską.....	11
2. Wstęp.....	12
3. Problem naukowy, cel rozprawy i tezy pracy	16
3.1. Problem naukowy	16
3.2. Cel rozprawy	16
3.3. Tezy pracy	16
4. Charakterystyka obszaru i obiektów badań.....	18
4.1. Położenie i charakterystyka Roztoczańskiego Parku Narodowego.....	18
4.2. Położenie i charakterystyka zlewni strumienia Świerszcz	20
4.3. Lokalizacja i charakterystyka obiektu badawczego - instalacja testowa przy Dyrekcji RPN	23
5. Zakres i metodyka badań.....	27
5.1. Materiały i metody określania możliwości wykorzystania wód opadowych.....	28
5.2. Zakres i metodyka badań jakościowych wód.....	29
5.3. Zakres i metodyka badań instalacji do oczyszczania wód opadowych.....	35
6. Wyniki badań i dyskusja	37
6.1. Zmiany klimatu i możliwości wykorzystania wód opadowych w zlewni strumienia Świerszcz	37
6.1.1. Zmiany klimatu w zlewni strumienia Świerszcz.....	37
6.1.2. Założenia do wdrożenia systemu zagospodarowania wód opadowych dla Ośrodka Hodowli Zwierząt we Floriance na terenie RPN.....	41
6.2. Wyniki badań jakościowych wód w zlewni strumienia Świerszcz	46
6.3. Efekty oczyszczania wód opadowych w testowej instalacji przy Dyrekcji RPN	55
6.3.1. Zmiany temperatury wód opadowych w zbiorniku.....	56
6.3.2. Skuteczność oczyszczania wód opadowych w instalacji testowej	59
7. Wnioski.....	65
Piśmiennictwo.....	67
Oświadczenia.....	73
Załączniki – kopie publikacji będące podstawą rozprawy doktorskiej.....	77

Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego

OPRACOWANIE I WDROŻENIE SYSTEMU DO GROMADZENIA ORAZ WYKORZYSTANIA WÓD OPADOWYCH DO POJENIA ZWIERZĄT NA TERENIE ROZTOCZAŃSKIEGO PARKU NARODOWEGO

mgr Tadeusz Grabowski

Słowa kluczowe: wody opadowe, jakość wód, zmiany klimatu, Roztoczański Park Narodowy, konik polski.

Streszczenie

Zmiany klimatu na całym świecie powodują, że zapewnienie wody do picia i innych celów staje się coraz większym problemem, dlatego w ostatnich latach podejmuje się działania mające na celu wykorzystanie wód opadowych. Również w Roztoczańskim Parku Narodowym (RPN) obserwuje się zmiany klimatu, które skutkują obniżaniem się poziomu wód gruntowych, wzrostem temperatury powietrza – szczególnie w półroczu jesienno-zimowym, wcześniej rozpoczynającym się okresem wegetacyjnym, zmiennym rozkładem opadów w ciągu roku. Zmiany te zmuszają do gromadzenia wód opadowych w celu zaspokojenia coraz większych potrzeb występujących na terenie RPN.

Głównym celem naukowym rozprawy doktorskiej jest ocena możliwości wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt (konika polskiego) na terenie zlewni strumienia Świerszcz w RPN. Cele szczegółowe rozprawy obejmują: 1) określenie zmian klimatu i możliwości wykorzystania wód opadowych na terenie RPN, 2) określenie właściwości fizykochemicznych i mikrobiologicznych wód opadowych oraz wód płynących i podziemnych w zlewni strumienia Świerszcz w odniesieniu do obowiązujących norm prawnych, 3) określenie skuteczności oczyszczania wód opadowych w pilotażowej instalacji i możliwości jej praktycznego zastosowania. Cel wdrożeniowy rozprawy doktorskiej obejmuje opracowanie założeń do wdrożenia systemu do transportu, magazynowania, redystrybucji i oczyszczania (dezynfekcji) wód opadowych z przeznaczeniem na cele hodowlane oraz sanitarne, techniczne, przeciwpożarowe, z odprowadzaniem nadmiaru wód do miejsc rozrodu płazów w dawnych stawach w Ośrodku Hodowli Zachowawczej w RPN we Floriance. Problem naukowy rozprawy sformułowano w postaci pytania: „Czy ilość i jakość wód opadowych na terenie RPN oraz ich gromadzenie i uzdatnianie pozwala na ich wykorzystanie na cele hodowlane?”.

Okres badań i analiza wyników do rozprawy doktorskiej obejmowała lata 2021-2024. Badania ilościowe i jakościowe wód opadowych realizowano w latach 2021-2022, natomiast efektywność instalacji testowej do uzdatniania wód opadowych analizowano w 2023 roku.

W celu określenia zmian klimatu na terenie RPN wykorzystano dane ze Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) „Roztocze” funkcjonującej w ramach ZMŚP Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ) z lat 2001-2020. Badania ilościowe, czyli: pobór próbek i analizy statystyczne (wód opadowych, powierzchniowych, podziemnych) prowadzono w oparciu o metodykę przyjętą w wytycznych

ZMŚP. Badania jakościowe: organoleptyczne, fizykochemiczne i mikrobiologiczne pobranych prób wody wykonywano według aktualnie obowiązujących metod, w akredytowanym Laboratorium Usług Badawczych, Lubelskiej Spółdzielni Usług Mleczarskich w Lublinie.

Na podstawie przeprowadzonych badań określono, że z dachów budynków osad leśnych należących do RPN można zebrać łącznie 9109 m³ wody rocznie. Wykazano, że wody opadowe mają dużą zmienność parametrów jakościowych oraz ilości w czasie i przestrzeni. Stwierdzono, że surowe wody opadowe z zasady mają korzystny skład organoleptyczny, fizykochemiczny i mikrobiologiczny, jednak stężenia niektórych parametrów nie są zgodne z normami określonymi dla wody do picia (np. twardość ogólna, amoniak, mętność, czy wskaźniki mikrobiologiczne). Podwyższone zawartości amoniaku, czy wskaźników mikrobiologicznych prawdopodobnie są spowodowane zanieczyszczeniem powierzchni dachów ptasimi odchodami. Wykazano również, że wody opadowe na terenie RPN nie zawierają metali ciężkich, a zawartość żelaza, manganu, związków azotu i fosforu jest niewielka. Stwierdzono też, że wody opadowe są bardzo miękkie i pozbawione związków wapnia, dlatego nie należy ich zalecać do picia w dużych ilościach. W wodach opadowych notowano okresowo obniżone wartości pH < 6,5, głównie przy niewielkich opadach w okresie zimowym, które prawdopodobnie mogły mieć charakter „kwaśnych deszczy”. Zaobserwowano, że gromadzenie wód opadowych w podziemnych betonowych zbiornikach korzystnie wpływa na stabilizację temperatury wody, co nie dopuszcza do niekontrolowanych przemian chemicznych i biologicznych. Wykazano, że instalacja testowa do oczyszczania wód opadowych oparta na procesie filtracji i dezynfekcji (lampa UV), zainstalowana przy Dyrekcji RPN skutecznie usuwała zanieczyszczenia fizyczne, chemiczne i mikrobiologiczne.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wody opadowe, po uzdatnieniu w procesach filtracji i dezynfekcji, mogą być wykorzystane do pojenia koników polskich w OHZ we Floriance na terenie RPN, a także do mycia pojazdów, podlewania terenów zieleni, czy spłukiwania toalet. Mogą także służyć do napełniania zbiorników przeciwpożarowych i zasilania miejsc rozrodu płazów. Na podstawie średnich sum opadów z wielolecia 2001-2020 określono, że największe ilości wód opadowych na terenie OHZ we Floriance występują w okresie wiosenno-letnim (od maja do sierpnia), czyli wtedy kiedy zapotrzebowanie na wodę jest największe. W okresie tym wody opadowe w 100% pokryją zapotrzebowanie na wodę do różnych, wcześniej wspomnianych celów. W pozostałych miesiącach wody opadowe pokryją od 54 – 90% zapotrzebowania na wodę na terenie OHZ we Floriance.

Otrzymane wyniki badań i pomiary terenowe pozwoliły na zaprojektowanie nowego systemu zagospodarowania wód opadowych, który zostanie wdrożony w latach 2025-2026 w Ośrodku Hodowli Zwierząt RPN. System ten pozwoli na wykorzystanie wód opadowych m.in. do pojenia koników polskich – zwierzęcia herbowego Roztoczańskiego Parku Narodowego.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM TO COLLECT AND USE RAINWATER AS DRINKING WATER FOR ANIMALS IN ROZTOCZE NATIONAL PARK

MSc Tadeusz Grabowski

Keywords: rainwater, water quality, climate change, Roztocze National Park, Polish Koniks.

Summary

Climate change around the world is making the provision of water for drinking and other purposes an increasing problem, which is why measures have been taken in recent years to make use of rainwater. The Roztocze National Park (RNP) is also experiencing climate change, resulting in falling groundwater levels, rising air temperatures – especially in the autumn-winter half of the year, an earlier start to the growing season, and a variable distribution of precipitation throughout the year. These changes necessitate rainwater harvesting in order to meet the ever-increasing demand for freshwater experienced in the RNP.

The main scientific objective of the dissertation is to assess the possibility of using rainwater for watering animals, including mainly Polish Koniks (in Polish: *konik Polski*, i.e. a Polish breed of small horses) in the catchment area of the Świerszcz stream in the RNP. The specific objectives of the dissertation include: 1) determination of climate change and the possibility of using rainwater in the RNP; 2) determination of physicochemical and microbiological properties of rainwater, lotic water and groundwater in the Świerszcz stream catchment in relation to applicable legal standards; 3) determination of the effectiveness of rainwater treatment in a pilot installation and the possibility of its practical application. The implementation objective of the dissertation involves the conceptual framework for the implementation of a system for the transport, storage, redistribution and treatment (disinfection) of rainwater for breeding as well as sanitary, technical and fire protection purposes, with the discharge of excess water to amphibian breeding sites in former ponds in the RNP Conservation Breeding Centre in Florianka. The scientific objective of the dissertation was expressed in the form of the question: “Does the quantity and quality of rainwater in the RNP and its collection and treatment allow its use for breeding purposes?”.

The research and analysis of the results for the PhD dissertation covered the period from 2021 to 2024. Quantitative and qualitative studies of rainwater were carried out in 2021–2022, while the effectiveness of the test installation for rainwater treatment was analysed in 2023. In order to determine climate change in the RNP, data from the Integrated Environmental Monitoring Base Station (ZMŚP) “Roztocze” operating as part of ZMŚP of the Chief Inspectorate for Environmental Protection (GIOŚ) from 2001–2020 were used. Quantitative studies, i.e., sampling and statistical analyses of rainwater, surface water, groundwater, were carried out based on the methodology adopted in the ZMŚP guidelines. Qualitative studies – organoleptic, physicochemical and microbiological analyses of collected water samples – were carried out in accordance with the currently applicable methods in the

accredited Research Services Laboratory of the Lublin Dairy Services Cooperative (*Lubelska Spółdzielnia Usług Mleczarskich*) in Lublin.

On the basis of the research carried out, it was determined that a total of 9,109 m³ of water can be collected annually from the roofs of buildings in forest villages belonging to the RNP. It has been evidenced that the quality parameters and quantity of rainwater greatly vary in time and space. It has been found that raw rainwater generally has a favourable organoleptic, physicochemical and microbiological composition, but the concentrations of some parameters do not comply with the standards specified for drinking water (e.g., total hardness, ammonia, turbidity, or microbiological indicators). Increased levels of ammonia or microbiological indicators are probably due to contamination of roof surfaces with bird droppings. It has been shown that rainwater in the RNP does not contain heavy metals, and the content of iron, manganese, nitrogen and phosphorus compounds is low. The rainwater was also found to be very soft and devoid of calcium compounds and, therefore, should not be recommended for drinking in large quantities. Reduced values of pH < 6.5 were periodically recorded in rainwater, mainly during low rainfall in the winter season, which could probably be 'acid rain'. It has been observed that the collection of rainwater in underground concrete tanks has a beneficial effect on the stabilisation of water temperature, which prevents uncontrolled chemical and biological changes. It has been shown that the test installation for rainwater treatment based on a filtration and disinfection process (UV lamp), installed at the RNP Directorate, effectively removed physical, chemical and microbiological pollutants.

The study shows that rainwater, after being treated through filtration and disinfection processes, can be used for watering Polish Koniks in the Animal Breeding Centre (OHZ) in Florianka in the RNP, as well as for washing vehicles, watering green areas or flushing toilets. It can also be used to fill fire water tanks and feed amphibian breeding sites. Based on the average precipitation totals for the 2001–2020 period, it was determined that the largest amounts of rainwater in the Florianka OHZ occur during the spring–summer period (May to August), which is when the demand for water is the highest. During this period, rainwater will cover 100% of the water demand for the various purposes mentioned above. In the other months, rainwater will cover 54–90% of the water demand in the Florianka OHZ.

The results obtained from the research and field measurements allowed us to design a new rainwater management system, which will be implemented in 2025–2026 at the RNP Animal Breeding Centre. This system will allow rainwater to be used, among other things, for watering Polish Koniks – the emblem animal of the Roztocze National Park.

1. Zestawienie artykułów naukowych składających się na rozprawę doktorską

Lp.	Autorzy (udział procentowy)	Tytuł (czasopismo)	Liczba punktów wg listy MNiSW	Liczba punktów własnych	Impact factor [IF]
1.	Tadeusz Grabowski (70%) Krzysztof Józwiakowski (15%) Andrzej Bochniak (10%) Agnieszka Micek (5%)	Changes in the Amount of Rainwater in the Roztocze National Park (Poland) in 2001–2020 and the Possibility of Using Rainwater in the Context of Ongoing Climate Variability Water 2022, 14, 1334, s. 1-20	100	70	3,4
2.	Tadeusz Grabowski (60%) Krzysztof Józwiakowski (15%) Andrzej Bochniak (15%) Przemysław Stachyra (5%) Bogusław Radliński (5%)	Assessment of Rainwater Quality Regarding Its Use in the Roztocze National Park (Poland)—Case Study Applied Sciences 2023, 13, 6110, s. 1-22	100	60	2,5
3.	Tadeusz Grabowski (60%) Andrzej Bochniak (15%) Tadeusz Siwiec (10%) Krzysztof Józwiakowski (15%)	Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland) Sustainability 2024, 16, 4709, s. 1-23	100	60	3,3
SUMA:			300	190	9,2

2. Wstęp

Zmiany klimatu powodują m.in., że zapewnienie wody do picia i celów hodowlanych staje się coraz większym problemem. W ostatnich latach na całym świecie coraz częściej mówi się o możliwości wykorzystania wód opadowych do różnych celów [Palla i in. 2012, Musayev i in. 2018, Semaan i in. 2020]. Ma to związek z postępującymi zmianami klimatu i rosnącymi niedoborami wody w wielu krajach. Gromadzenie i wykorzystanie wody deszczowej jest jednym z działań mogących poprawić bezpieczeństwo wodne i dostęp do wody słodkiej [Musayev i in. 2018].

Zmiany klimatu w Roztoczańskim Parku Narodowym skutkują zmianami abiotycznych i biotycznych komponentów środowiska. Objawiają się one lokalnym obniżaniem się poziomu wód gruntowych, wzrostem temperatury powietrza – szczególnie w półroczu jesienno-zimowym, wcześniej rozpoczynającym się okresem wegetacyjnym, zmiennym rozkładem opadów w ciągu roku [Raport 2023]. Zmusza to do gromadzenia wód opadowych w celu zaspokojenia zapotrzebowania na wodę z alternatywnego źródła [Grabowski i in. 2022]. Konsekwencją zmian klimatu zachodzących na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego był brak wody w Stawach Echo w 2019 r. oraz spadek wydajności studni, m.in. we Floriance, z której zaopatrywana jest Hodowla Stajenna Konika Polskiego [Raport 2020].

Zastąpienie wód podziemnych o wysokiej jakości wodami opadowymi wpisuje się w programy mające na celu ochronę przyrody, w tym ograniczenie zużycia wody o wysokiej jakości i ochronę ilościową zasobów wód podziemnych w parkach narodowych [Ustawa o ochronie przyrody, 2004]. Potrzeba zastąpienia wód podziemnych wodami opadowymi wynika też z postanowień Planu Ochrony Roztoczańskiego Parku Narodowego [Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2018], w zakresie związanym z prowadzeniem działań na rzecz obniżania się poziomu wód gruntowych, ograniczania poboru wód podziemnych oraz ochrony miejsc żerowania, bytowania i rozrodu płazów i gadów. Działania takie stanowią realizację polityki Państwa, w tym projektu Ustawy o inwestycjach w zakresie przeciwdziałania skutkom suszy. Na właściwe zagospodarowanie wód opadowych powinno się zwracać szczególną uwagę na obszarach chronionych, co może pozwolić na zrównoważoną ochronę wód i bioróżnorodności na takich terenach [Harrison i in. 2016; Miah i in. 2017].

Okresowo występujące lokalnie susze, w tym na terenie RPN, spowodowane m.in. wzrostem temperatury, skutkują obniżaniem się poziomu wód podziemnych, a w rezultacie zmianami w środowisku. Zachodzące zmiany klimatyczne powodują, że ostatnio coraz więcej

prac badawczych wskazuje, iż gromadzenie i wykorzystywanie wód opadowych może pomóc w rozwiązaniu problemów niedoborów wody w różnych regionach na świecie. Palla i in. [2012], Musayev i in. [2018], Raimondi i in. [2023] wskazali, że roczna liczba publikacji zarejestrowanych w bazie Scopus, zawierających słowo kluczowe „zbieranie wody deszczowej” wzrosła z 0 w 1985 r. do ponad 400 w 2021 r.

Autorzy z Niemiec [Herrmann i Schmida 1999], Grecji [Sazakli i in. 2007], Brazylii [Ghisi i in. 2007], Australii [Zhang i in. 2009] i Jordanii [Abdulla i Al-Shareef 2009] wskazują, że wody opadowe mogą zaspokoić 100% zapotrzebowania na wodę w gospodarstwie domowym i że mogą być stosowane do różnych celów [Semaan i in. 2020]. Kim i in. [2006] podali, że wody opadowe są wykorzystywane jako główne źródło zaopatrzenia w wodę dla milionów ludzi w krajach rozwijających. Ale w ostatnich latach, ze względu na zmiany klimatu, susze i zwiększające się koszty wody, również kraje wysoko rozwinięte coraz częściej wdrażają technologie gromadzenia i wykorzystania wód opadowych [Raimondi i in. 2023].

Eroksuz i Rahman [2010] zbadali potencjał oszczędności wody dzięki zastosowaniu zbiorników na wodę deszczową w wielopiętrowych budynkach mieszkalnych w trzech miastach wschodniej Australii. Autorzy Ci stwierdzili, że zbiornik na wodę deszczową o odpowiedniej wielkości w budynku wielopiętrowym, może zapewnić znaczne oszczędności wody nawet w latach suchych.

Wykorzystanie wód deszczowych do różnych celów skutkuje koniecznością badania ich jakości, stosowania systemów oczyszczania, czy dezynfekcji. Istotnym problemem jest zmienna w czasie i przestrzeni jakości wód opadowych, która zależy od wielu różnych czynników geograficznych i antropogenicznych [Farreny i in. 2011, Józwiakowski i in. 2016, Zdeb i in. 2020]. Według Forstera [1998] jakość wody deszczowej zbieranej z dachów zależy od:

- 1) materiału pokrycia dachu (właściwości chemiczne, chropowatość, powłoka powierzchniowa, wiek itp.),
- 2) warunków fizycznych dachu (wielkość, nachylenie, kierunek i ekspozycja),
- 3) położenia dachu (odległość od możliwych źródeł zanieczyszczeń),
- 4) stężenia zanieczyszczeń chemicznych (prężność pary wodnej, rozpuszczalność zanieczyszczeń w wodzie itp.),
- 5) charakterystyki zjawisk opadowych (natężenie opadów atmosferycznych i ich objętość, charakterystyka wiatru, stężenie zanieczyszczeń w wodach opadowych),

- 6) lokalnych czynników meteorologicznych (pora roku, charakterystyka pogody, długość poprzedzającego okresu suchego).

Zbierana woda deszczowa charakteryzuje się zazwyczaj dobrymi parametrami fizykochemicznymi, jednak często charakteryzuje się wysokim stopniem skażenia mikrobiologicznego [Skwarzyńska i in. 2014; Struk-Sokołowska 2020]. Zanieczyszczenia w zbieranej wodzie deszczowej pochodzą m.in. ze spalania paliw w pojazdach i budynkach, emisji przemysłowych, działalności rolniczej na obszarach wiejskich, czy gromadzenia się na dachach odchodów zwierząt – głównie ptaków [Evans 2006]. Jakość wody deszczowej zależy także od sposobu jej przechowywania. Ocenę jakości wody deszczowej magazynowanej w różnych typach zbiorników przedstawili Wu i in. [2016]. Wykazano, że najlepszym rozwiązaniem do magazynowania wody deszczowej są zbiorniki betonowe.

Na terenach narażonych na szczególnie duże ryzyko niedoboru wody, wodę deszczową można również wykorzystać do picia [Evans i in. 2007]. Badania przeprowadzone w południowej Brazylii pokazują, że potencjał zapotrzebowania na wodę w hodowli zwierząt, którą może zapewnić woda deszczowa, wynosił 100% w przypadku produkcji drobiu i od 32,7% do 68,3% w przypadku trzody chlewnej [Hoss i in. 2022]. Z drugiej strony wielu mieszkańców Australii decyduje się na picie wody deszczowej, która jest chlorowana i fluorowana, nawet na obszarach, gdzie dostępna jest czysta woda miejska [Chubaka i in. 2017]. Wiedza na temat jakości zbieranej wody deszczowej ma kluczowe znaczenie dla ochrony zdrowia publicznego [Forster i in. 1998].

Znajomość właściwości fizykochemicznych i bakteriologicznych wód opadowych jest gwarancją bezpieczeństwa ich wykorzystania m.in. do celów hodowlanych. Gospodarka o obiegu zamkniętym, a co za tym idzie tworzenie zamkniętych obiegów wody, jest jednym z elementów strategii i polityki Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju [Voicu, Dumitru 2024]. Ze względu na ciągłe zmiany klimatyczne i niedobory wody, w XXI wieku coraz częściej mówi się o konieczności gromadzenia wody deszczowej [Grabowski i in. 2022]. Zbieranie i ponowne wykorzystanie wody deszczowej jest to technologia znana od starożytności, a przykłady takich układów z okresu neolitu przedstawili Bruins i in. [1986].

Zalety systemów do gromadzenia wód opadowych szczegółowo opisali Morey i in. [2016], Yawalkar i in. [2021] i Ertop i in. [2023]. Dotychczas wykazano, że w szczególnych przypadkach wody opadowe, jeśli mają dobre właściwości organoleptyczne, fizykochemiczne i mikrobiologiczne – mogą spełnić wymagania odnoszone do wody do spożycia przez ludzi. Jednak, bardzo często wody opadowe mogą zawierać jony amonowe i podwyższone wartości wskaźników mikrobiologicznych, co jest prawdopodobnie spowodowane zanieczyszczeniem

powierzchni dachów ptasimi odchodami [Józwiakowski i in. 2016; Zdeb i in. 2021; Grabowski i in. 2023]. Dlatego niezbędne jest oczyszczanie wód opadowych w przypadku ich wykorzystania do celów pitnych dla ludzi i zwierząt [Grabowski i in. 2023].

Dotychczas opublikowano niewiele prac naukowych dotyczących oceny funkcjonowania technologii do oczyszczania wód opadowych w pełnej skali technicznej związanej z pozyskaniem wód opadowych, ich transportem, magazynowaniem, oczyszczaniem i redystrybucją na cele hodowlane, sanitarne, przeciwpożarowe, techniczne oraz przyrodnicze. Dlatego istnieje ogromna potrzeba podjęcia takich badań w odniesieniu do różnych dachów, różnych rejonów świata i różnych okresów roku.

3. Problem naukowy, cel rozprawy i tezy pracy

3.1. Problem naukowy

Problem naukowy rozprawy sformułowano w postaci pytania: „Czy ilość i jakość wód opadowych na terenie RPN oraz ich gromadzenie i uzdatnianie pozwala na ich wykorzystanie na cele hodowlane ?”.

3.2. Cel rozprawy

Głównym celem naukowym rozprawy doktorskiej jest ocena możliwości wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt (konika polskiego) na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego (RPN). Cele szczegółowe rozprawy obejmują:

- 1) określenie ilości wód opadowych możliwych do wykorzystania na terenie zlewni strumienia Świerszcz (publikacja nr 1),
- 2) określenie właściwości fizykochemicznych i mikrobiologicznych wód opadowych oraz wód płynących i podziemnych w zlewni strumienia Świerszcz, w odniesieniu do obowiązujących norm prawnych (publikacja nr 2),
- 3) określenie skuteczności oczyszczania wód opadowych w pilotażowej instalacji i możliwości jej praktycznego zastosowania w planowanym do wdrożenia systemie zagospodarowania wód opadowych we Floriance (publikacja nr 3).

Cel wdrożeniowy rozprawy doktorskiej obejmuje opracowanie założeń do wdrożenia systemu do transportu, magazynowania, redystrybucji i oczyszczania (dezynfekcji) wód opadowych, z przeznaczeniem na cele hodowlane oraz sanitarne, techniczne, przeciwpożarowe, z odprowadzaniem nadmiaru wód do miejsc rozrodu płazów w dawnych stawach w Ośrodku Hodowli Zachowawczej w Roztoczańskim Parku Narodowym we Floriance.

3.3. Tezy pracy

W celu opracowania i wdrożenia systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego, przyjęto następujące założenia:

- Ilość i jakość wód opadowych zbieranych na terenie RPN pozwala na ich wykorzystanie do celów hodowlanych.
- Gromadzenie wód opadowych w podziemnych zbiornikach betonowych sprzyja utrzymaniu stabilnych warunków termicznych, ograniczających negatywne zmiany jakości wody.

- Wody deszczowe po uzdatnieniu w procesach filtracji i dezynfekcji, można wykorzystać do pojenia koników polskich w Roztoczańskim Parku Narodowym.
- Praktyczne zastosowanie sytemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych możliwe będzie w Ośrodku Hodowli Zachowawczej we Floriance na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego.

4. Charakterystyka obszaru i obiektów badań

4.1. Położenie i charakterystyka Roztoczańskiego Parku Narodowego

Roztoczański Park Narodowy (RPN) zlokalizowany jest na Roztoczu, regionie fizycznogeograficznym położonym na pograniczu Polski i Ukrainy w południowo-wschodniej Polsce (ryc. 1). Jest to region pogranicza przyrodniczego, ukształtowany jako stosunkowo wąska strefa wapiennych wzniesień, łącząca Wyżynę Lubelską z Podolem. Od sąsiednich regionów wyróżnia się budową geologiczną, rzeźbą, klimatem, stosunkami wodnymi, glebami i szatą roślinną. Region posiada wiele tożsamyh i osobliwych cech, w tym dobrze zachowany, wyrazisty, niepowtarzalny w skali Europy krajobraz [Buraczyński 2002; Grabowski i in. 2015; Kałamucka i Grabowski 2015].



Ryc. 1. Położenie Roztoczańskiego Parku Narodowego na tle regionów fizycznogeograficznych [Kondracki 2011, Grabowski i in. 2022].

RPN zajmuje powierzchnię 8 482,83 ha i jest jednym z 23 parków narodowych w Polsce. Powstał w 1974 r. w celu zachowania dziedzictwa przyrodniczo-kulturowego regionu Roztocza oraz udostępniania parku dla nauki, turystyki i rekreacji, w sposób, który nie

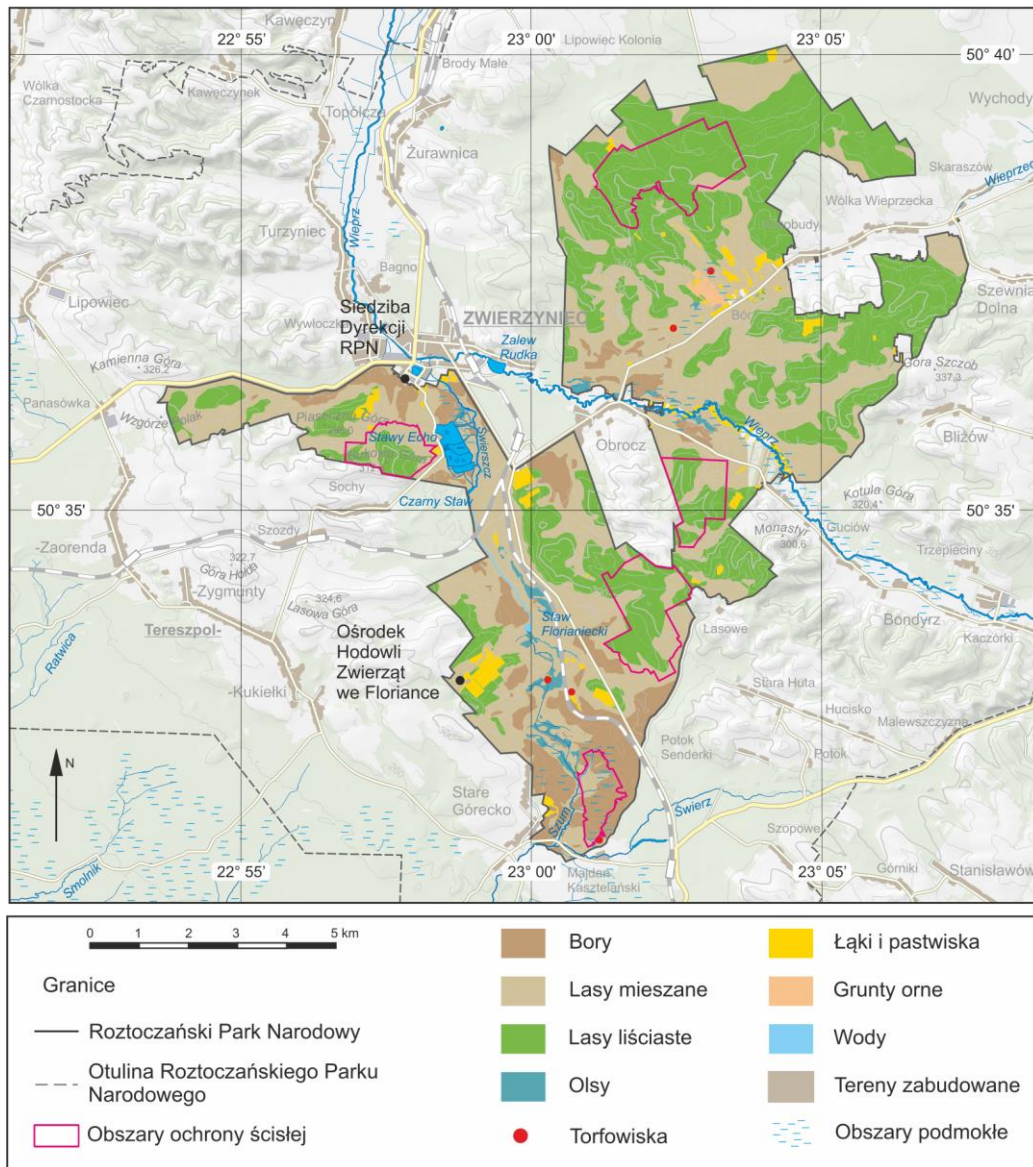
wpływa negatywnie na przedmiot ochrony. Zgodnie z Ustawą o ochronie przyrody [2004], zadaniem parku jest również prowadzenie edukacji przyrodniczej.

W podziale Polski na regiony klimatyczne wg Romera [1949], klimat Roztocza został zaliczony do klimatu Wyżyn Środkowych, regionu Wyżyn i krawędzi Lubelsko-Lwowskich (D4). Klimat RPN należy do typu klimatu umiarkowanego, przejściowego, o nieco większym niż w innych obszarach Polski udziale cech kontynentalnych [Kaszewski, Siwek 2015a]. Obszar RPN należy do najchłodniejszych w regionie. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 7,4-7,5°C, a na wzniesieniach jest o ok. 1-2°C niższa. Roczna suma opadów atmosferycznych wynosi zazwyczaj 600-650 mm. RPN posiada umiarkowanie duże usłonecznienie, w którym średnie roczne sumy godzin ze słońcem wahają się od 1550 do 1600. W obrębie parku widoczne jest znaczne zróżnicowanie topoklimatyczne, które jest związane z różnorodną rzeźbą terenu, wpływającą na zmienność ekspozycji i duże deniwelacje terenu oraz ze składem gatunkowym roślin, warunkującym wysokość i zwartość pokrycia przez szatę roślinną [Kaszewski, Siwek 2015b].

Obszar RPN cechuje się bardzo rzadką siecią wód powierzchniowych. Decyduje o tym przede wszystkim duża przepuszczalność i pojemność wodna podłoża skalnego, co pozwala na retencję wód z opadów atmosferycznych. Wody powierzchniowe zajmują tylko 52,6 ha, co stanowi 0,62% całkowitego obszaru RPN. Wody podziemne występują w porowoszczelinowych skałach górnej kredy, wykształconych jako margle, opoki i gezy oraz w osadach piaszczystych i żwirach czwartorzędowych, wypełniających kopalne doliny rzek. W strefach dolin rzecznych wody piętra kredowego łączą się z wodami wypełniającymi aluwia, tworząc wspólny system krążenia i drenażu, tzw. roztoczański poziom wód, który charakteryzuje się dużymi zasobami wód podziemnych [Bartoszewski, Michalczyk 2015]. Na obszarze Parku wyróżnia się dwanaście typów gleb (w oparciu o Klasyfikację Gleb Leśnych Polski), na ukształtowanie których największy wpływ, spośród czynników glebotwórczych, miały skały macierzyste i rzeźba terenu [Dębicki i in. 2015].

Około 95 % powierzchni RPN porastają zróżnicowane lasy. Ochronie ścisłej podlega 1030 ha lasów o charakterze naturalnym, ochronie czynnej zaś 7 200 ha [Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska 2018]. Strukturę pokrycia terenu na obszarze RPN przedstawia rycina 2.

Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego



Ryc. 2. Struktura użytkowania terenu na obszarze Roztoczańskiego Parku Narodowego – opracowano na podstawie [Grabowski i in. 2022].

4.2. Położenie i charakterystyka zlewni strumienia Świerszcz

Zlewnia strumienia Świerszcz położona jest w południowej części RPN i obejmuje obszar 4 651 ha, a 40% jej powierzchni leży na terenie Parku. Budowę geologiczną zlewni strumienia Świerszcz przedstawia rycina 3.

W północnej części zlewni, w dolnym odcinku strumienia Świerszcz, znajdują się zasilane przez niego Stawy Echo (o powierzchni 52 ha), oś wodna ze stawami oraz tzw. staw „kościelny”. Świerszcz to strumień śródleśny o długości ok. 9 km. Swój początek ma na borach bagiennych i torfowiskach wysokich na wysokości ok. 250 m n.p.m. Ujście do rzeki Wieprz znajduje się na wysokości 220 m. n.p.m. [Buraczyński i in. 2013].

Zlewnia Świerszcza położona jest w dwóch podregionach Roztocza: Szczebrzeszyńskiego i Tomaszowskiego. Dolina strumienia Świerszcz wysłana jest piaskami rzecznyymi i eolicznymi, tworzącymi wały wydmowe i wydmy. Wschodnią i zachodnią część zlewni pokrywają gezy, margle, opoki margliste z górnej kredy [Brzezińska-Wójcik i in. 2013] (ryc. 3).

Stosunki wodne w zlewni strumienia Świerszcz kształtują się pod wpływem warunków klimatycznych i topograficznych. Od czynników klimatycznych zależy ilość wody wprowadzanej do obiegu oraz sezonowa i roczna zmienność zasilania. Warunki terenowe, głównie budowa geologiczna i rzeźba terenu, gleby, szata roślinna, sposób użytkowania terenu, decydują o możliwości powierzchniowego i podziemnego retencjonowania wody oraz decydują o intensywności spływu powierzchniowego. Jednocześnie czynniki te modyfikują roczny i sezonowy rytm odpływu, wynikający z rozkładu opadów atmosferycznych, infiltracji i ewapotranspiracji.

Natężenie przepływu wody strumienia Świerszcz jest zmienne i zależne od warunków klimatycznych i terenowych. W ostatnich latach hydrologicznych, w profilu „Malowany most” (P3 – ryc. 3) odnotowywano zmienne wartości przepływu wody w strumieniu. Z raportów ze Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Roztocze wynika, że największe przepływy notowano w 2013 r. Maksymalny przepływ dobowy wynosił wówczas 0,575 m³/s, minimalny zaś 0,056 m³/s. Najmniejszymi przepływami odznaczał się rok hydrologiczny 2019/2020, kiedy to po serii lat suchych i gorących wyraźnie spadło zasilanie strumienia wodami głębinowymi poziomu kredowego. Średnie roczne natężenie przepływu wyniosło zaledwie 0,007 m³/s, maksymalne 0,030 m³/s, a minimalne, podobnie jak w roku 2019, poniżej 0,002 m³/s.

Wszystkie miejscowości w zlewni strumienia Świerszcz posiadają zbiorową sieć wodociągową, z wyjątkiem osad leśnych Florianka i Lasowe. Osada Florianka posiada własne lokalne ujęcie wody i sieć wodociągową. Ścieki odprowadzane są do hybrydowej hydrofitowej oczyszczalni, której funkcjonowanie opisano w pracy Micek i in. [2020]. Stopień skanalizowania wsi w zlewni strumienia Świerszcz jest niewielki. Sieć kanalizacyjną

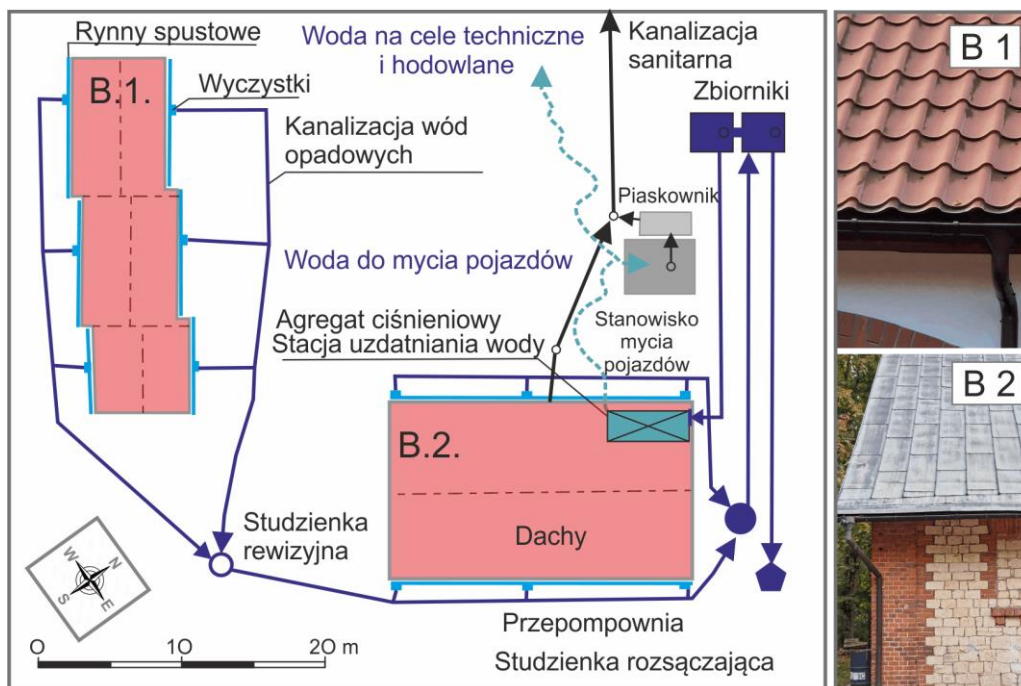
posiada miasto Zwierzyniec i wieś Sochy. W niektórych gospodarstwach funkcjonują przydomowe oczyszczalnie ścieków. Jednak zazwyczaj ścieki gromadzone są w szambach.

Zachodzące zmiany klimatu oraz większe zapotrzebowanie na wodę skutkuje m.in. obniżaniem poziomu wód gruntowych oraz spadkiem wydajności studni. Zjawisko to jest obserwowane m.in. we Floriancu. Jest to wyjątkowa osada na mapie RPN. Znajduje się tu Ośrodek Hodowli Zwierząt herbowego zwierzęcia Parku – konika polskiego, prymitywnych ras bydła – rasa białogrzbieta i rasa czerwona oraz owcy uhruskiej. Znajduje się tu również terenowa baza edukacyjno-turystyczna – Izba Leśna. Miejsce to rokrocznie odwiedza ok 35 tys. turystów. W dolnym odcinku Świerszcza znajduje się „ostoja” konika polskiego. Na powierzchni ok. 260 ha przebywa tu w ciągu całego roku tabun koni liczący maksymalnie 25 osobników.

Gromadzenie i wykorzystanie wód opadowych jest jednym z działań, które może poprawić bezpieczeństwo wodne i dostęp do wody słodkiej w aspekcie zachodzących zmian klimatu. Wyniki badań dotyczące ilości i jakości wód opadowych na terenie zlewni strumienia Świerszcz opisano w publikacjach nr 1 i 2 niniejszej rozprawy [Grabowski i in. 2022, Grabowski i in 2023].

4.3. Lokalizacja i charakterystyka obiektu badawczego - instalacja testowa przy Dyrekcji RPN

Wyniki badań zaprezentowane w publikacji nr 2 [Grabowski i in. 2023] wykazały, że wody opadowe przed wykorzystaniem do pojenia zwierząt powinny być uzdatniane. Dlatego postanowiono przeprowadzić badania w testowej instalacji do uzdatniania wód opadowych, którą wdrożono w 2023 roku przy istniejącym od 2014 r. systemie do gromadzenia i zagospodarowania wód opadowych, zlokalizowanym w Zwierzyńcu przy siedzibie dyrekcji Roztoczańskiego Parku Narodowego (RPN) – 50°36'21,1"N, 22°58'00,6"E. Schemat systemu do gromadzenia i zagospodarowania wód opadowych przedstawia rycina 4.



Ryc. 4. Schemat systemu do gromadzenia i zagospodarowania wód opadowych przy Dyrekcji RPN – opracowano na podstawie [Grabowski i in. 2024].

W skład systemu gromadzenia i zagospodarowania wód opadowych wchodzi system rynien i rur spustowych służący do zbierania wód opadowych z dachów dwóch budynków gospodarczych, przepompownia wody (pompa Omnigena o wydajności max. 35 l/min.), 2 zbiorniki betonowe o pojemności 10 m³ i głębokości 2,45 m każdy. Woda zbierana jest systemem rynien i rur spustowych z dachów budynków B1 i B2 z pokryciami pokazanymi na ryc. 4. Dachy w obu budynkach są dwuspadowe, dlatego system rynien został umocowany po obu stronach budynku. Połączone strumienie wody z dachów każdego z budynków spływają do przepompowni, a następnie do dwóch zbiorników betonowych, które są ze sobą połączone, tworząc wspólny magazyn wody. Ze względu na konieczność utrzymywania wody spływającej do zbiorników betonowych w jak najlepszym stanie jakościowym, każda z rur spustowych z dachów została wyposażona w kratę wraz z otworem wyczystkowym.

Woda ze zbiorników pobierana jest rurociągiem ssącym połączonym z pompą zainstalowaną w warsztacie w budynku B2, gdzie znajduje się system jej uzdatniania. Budynek B1 ma wymiary 24,6×6,5 m, powierzchnia jego dachu w rzucie z góry wynosi około 185 m², a kąt nachylenia dachu 40°. Wymiary budynku B2 wynoszą 21×12,4 m, powierzchnia dachu w rzucie z góry – około 302 m², przy kącie nachylenia 37° [Józwiakowski i in. 2016]. Fotografie obu budynków zostały pokazane na ryc. 5.



Ryc. 5. Widok budynku garażowego (B1) i warsztatowego (B2) przy dyrekcji Roztoczańskiego Parku Narodowego (Fot. Kaproń B.)

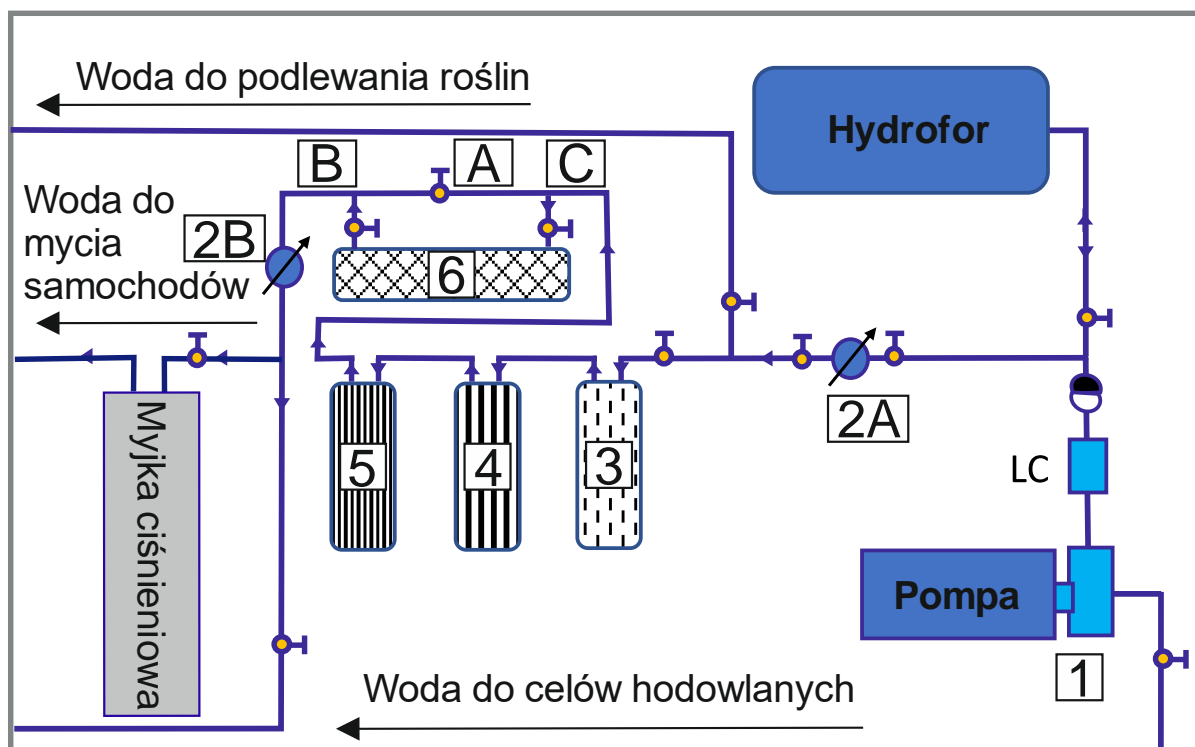
W maju 2023 roku w budynku nr B2 przy systemie gromadzenia i zagospodarowania wód opadowych wdrożono instalację do ich uzdatniania, składającą się z hydroforu, trzech filtrów oraz lampy UV. Szczegółowy schemat testowej instalacji do uzdatniania wód opadowych przedstawiono na ryc. 6.

Woda ze zbiorników betonowych zasysana jest pompą odśrodkową (Omnigena) typu WZ 250/2L sterowaną łącznikiem ciśnieniowym LC i połączoną z hydroforem. Woda wypływająca z tej części instalacji rozdziela się na dwie części, z których jeden strumień przeznaczony jest do podlewania roślin, a drugi płynie przez system uzdatniania wody, a następnie rozdziela się na kolejne 2 strumienie, z których jeden, potencjalnie, przeznaczony jest do pojenia koni, a drugi do mycia samochodów.

Technologia uzdatniania wody polega na jej przepływie przez kolejno ustawione poszczególne urządzenia. Początkowo woda przepływa przez filtr pierwszy z wkładem polipropylenowym o prześwitach 20 μm (3), dalej przez filtr drugi z wkładem polipropylenowym o prześwitach 5 μm (4) i przez filtr trzeci z wkładem z węgla aktywnego (5). Do usunięcia różnych mikroorganizmów, a szczególnie bakterii grupy coli, zastosowano lampę UV (Eko Technika TMA D6, 2,3 m^3/h) (6). Lampa UV ma za zadanie dezynfekowanie wody, która może być zanieczyszczona odchodami ptasimi spływającymi z dachu. Ponieważ

Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego

skuteczność jej działania jest silnie zależna od klarowności wody, została usytuowana na końcu ciągu technologicznego, po wszystkich filtrach.

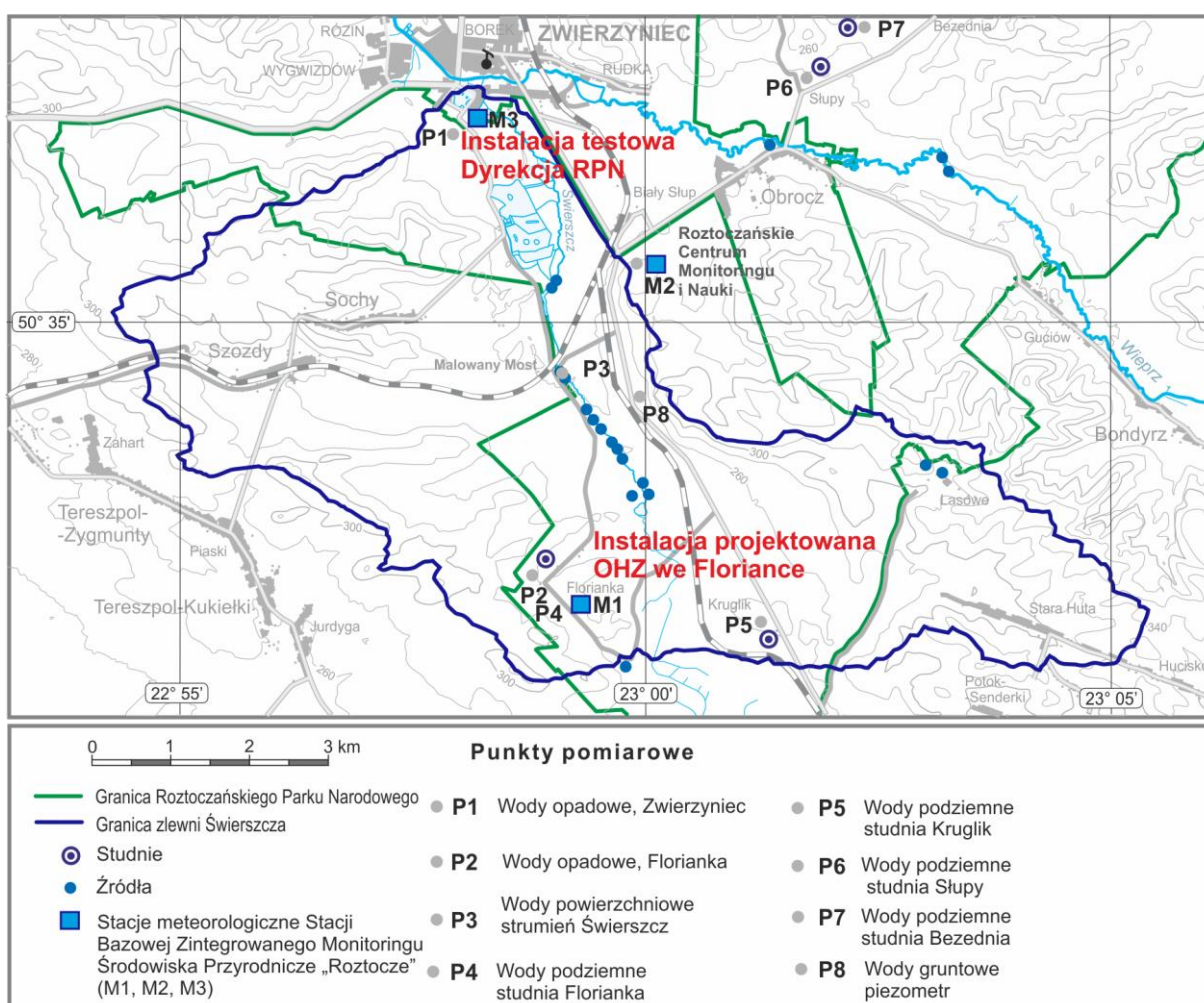


Ryc. 6. Schemat badanej instalacji do oczyszczania wód opadowych [Grabowski i in. 2024]. Elementy instalacji: 1 – pompa, 2A i 2B – wodomierze, 3 – filtr polipropylenowy – usuwanie zanieczyszczeń mechanicznych powyżej 20 mikronów, 4 – filtr polipropylenowy – usuwanie zanieczyszczeń mechanicznych powyżej 5 mikronów, 5 – filtr z węglem aktywnym, 6 – lampa bakteriobójcza – promienie UV, A, B, C – zawory lampy UV.

Do oceny ilościowej zużywanej wody zamontowano dwa wodomierze – 2A i 2B (rysunek 5). Woda do pojenia koni ma wystarczające ciśnienie, dlatego płynie bezpośrednio do poidel po systemie uzdatniania, natomiast do mycia samochodów przepływa przez myjkę ciśnieniową (Karcher), która wymaga wyższego ciśnienia. Jak pokazały wstępne badania, pełną skuteczność dezynfekcyjną lampa UV osiąga po 2 minutach od włączenia, dlatego impuls z łącznika ciśnieniowego LC włączający pompę został opóźniony. Czyli po wystąpieniu minimalnego ciśnienia w hydroforze włącza się lampa UV, a dopiero po 2 minutach włącza się pompa, przetłaczając wodę przez system uzdatniania i uzupełniając odpowiednią objętość wody w hydroforze.

5. Zakres i metodyka badań

Okres badań własnych do rozprawy doktorskiej obejmował lata 2021-2024. Badania ilościowe i jakościowe wód opadowych realizowano w latach 2021-2022, natomiast efektywność instalacji testowej do uzdatniania wód opadowych analizowano w 2023 roku. W celu określenia standardów środowiskowych skorzystano z danych Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) „Roztocze” funkcjonującej w ramach ZMŚP Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (GIOŚ) z lat 2001-2020.



Ryc. 7. Lokalizacja obiektu badań na tle mapy punktów pomiarowych w zlewni strumienia Świerszcz – opracowano na podstawie [Grabowski i in. 2023].

Badania ilościowe, czyli: pobór próbek i analizy statystyczne (wód opadowych, powierzchniowych, podziemnych) prowadzono w oparciu o metodykę przyjętą w wytycznych ZMŚP. Badania jakościowe: organoleptyczne, fizykochemiczne i mikrobiologiczne

pobranych prób wody wykonywano według aktualnie obowiązujących metod, w akredytowanym Laboratorium Usług Badawczych, Lubelskiej Spółdzielni Usług Mleczarskich w Lublinie. Lokalizację instalacji testowej i punktów poboru prób wody do analiz laboratoryjnych przedstawia ryc. 7.

5.1. Materiały i metody określania możliwości wykorzystania wód opadowych

W publikacji nr 1 [Grabowski i in. 2022] wykorzystano dane literaturowe dotyczące zmian klimatu na terenie RPN, pochodzące z monografii dotyczącej RPN i Roztocza [Kaszewski i in. 2015]. W celu określenia zmian ilości opadów atmosferycznych na terenie RPN w latach 2001-2020 wykorzystano dane z Raportów Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego „Roztocze” (SB ZMŚP), należącej do RPN i funkcjonującej w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ). Brakujące dane pozyskano z Roztoczańskiej Stacji Naukowej Guciów, Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej (UMCS) w Lublinie. Zgromadzone dane pomiarowe ZMŚP spełniają standardy i normy oraz opierają się na sprawdzonych i porównywalnych metodach badań terenowych i analiz laboratoryjnych. Założenia metodologiczne ZMŚP, zestawienie systemu pomiarowego, metody analityki laboratoryjnej, zasady gromadzenia i opracowywania wyników badań, przedstawia opracowanie z serii Biblioteka Monitoringu Środowiska [Lorenc i Prządka 2006].

Do analizy statystycznej uzyskanych wyników badań dotyczących opadów atmosferycznych oraz temperatury powietrza na terenie RPN wykorzystano jednoczynnikową analizę wariancji do porównania ich średnich wartości pomiędzy dekadami. Do wyznaczenia trendu zmian opadów oraz temperatury na przestrzeni badanych lat, użyto także regresji liniowej i wyznaczono współczynniki korelacji Pearsona r między latami badań a ilością opadów i temperaturą powietrza.

Potencjalną ilość wód opadowych spływających z powierzchni dachów budynków gospodarczych na terenie RPN oraz dla planowanej do wdrożenia instalacji w OHZ we Florianie obliczono ze wzoru zaproponowanego przez Królikowską i Królikowskiego [2012]. Natomiast zapotrzebowanie na wodę w OHZ we Florianie określono na podstawie obowiązujących norm [Rozporządzenie Ministra Infrastruktury, 2002] oraz wskazań urządzeń pomiarowych. Wyniki tych analiz zaprezentowano w koncepcji oraz Programie Funkcjonalno-Użytkowym [PFU] dla budowy instalacji do odprowadzania i oczyszczania wód opadowych z budynków OHZ we Florianie w Roztoczańskim Parku Narodowym [Grabowski i in. 2022a] oraz w publikacji Grabowskiego i in. [2022b].

5.2. Zakres i metodyka badań jakościowych wód

Badania jakości wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego prowadzono w latach 2021-2022 [Grabowski i in. 2023] – publikacja nr 2. W ramach badań, w próbach wód pobranych z 7 punktów pomiarowych, określano wybrane właściwości mikrobiologiczne, organoleptyczne i fizyczno-chemiczne. Lokalizację punktów poboru prób wody zaprezentowano na ryc. 7, a ich opis przedstawiono poniżej:

- P1 – punkt poboru prób wód opadowych zbieranych z dwóch dachów budynków gospodarczych zlokalizowanych przy Dyrekcji RPN w Zwierzyńcu i gromadzonych w zbiorniku betonowym o pojemności 20 m³,
- P2 – punkt poboru prób wód opadowych odpływających z dwóch dachów budynków gospodarczych zlokalizowanych w Ośrodku Hodowli Zachowawczej we Floriance,
- P3 – punkt poboru prób wód powierzchniowych ze strumienia Świerszcz w profilu „Malowany Most”,
- P4, P5, P6, P7 –punkty poboru prób wód podziemnych ze studni głębinowych w osadach leśnych RPN, odpowiednio: Florianka, Kruglik, Słupy i Bezednia.

W ramach badań jakości wód opadowych i powierzchniowych (P1-P3) w okresie badań (lata 2021-2022) wykonano po 10 serii pomiarowych, natomiast jakość wód podziemnych (P4-P7) pobieranych ze studni głębinowych zbadano jeden raz – w kwietniu 2021 roku. W Polsce, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej [2019], oceny stanu chemicznego jednolitych części wód podziemnych dokonuje się przynajmniej raz w okresie 6-letniego cyklu aktualizacji planu gospodarowania wodami na obszarze dorzecza.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia [2017] wykonano analizy około 70 parametrów jakości wód opadowych. Analizie statystycznej poddano 21 parametrów wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych w punktach pomiarowych P1-P7. Nie poddano analizie statystycznej parametrów, które były najczęściej poniżej progu oznaczalności urządzeń pomiarowych, ale jednocześnie we wszystkich cyklach pomiarowych były zgodne z normą określoną w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia [2017].

Tabela 1 przedstawia wykaz wszystkich parametrów zalecanych do badań według Rozporządzenia Ministra Zdrowia [2017], które wykonano w przypadku wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych na terenie RPN.

Badaniom i analizom statystycznym poddano parametry mikrobiologiczne, organoleptyczne i fizykochemiczne wody z punktów poboru prób P1-P7, przedstawione w kolumnie 1 tabeli 1.

Badania mikrobiologiczne wód obejmowały określanie: ogólnej liczby mikroorganizmów w temperaturze 22 i 36°C, jak również liczby bakterii: grupy coli, *Escherichia coli*, enterokoków kałowych, *Pseudomonas aeruginosa*.

Badania fizyczno-chemiczne obejmowały określanie: mętności, barwy, pH, przewodności elektrycznej właściwej w temperaturze 25 °C, jonu amonowego, azotanów, azotynów, twardości ogólnej (CaCO₃), jak również stężenia manganu, żelaza oraz chlorków.

Badania jakości wód wykonywano zgodnie z obowiązującymi w Polsce normami w akredytowanym Laboratorium Usług Badawczych Lubelskiej Spółdzielni Usług Mleczarskich w Lublinie. Wykaz norm wykorzystanych w analizach laboratoryjnych przedstawiono w tabeli nr 2.

Tabela 1. Badane parametry wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych na terenie RPN.

BADANE PARAMETRY	
1.	2.
<p>PARAMETRY MIKROBIOLOGICZNE</p> <p>1. Ogólna liczba mikroorganizmów w 22°C</p> <p>2. Ogólna liczba mikroorganizmów w 36°C</p> <p>3. Bakterie grupy coli</p> <p>4. <i>Escherichia coli</i></p> <p>5. Enterokoki kałowe</p> <p>6. <i>Pseudomonas aeruginosa</i></p> <p>PARAMETRY ORGANOLEPTYCZNE</p> <p>7. Obecność obcego zapachu</p> <p>8. Liczba progowa zapachu (TON)</p> <p style="text-align: center;">PARAMETRY FIZYCZNE I CHEMICZNE (podstawowe)</p> <p>9. Mętność (NTU)</p> <p>10. Barwa (mgPt/l)</p> <p>11. pH</p> <p>12. Przewodność elektryczna właściwa w 25 °C</p> <p>13. Jon amonowy (NH₄)</p> <p>14. Azotany (NO₃)</p> <p>15. Azotyny (NO₂)</p> <p>16. Stężenie manganu (Mn)</p> <p>17. Stężenie żelaza ogólnego (Fe)</p> <p>18. Chlorki</p> <p>19. Twardość ogólna; (CaCO₃)</p> <p>20. Stężenie azotu ogólnego (z obliczeń)</p> <p>21. Stężenie fosforu ogólnego</p> <p style="text-align: center;">PARAMATRY FIZYCZNE I CHEMICZNE (rozszerzone)</p> <p>22. Antymon (Sb)</p> <p>23. Arsen (As)</p> <p>24. Bar (Ba)</p> <p>25. Bor (B)</p> <p>26. Chrom ogólny (Cr)</p> <p>27. Cynk (Zn)</p> <p>28. Glin (Al)</p> <p>29. Kadm (Cd)</p> <p>30. Kobalt (Co)</p> <p>31. Magnez Mg)</p> <p>32. Mangan (Mn)</p> <p>33. Miedź (Cu)</p> <p>34. Molibden (Mo)</p> <p>35. Nikiel (Ni)</p>	<p>36. Ołów (Pb)</p> <p>37. Rtęć (Hg)</p> <p>38. Selen (Se)</p> <p>39. Sód (Na)</p> <p>40. Srebro (Ag)</p> <p>41. 1,2-Dichloroetan/EDC (EDC)</p> <p>42. Akryloamid (C₃H₄O₂)</p> <p>43. Aldryna (C₁₂H₈Cl₆)</p> <p>44. Benozo(a)piren (C₂₀H₁₂)</p> <p>45. Benzen (C₆H₆)</p> <p>46. Bromiany (BrO₃)</p> <p>47. Bromodichlorometan/ Dichlorobromometan (CHBrC₁₂/CH₂C₁₂)</p> <p>48. Chlor wolny (Cl₂)</p> <p>49. Chloramina (NH₂Cl)</p> <p>50. Chlorek winylu (C₂H₃Cl)</p> <p>51. Cyjanki ogólne (Cyjanki)</p> <p>52. Dieldryna (C₁₂H₈Cl₆O)</p> <p>53. Epichlorohydryna (C₃H₅ClO)</p> <p>54. Fluorki (F)</p> <p>55. Heksachlorobenzen (HCB)</p> <p>56. Heksachlorocykloheksan (HCH-suma)</p> <p>57. Indeks nadmanganianowy (ChZT-Mn)</p> <p>58. Izodryna (C₁₂H₈Cl₆)</p> <p>59. Pestycydy chloroorganiczne suma (Pestycydy)</p> <p>60. Siarczany (SO₄²⁻)</p> <p>61. Suma Trichlorometanu i Tetrachlorometanu (Suma: CHCl₃/CCl₄)</p> <p>62. THM suma (THM)</p> <p>63. Trichlorometan/chloroform (CHCl₃)</p> <p>64. Pestycydy</p> <p>65. Wielopierscieniowe węglowodory aromatyczne suma (WWA)</p> <p style="text-align: center;">PARAMETRY FIZYKOCHEMICZNE (promieniotwórczość)</p> <p>66. Rad Ra-226. Emiter promieniowania α</p> <p>67. Izotop radu Ra-228. Radionuklid promieniowania β</p> <p>68. Dawka orientacyjna promieniowania</p> <p>69. Tryt 3H</p> <p>70. Radon (222)</p>

Tabela 2. Wykaz norm wykorzystanych w analizach laboratoryjnych [Rozporządzenie Ministra Zdrowia 2017].

Zakres badań	Parametr	Norma	Jednostka
Badania mikrobiologiczne	Ogólna liczba mikroorganizmów w 36 °C	PN-EN ISO 6222:2004	jtk/ml
	Ogólna liczba mikroorganizmów w 22 °C	PN-EN ISO 6222:2004	jtk/ml
	Bakterie grupy coli	PN-EN ISO 9308-1:2014-12+A1:2017-04	jtk/100 ml
	Escherichia coli	PN-EN ISO 9308-1:2014-12+A1:2017-04	jtk/100 ml
	Enterokoki kałowe	PN-EN ISO 7899-2:2004	jtk/100 ml
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	PN-EN ISO 16266:2009	jtk/100 ml
Badania organoleptyczne	Obecność obcego zapachu	PN-EN 1622:2006	-
	Liczba progowa zapachu (TON)	PN-EN 1622:2006	-
Badania fizykochemiczne	Mętność	PN-EN ISO 7027-1:2016-07	NTU
	Barwa	PN-EN ISO 7887:2012	mg/l Pt
	pH	PN-EN ISO 10523:2012	-
	Przewodność elektryczna właściwa w temperaturze 25 °C	PN-EN 27888-1999	µS/cm
	Jon amonowy	PN-ISO 7150-1:2002	mg/l
	Azotany	PN-82/C-045576.08	mg/l
	Azotyny	PN-EN 26777:1999	mg/l
	Mangan	PN-EN ISO 17294-2:2016-11	µg/l
	Żelazo ogólne	PN-EN ISO 17294-2:2016-11	µg/l
	Chlorki	PN-ISO 9297:1994	mg/l
	Twardość ogólna	PN-ISO 6059:1999	mg/l CaCO ₃
Badania fizykochemiczne	Srebro, Miedź, Sód, Magnez, Bor, Bar Kobalt, Molibden, Cynk, Arsen, Selen, Antymon, Chrom, Aluminium, Kadm, Mangan, Nikiel, Ołów	PN-EN ISO 17294-2:2016-11	µg/l
	Chlorki	PN-ISO 9297:1994	mg/l
	Twardość ogólna	PN-ISO 6059:1999	mg/l CaCO ₃

Otrzymane wyniki badań jakości wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych odniesiono do aktów prawnych obowiązujących w Polsce, które określają przydatność wody do picia [Rozporządzenie Ministra Zdrowia, 2017] oraz klasy czystości wód powierzchniowych [Rozporządzenie Ministra Infrastruktury, 2021] i podziemnych [Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej, 2019] (Tabela 3).

Ze względu na niezgodności z rozkładem normalnym (na podstawie testu Shapiro-Wilka), w celu porównania różnic w rozkładach wartości badanych parametrów we wskazanych grupach zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa [Siegel, Castellan,

1988]. W przypadku stwierdzenia występowania różnic w rozkładach parametrów w różnych rodzajach wód wykonano testy post-hoc dla średnich rang między wszystkimi parami grup.

Wyniki analiz jakości wód opadowych porównano z polskimi normami dotyczącymi wody pitnej. Ze względu na to, że w prawie polskim nie jest normowana jakość wody przeznaczonej do założonych w niniejszych badaniach celów, wyniki tych badań były odnoszone do wymagań zawartych w polskim Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

Tabela 3. Normy jakości wody do picia (1) oraz klasy czystości wód powierzchniowych (2) i podziemnych (3) według polskich aktów prawnych [1 - Rozporządzenie Ministra Zdrowia, 2017; 2 - Rozporządzenie Ministra Infrastruktury, 2021; 3 - Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej, 2019].

Badane parametry	Jednostka	Normy jakości dla wody do picia (1)	Klasy czystości wód powierzchniowych (2)		Klasy czystości wód podziemnych (3)					
			I	II	I	II	III	IV	V	
Parametry mikrobiologiczne										
Ogólna liczba mikroorganizmów w w 36 °C	jtk/ml	100	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Escherichia coli</i>	jtk/100 ml	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Enterokoki kałowe	jtk/100 ml	0	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	jtk/100 ml	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Parametry fizykochemiczne										
Mętność	NTU	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Barwa	mg/l Pt	15	-	-	-	-	-	-	-	-
pH	-	6,5-9,5	7,5–8,2	7,3–8,2	6.5-9.5			<6.5 lub >9.5		
Przewodność elektryczna właściwa w 25 °C	µS/cm	2500	≤364	≤454	700	2500	2500	3000	>3000	
Jon amonowy*	mg/l	0,5	≤0,477	≤0,545	0.5	1,0	1,5	3,0	>3,0	
Azotany*	mg/l	50	≤5,752	≤8407	10	25	50	100	>100	
Azotyny*	mg/l	0,5	≤0,033	≤0,089	0,03	0,5	0,5	1,0	>1,0	
Mangan	mg/l	0,05	-	-	0,05	0,4	1,0	1,0	>1,0	
Żelazo ogólne	mg/l	0,2	-	-	0,2	1,0	5,0	10,0	<10	
Chlorki	mg/l	250	≤13,3	≤18,7	60	150	250	500	>500	
Twardość ogólna CaCO ₃	mg/l	60-500	≤203	≤236	-	-	-	-	-	

*Ponieważ w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [2021] formy azotu podano jako: N-NH₄, N-NO₃, N-NO₂, dlatego stężenie form azotu w postaci jonu amonowego, azotanów i azotynów w wodach powierzchniowych obliczono przy zastosowaniu następujących równań: NH₄ = N-NH₄/0,776, NO₃ = N-NO₃/0,226, NO₂ = N-NO₂/0,304

5.3. Zakres i metodyka badań instalacji do oczyszczania wód opadowych

Badania skuteczności działania instalacji do uzdatniania wód opadowych prowadzono od czerwca do grudnia 2023 r. Obejmowały one oznaczanie wybranych wskaźników mikrobiologicznych i fizykochemicznych w próbach wód pobieranych raz w miesiącu ze zbiornika betonowego oraz na odpływie, po urządzeniach uzdatniających. Badania obejmowały parametry opisane w kolumnie 1, tabeli 1, a także stężenie chlorków, manganu, żelaza, srebra, miedzi, sodu, magnezu, boru, baru, kobaltu, molibdenu, cynku, arsenu, seleniu, antymonu, glinu, kadmu, manganu, niklu, ołowiu, rtęci. Badania jakości wody wykonano zgodnie z polskimi normami w laboratorium akredytowanym, o którym wspomniano wcześniej. Wykaz norm wykorzystanych w analizach laboratoryjnych podano w tabeli 2.

Dodatkowo, w ramach badań mierzono temperaturę wody na różnych głębokościach zbiornika z wodami opadowymi, licząc od jego dna na poziomie: 0,5; 1,0; 1,5 m, za pomocą rejestratorów temperatury USB Lascar EasyLog EL-USB-1-PRO.

W celu określenia bilansu korzyści związanych z wykorzystywaniem wód opadowych, określano również ich zużycie na poszczególne cele przy użyciu wodomierzy. Ponadto w pracy zaprezentowano wyniki badań temperatury powietrza oraz sum opadów atmosferycznych występujących na terenie RPN ze stacji meteorologicznej w Zwierzyńcu funkcjonującej w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, znajdującej się przy Ośrodku Edukacyjno-Muzealnym RPN - oddalonej o 100 m od badanej instalacji, punkt M3 – rycina 7.

Otrzymane wyniki badań parametrów mikrobiologicznych i fizykochemicznych poddano analizie statystycznej. Ze względu na fakt, że wartości niektórych parametrów były tak małe, że znajdowały się znacznie poniżej normatywów oraz zakresu pomiarowego aparatury badawczej, dokładniejszej analizie porównawczej poddano jedynie te, dla których uzyskano konkretne wartości liczbowe. W tabelach zestawiono podstawowe statystyki opisowe, takie jak: wartość minimalna, mediana, średnia, wartość maksymalna. Ze względu na małe liczebności prób (7 obserwacji) i często niespełnione założenie o rozkładzie normalnym, do porównania parametrów wody przed (w zbiorniku) i po uzdatnianiu użyto nieparametrycznego testu Wilcoxon dla par obserwacji. W celu zaprezentowania zmian jakości wody, otrzymane w pomiarach wyniki, dla których zaobserwowano największe różnice, zaprezentowano na wykresach czasowych oraz na wykresach pudełkowych w porównaniu do norm wody do picia.

Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego

Ponadto oszacowano skuteczność usuwania zanieczyszczeń z wody przez zaimplementowaną instalację, korzystając ze wzoru 1:

$$\text{efektywność}_p = \frac{p_{\text{wejście}} - p_{\text{wyjście}}}{p_{\text{wejście}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie p – oznacza analizowany parametr, $p_{\text{wejście}}$ - wartość parametru p w wodzie ze zbiornika – przed instalacją do uzdatniania, $p_{\text{wyjście}}$ - wartość parametru p w wodzie za instalacją do uzdatniania.

Wyznaczono również współczynniki korelacji Pearsona między temperaturą wody w zbiorniku na różnych głębokościach oraz temperaturą zewnętrzną powietrza.

6. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki badań dotyczące zmian ilości opadów atmosferycznych w Roztoczańskim Parku Narodowym w latach 2001-2020 oraz możliwości ich wykorzystania w kontekście zmian klimatu, zaprezentowano w publikacji nr 1 [Grabowski i in. 2022]. Wyniki badań dotyczące oceny jakości wód opadowych pod kątem możliwości ich wykorzystania w Roztoczańskim Parku Narodowym, przedstawiono w publikacji nr 2 [Grabowski i in. 2023]. Natomiast wyniki badań dotyczące skuteczności usuwania zanieczyszczeń w instalacji do oczyszczania wód deszczowych w Roztoczańskim Parku Narodowym zaprezentowano w publikacji nr 3 [Grabowski i in. 2024].

Poniżej przedstawiono opis najważniejszych wyników zaprezentowanych w cyklu 3 publikacji stanowiący rozprawę doktorską.

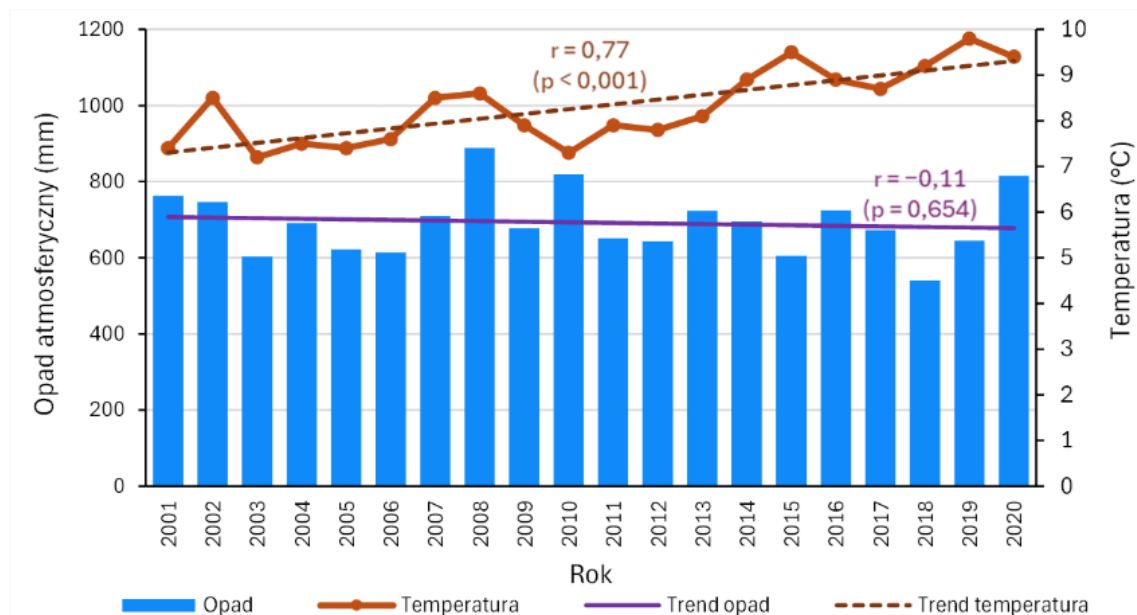
6.1. Zmiany klimatu i możliwości wykorzystania wód opadowych w zlewni strumienia Świerszcz

6.1.1. Zmiany klimatu w zlewni strumienia Świerszcz

Badania prowadzone przez RPN w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Państwowego Monitoringu Środowiska GIOŚ, obrazują niekorzystne zmiany stosunków wodnych na terenie RPN, zachodzące na przestrzeni ostatnich dziesięciu lat (2011-2020) [Radliński i in. 2021]. W maju 2020 r. odnotowano najniższy stan podziemnych wód kredowych w całej historii pomiarów, czyli od 1986 r. – lustro tych wód znajdowało się 17,5 m poniżej poziomu terenu (p.p.t.). W stosunku do najwyższego poziomu, odnotowanego w połowie czerwca 2013 r. (13,92 m p.p.t.), był to spadek o ponad 3,50 m. Sytuację tę powoduje spadek ilości opadów atmosferycznych i ich niekorzystny rozkład z przyrodniczego punktu widzenia (szczególnie brak pokrywy śnieżnej w okresach zimowych) oraz wzrost średniej rocznej temperatury powietrza o ok. 2,0 °C. Sytuacja ta skutkuje okresowo ujemnym bilansem hydrologicznym na terenie RPN, a szczególnie w zlewni strumienia Świerszcz [Radliński i in. 2021; Grabowski i in. 2022b], co przyczynia się do szeregu zmian biotycznych. Uproszczony bilans wody dla zlewni strumienia Świerszcz, polegający na zestawieniu opadu i odpływu w latach 2012-2020, nie wykazuje istotnej zmiany statystycznej. Niemniej jednak spadek ilości opadów i ich niekorzystny rozkład (brak opadu zimowego) oraz wzrost temperatury w latach 2017-2019, doprowadziły do braku wody w Stawach Echo i wyschnięciu górnego odcinka strumienia Świerszcz.

Analizując trend zmian z wykorzystaniem regresji liniowej, potwierdzono spadek ilości opadów atmosferycznych i wzrost temperatury powietrza (ryc. 8). Na podstawie otrzymanych współczynników prostej regresji, średni roczny spadek sumy opadów atmosferycznych wynosi 1,53 mm, co daje spadek ilości o 30,6 mm między rokiem 2001 i 2020 ($r = -0,11$, $p = 0,654$).

Z kolei rocznie temperatura powietrza wzrasta o $0,11^{\circ}\text{C}$, w ujęciu 20-letnim daje jej wzrost o $2,1^{\circ}\text{C}$ ($r = 0,77$, $p < 0,001$).



Ryc. 8. Zmiany sum opadów atmosferycznych i temperatury powietrza w latach 2001-2020 na terenie RPN [Grabowski i in. 2022]

Przeprowadzone badania wykazały, że zmiany temperatury powietrza na terenie RPN nie są jednostajnie. Można wyróżnić 10-letnie okresy, w których widoczny jest wzrost opadów.

W przypadku temperatury powietrza istotne wzrosty odnotowano w miesiącach: czerwiec (rocznie o $0,17^{\circ}\text{C}$, w ujęciu 20-letnim to wzrost o $3,48^{\circ}\text{C}$, $r = 0,68$, $p = 0,001$), sierpień (odpowiednio $0,13^{\circ}\text{C}$, $2,65^{\circ}\text{C}$, $r = 0,71$, $p < 0,001$), wrzesień ($0,15^{\circ}\text{C}$, $2,92^{\circ}\text{C}$, $r = 0,64$, $p = 0,002$) i grudzień ($0,26^{\circ}\text{C}$, $5,29^{\circ}\text{C}$, $r = 0,54$, $p = 0,014$). W pozostałych miesiącach wartość współczynnika kierunkowego prostej regresji nie był istotnie różny od 0. Trend zmian średniej temperatury powietrza w latach 2001-2020 przedstawia tabela 1.

Analizując trendy zmian ilości średnich opadów atmosferycznych w latach 2001-2020, stwierdzono, że w przypadku miesięcy zimnych, jedynie w grudniu odnotowano wzrost opadów ($0,48$ mm rocznie), natomiast w pozostałych przypadkach nastąpiły spadki (od $0,43$ do $1,06$ mm rocznie). W przypadku miesięcy ciepłych największe wzrosty odnotowano w maju (średnio rocznie o $1,85$ mm) i wrześniu (średnio o $1,38$ mm rocznie), a największy

spadek w lipcu (średnio o 2,43 mm rocznie). Jednak we wszystkich miesiącach współczynnik korelacji nie był istotny statystycznie.

Tabela 4. Trend średniej rocznej, półrocznej i miesięcznej temperatury powietrza w latach 2001-2020 na terenie RPN [Raport 2021, Grabowski i in. 2022]

Miesiąc	Średnia [°C]	Min [°C]	Max [°C]	Odech. stan. [°C]	<i>r</i>	<i>p</i> -value	Regresja	Zmiana w okresie 20 lat [°C]
Styczeń	-2,7	-9	2,6	2,8	0,14	0,568	0,07	1,33
Luty	-1,5	-8,6	3,6	3,2	0,32	0,167	0,18	3,58
Marzec	2,3	-2,5	5,7	2,4	0,30	0,200	0,12	2,48
Kwiecień	8,6	6,0	13,3	1,5	0,33	0,160	0,08	1,68
Maj	13,6	11,0	16,6	1,4	-0,11	0,632	-0,03	-0,55
Czerwiec	17,4	14,3	21,5	1,5	0,68	0,001*	0,17	3,48
Lipiec	19,3	17,8	20,7	0,9	-0,18	0,442	-0,03	-0,56
Sierpień	18,4	16,6	21,1	1,1	0,71	<0,001*	0,13	2,65
Wrzesień	13,1	10,9	15,0	1,3	0,64	0,002*	0,15	2,92
Październik	8,0	4,4	10,4	1,7	0,27	0,256	0,08	1,56
Listopad	3,9	0,4	6,1	1,5	0,24	0,302	0,06	1,30
Grudzień	-0,6	-7,2	2,9	2,8	0,54	0,014*	0,26	5,29
Sezon zimny	1,7	0,0	3,6	1,2	0,62	0,004*	0,13	2,51
Sezon ciepły	15,0	13,9	16,3	0,6	0,79	<0,001*	0,08	1,68
Rok	8,3	7,2	9,8	0,8	0,77	<0,001*	0,11	2,10

Sezon zimny (styczeń-kwiecień, listopad-grudzień), sezon ciepły (maj-październik)

* - korelacja istotna statystycznie

Wzrost temperatury powietrza na terenie RPN w okresie 20-lecia 2001-2020 na poziomie 2,1°C był większy do tego, który notowano średnio w Polsce [Kundzewicz, Matczak 2012; Krużel, Ziernicka-Wojtaszek 2016; Michalska 2011] i na świecie [Adedeji i in. 2014; Eensaar 2021] w poprzednich okresach, dla których stwierdzano wzrost temperatury w ciągu dekady na poziomie 0,2–0,5 °C. Szczególnie duży wzrost temperatury na terenie RPN w okresie wielolecia 2001-2020 odnotowano w grudniu – aż o 5,29°C. Sytuacja taka może doprowadzić w przyszłości do występowania bezśnieżnych zim oraz coraz częściej występujących okresów suchych wiosną.

Pomimo braku wyraźnych trendów w zakresie zmian rocznych sum opadów atmosferycznych na terenie RPN, duże wahania ilości opadów w poszczególnych latach powodują wzrost częstości występowania okresów suchych, o czym wspominały również Ziernicka-Wojtaszek i Kopciska [2020]. Tę niekorzystną sytuację pogłębia obserwowany trend spadkowy udziału opadów zimowych w sumie rocznej, co przyczynia się do zmian

środowiska przyrodniczego na terenie RPN. Zachodzące zmiany klimatyczne skutkują niekorzystnymi zmianami dla środowiska przyrodniczego i działalności społeczno-gospodarczej [Radliński i in. 2021].

Jak zauważają Szwagrzyk i Bodziarczyk [2021] oraz Maciejewski i in. [2020], niedobory wody i niekorzystne dla drzew warunki termiczno-opadowe oraz obniżanie się poziomu wód gruntowych mają wpływ na główne gatunki lasotwórcze RPN.

Stan wód powierzchniowych i podziemnych na terenie RPN ma również wpływ na hodowlę konika polskiego (*Equus ferus caballus*), która prowadzona jest w zlewni Świerszcza. Strumień jest naturalnym wodopojem dla tabunu żyjącego w warunkach półnaturalnych w ostoi na powierzchni ok. 260 ha. Stajenna hodowla konika polskiego zaopatrywana jest w wodę ze studni wód podziemnych zlokalizowanej przy Ośrodku Hodowli Zwierząt (OHZ) we Floriance. W latach 2011-2020 zaobserwowano obniżanie się poziom wód gruntowych w studni we Floriance i mniejszą jej wydajność. Stwierdzono również, że w studniach w północnej części Parku w osadach: Krzywe, Stara Huta i Sochy, w zlewni Świerszcza w tym samym okresie występował brak wody lub znaczne obniżenie jej poziomu. Niedobory wody na terenie OHZ we Floriance są niebezpieczne ze względów przeciwpożarowych, gdyż obecnie ujęcie wód podziemnych, zgodnie z obowiązującymi przepisami [Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji, 2009], nie spełnia określonych prawem wymogów, ze względu na zbyt małą wydajność.

Prognozowane zmiany klimatu oparte na regionalnych modelach klimatu na lata 2021-2050 w obszarze zmian warunków termicznych i opadu atmosferycznego [Jędruszkiewicz 2010] oraz niektóre prognozy „scenariusze” opisane w literaturze [Kaszewski, Siwek 2015a], potwierdzają wzrost temperatury oraz bardzo dużą zmienność opadów w ciągu roku. Tendencja ta, potwierdzona dodatkowo zmniejszającą się ilością opadów, znajduje potwierdzenie w dekadzie badań z lat 2011-2020, prowadzonych przez RPN w ramach ZMŚP [Raport 2021]. Ze względu na niekorzystne zmiany dla środowiska przyrodniczego i społeczno-gospodarczego, istnieje potrzeba przełamania barier (społecznych, ekonomicznych, technologicznych, prawnych itp.) w zagospodarowaniu wód opadowych, szczególnie w obszarach cennych przyrodniczo. W celu ograniczenia zużycia wody o wysokiej jakości i ochrony ilościowej zasobów wód podziemnych w zlewni Świerszcza, zachowania ciągłości hodowli konika polskiego, utrzymania osady leśnej Florianka jako terenowego punktu recepcyjnego, który odwiedza rokrocznie ok. 36-40 tys. osób, istnieje konieczność podejmowania działań w zakresie zagospodarowania wód opadowych. Różny rozkład i natężenie w czasie opadu atmosferycznego powodują, że w procesie wykorzystania

wód opadowych musi funkcjonować etap: pozyskania, transportu, gromadzenia i redystrybucji oraz – jeżeli jest to konieczne – uzdatniania wód opadowych. Sposób zagospodarowania wód opadowych musi być dostosowany do zapotrzebowania określonego w zrównoważonym gospodarowaniu wodami opadowymi.

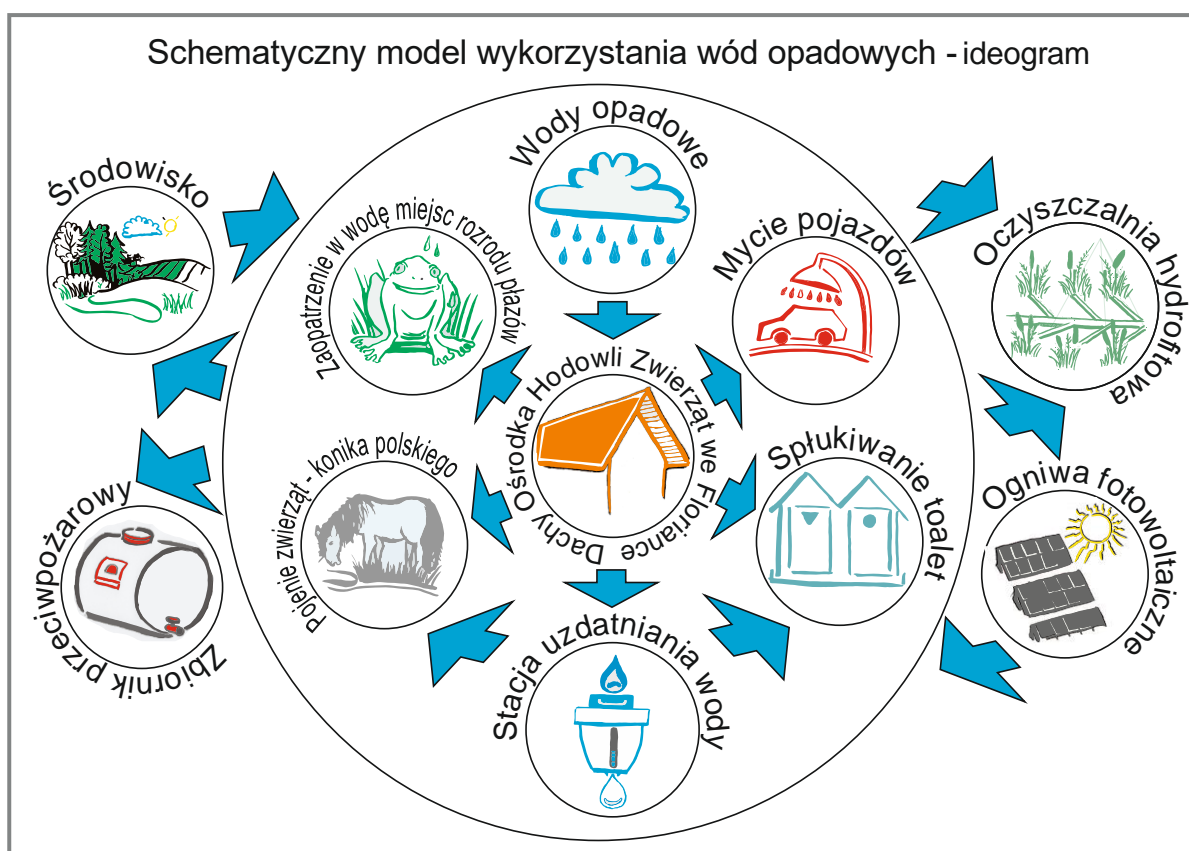
6.1.2. Założenia do wdrożenia systemu zagospodarowania wód opadowych dla Ośrodka Hodowli Zwierząt we Florianie na terenie RPN

W drugiej części pracy Grabowskiego i in. [2022b] stwierdzono, że aby chronić ilość zmniejszających się zasobów wodnych na terenie RPN oraz ograniczyć zużycie wody o wysokiej jakości, należy podejmować działania mające na celu retencję i zagospodarowanie wód deszczowych w obiektach użyteczności publicznej. Określono, że lokalne rozwiązania oparte na naturalnych zasobach wody deszczowej mogą pokryć znaczną część zapotrzebowania na wodę w osadach na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego. Obliczono, że z dachów budynków osad leśnych należących do RPN można zebrać łącznie 9109 m³ wody rocznie. Jednocześnie w pracy Grabowskiego i in. [2022b], na podstawie Programu funkcjonalno-użytkowego opracowanego przez Grabowskiego i in. [2022a], przedstawiono koncepcję budowy przykładowego systemu zagospodarowania wód opadowych dla Ośrodka Hodowli Zwierząt (OHZ) na terenie RPN we Florianie.

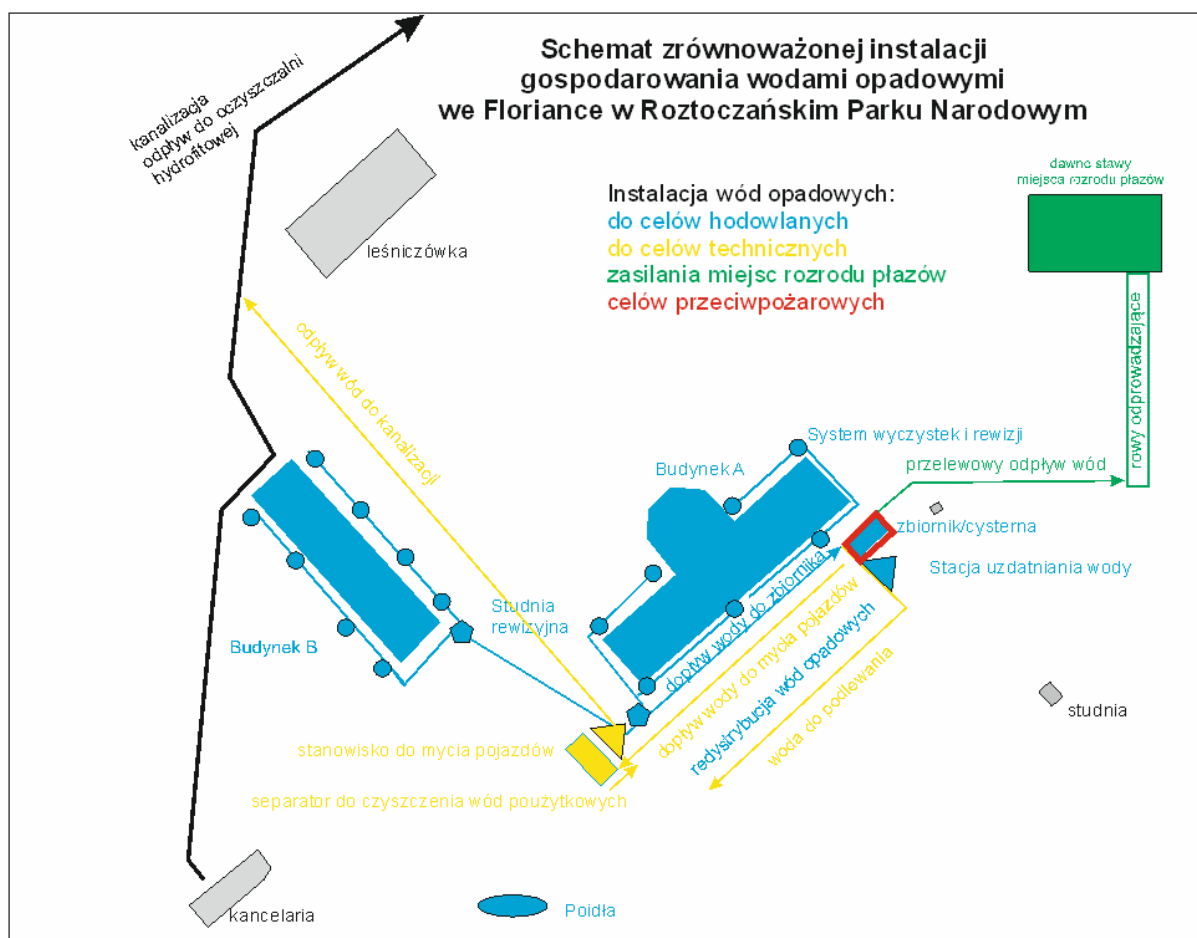
OHZ prowadzi stajenną hodowlę konika polskiego, owcy uhruskiej i bydła białogrzbietego oraz gospodarkę łąkowo-pastwiskową w celu zaopatrzenia zwierząt hodowanych w paszę. Niezależnie od tego, jest to miejsce udostępnione dla turystyki, w którym rokrocznie przebywa około 3,0 tys. osób, a 50 tys. turystów przejeżdża przez Floriankę tranzytem. Zaopatrzenie w wodę osady leśnej Florianka odbywa się ze studni o głębokości 50 m, położonej na wysokości 264,2 m n.p.m. Średnie roczne zużycie wody we Florianie, w oparciu o odczyty z wodomierza z lat 2018-2021, wynosi 1137 m³. Obniżający się poziom wód gruntowych i zmniejszona wydajność studni zmusza do wykorzystania wód opadowych.

Założono, że woda opadowa z planowanej instalacji będzie wykorzystywana do różnych celów na terenie Ośrodka Hodowli Zwierząt w RPN. Zaplanowano, że woda opadowa po uzdatnianiu przy pomocy procesu filtracji i dezynfekcji lampą UV, będzie wykorzystywana do pojenia koników polskich oraz splukiwania toalet (tego typu instalacja do uzdatniania wód opadowych była przetestowana przy dyrekcji RPN w 2023 r.). Założono również, że woda opadowa bez uzdatniania będzie stosowana do celów przeciwpożarowych, mycia samochodów i sprzętu rolniczego, a nadmiar wody będzie odprowadzany do dawnych stawów

z XIX w. – czyli do miejsca naturalnego rozrodu płazów. Zaplanowano również, że ścieki powstające podczas splukiwania toalet i mycia pojazdów, po odpowiednim podczyszczeniu w odtłuszczaczu, będą odprowadzane do istniejącej hybrydowej hydrofitowej oczyszczalni ścieków zlokalizowanej w sąsiedniej osadzie we Floriance, oddalonej o około 500 m od OHZ. Budowę oraz efektywność i niezawodność pracy tej oczyszczalni opisano w pracy Micek i in. [2020]. Zaplanowano również, że zintegrowana instalacja do wykorzystania wód opadowych będzie zasilana z odnawialnych źródeł energii – paneli fotowoltaicznych zamocowanych na dachu zabytkowej stodoły. Schematyczny model wykorzystania wód opadowych oraz schemat zrównoważonej instalacji ich gospodarowania w OHZ Florianka przedstawiono ryc. 9.



Ryc. 9. Schematyczny model wykorzystania wód opadowych w OHZ we Floriance – ideogram [Grabowski i in. 2023].



Ryc. 10. Schemat instalacji do gromadzenia i wykorzystania wód opadowych na terenie OHZ w RPN we Floriance [Grabowski i in. 2022a, Grabowski i in. 2022c]

Przy projektowaniu instalacji do wykorzystania wód opadowych kluczowe jest określenie możliwości pozyskania wód opadowych oraz zapotrzebowania na wodę. Do obliczenia zapotrzebowania na wodę w OHZ przyjęto normy zużycia wody zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [2002] oraz kwartalne zużycie wody z ujęcia głębinowego z lat 2018-2021. W tabeli 5 podano miesięczne zapotrzebowanie na wody opadowe w OHZ.

Tab. 5. Miesięczne zapotrzebowanie na wody opadowe w OHZ we Floriance na terenie RPN.

Sposób wykorzystania wód opadowych	Zapotrzebowanie na wody opadowe w różnych miesiącach roku [m ³]												Ogółem
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Zbiornik przeciwpożarowy	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	19,2
Toalety	3,0	3,0	3,0	3,0	6,0	6,0	6,0	6,0	3,0	3,0	3,0	3,0	48,0
Mycie pojazdów	0,91	0,91	2,77	4,02	3,67	2,42	2,42	2,42	3,07	3,07	1,21	0,91	27,8
Pojenie zwierząt	60,0	64,5	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	61,5	61,5	799,5
Razem:	65,51	70,01	76,37	77,62	80,27	79,02	79,02	79,02	76,67	76,67	67,31	67,01	894,5

Z zaprezentowanych danych wynika, że łącznie w ciągu roku zapotrzebowanie na wody opadowe w OHZ wynosi 894,5 m³. Największe zapotrzebowanie na wodę występuje w przypadku pojenia zwierząt – prawie 800 m³, co stanowi ponad 89% ogólnego zapotrzebowania. Z otrzymanych danych wynika, że największe zapotrzebowanie na wodę występuje w okresie wiosenno-letnim, czyli od maja do sierpnia, tj. w okresie kiedy występują największe sumy opadów atmosferycznych.

W celu określenia ilości wód opadowych spływających z dachów budynków Ośrodka Hodowli Zwierząt w RPN w poszczególnych miesiącach roku, wykonano szereg pomiarów i obliczeń [Grabowski i in. 2022a].

Z pomiarów terenowych i obliczeń wynika, że łączna powierzchnia obu dachów budynków gospodarczych w OHZ (A – obora i B – stodoła) (ryc. 10), z których będzie odprowadzana woda opadowa, wynosi 1191 m². W tym powierzchnia dachu budynku A wynosi 467 m², a budynku B – 724 m².

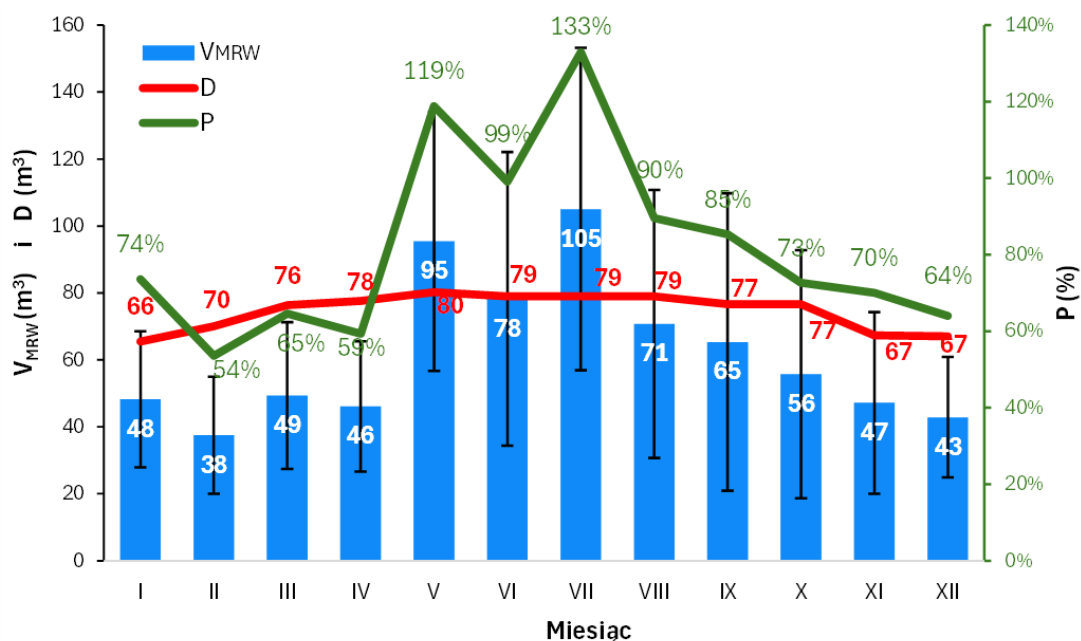
W celu obliczenia ilości wody opadowej spływającej z powierzchni dachów w OHZ we Floriance wykorzystano zmodyfikowany wzór nr (2), stosowany wcześniej przez Aladenola i Adeboye [2010], Adugna i in. [2018] oraz Villar-Navascués i in. [2020].

$$V_{RW} = (TRA \cdot AAR \cdot SRC) / 1000 \quad (2)$$

gdzie: V_{RW} – objętość wód opadowych spływających z powierzchni dachu w ciągu roku [m³]; TRA – łączna powierzchnia dachów A i B [m²] (ang. *total roof area*); AAR – średnia roczna suma opadów (ang. *average annual rainfall*) na terenie RPN w okresie wielolecia 2001-2021 – [686 mm]; SRC – współczynnik spływu powierzchniowego (ang. *surface runoff coefficient*) – wielkość bezwymiarowa (0,9) określona dla dachów gładkich z blachy na podstawie badań Farreny i in. [2011].

Obliczono, że sumaryczna ilość wody możliwej do zgromadzenia z dwóch dachów o łącznej powierzchni 1191 m², przy średnim rocznym opadzie na poziomie 686 mm, wynosi 735 m³/rok (w tym odpływ z dachu stodoły – 447 m³/rok, a odpływ z dachu stajni – 288 m³/rok).

Na rycinie 11 zaprezentowano ilość wód opadowych spływających z dachów na terenie OHZ we Floriance w różnych miesiącach roku, zapotrzebowanie na wodę opadową i potencjał zaspokojenia potrzeb na podstawie średnich sum opadów z wielolecia 2001-2020.



Ryc. 11. Ilość wód opadowych spływających z dachów na terenie OHZ we Floriancie w różnych miesiącach roku (V_{MRW}), zapotrzebowanie na wodę opadową (D) i potencjał zaspokojenia potrzeb (P) na podstawie średnich sum opadów z wielolecia 2001-2020 [Grabowski i in. 2022b].

Z ryciny 11 wynika, że największe ilości wód opadowych występują w okresie wiosenno-letnim (od maja do sierpnia), czyli wtedy kiedy zapotrzebowanie na wodę w OHZ jest największe. W okresie tym wody opadowe w 100% pokrywają zapotrzebowanie na wodę do różnych, wcześniej wspomnianych celów. W pozostałych miesiącach wody opadowe pokrywają od 54 do 90% zapotrzebowania na wodę na terenie OHZ we Floriancie.

Biorąc po uwagę zapotrzebowanie na wodę na terenie OHZ we Floriancie oraz miesięczne ilości wód opadowych spływających z dachów założono, że w planowanym systemie zagospodarowania wód opadowych należy zainstalować zbiornik betonowy o pojemności czynnej 75 m³ [Grabowski i in. 2022b].

Poniżej przedstawiono zapotrzebowanie na wodę ze względu na celowość jej przeznaczenia:

- **cel przeciwpożarowy** – wydajność badanego hydrantu zewnętrznego wynosi 7,70 dm³/s. W celu zabezpieczenia przeciwpożarowego należy utrzymać stałą pojemność wody w planowanym zbiorniku na poziomie minimum 50 m³.
- **cel zapotrzebowania na wodę do pojenia zwierząt** – zapotrzebowanie na wodę do pojenia koników polskich w OHZ we Floriancie, określono na podstawie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 roku, w sprawie określenia przeciętnych

norm zużycia wody – tabela 4, biorąc pod uwagę średnią obsadę zwierząt w każdym miesiącu roku. Obliczono, że zapotrzebowanie na wodę do pojenia koników polskich wyniesie 60-69 m³ miesięcznie, a rocznie 799,5 m³.

- **cel zapotrzebowania na wodę do mycia pojazdów i maszyn** – planuje się, że wody opadowe mogą być również wykorzystane do mycia pojazdów i maszyn rolniczych będących na stanie OHZ we Floriance. W ramach inwestycji przewiduje się wykonanie stanowiska do mycia urządzeń mechanicznych. Natomiast wszystkie wody użytkowe będą odprowadzane do odtłuszczacza, a następnie kierowane do istniejącego lokalnego systemu kanalizacji odprowadzającego ścieki do oczyszczalni hydrofitowej. Zapotrzebowanie na wodę do mycia pojazdów i maszyn w OHZ we Floriance określono na podstawie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 roku w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody – tabela 5. Na podstawie obliczeń własnych określono, że średnie miesięczne zużycie wody do mycia pojazdów i maszyn rolniczych na terenie OHZ wyniesie od 0,91 do 4,02 m³, natomiast roczne zapotrzebowanie na wodę do mycia pojazdów wyniesie 27,8 m³.
- **cel wykorzystania wód opadowych do spłukiwania toalet** – planuje się, że wody opadowe mogą być również wykorzystane na spłukiwanie toalet używanych przez turystów i pracowników OHZ. Zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet określono na podstawie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 roku w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody. Biorąc pod uwagę ruch turystyczny i stan zatrudnienia w OHZ określono, że miesięczne zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet wyniesie od 3,0 do 6,0 m³, a rocznie 48 m³.
- **cel zasilania stawów będących miejscem rozrodu płazów** – w ramach planowanej instalacji przewiduje się, że nadmiar wód opadowych będzie odprowadzany do pobliskich XIX-wiecznych stawów, które są naturalnym miejscem rozrodu płazów.

6.2. Wyniki badań jakościowych wód w zlewni strumienia Świerszcz

Tło dla badań jakościowych wód na terenie RPN, prowadzonych w latach 2021-2022, stanowią analizy ilościowe wód w zlewni strumienia Świerszcz oraz analizy warunków termicznych, opadowych i hydrologicznych przedstawione w opracowaniach: Grabowskiego i in. [2022b], Grabowskiego i in. [2023] oraz w Raportach SB ZMŚP [Raport 2021]. Z zaprezentowanych danych wynika, że warunki termiczno-opadowe mają znaczny wpływ na wahania zwierciadła wód podziemnych i przepływy wody w strumieniu Świerszcz na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego. Zaobserwowano nieznacznie opóźnioną reakcję

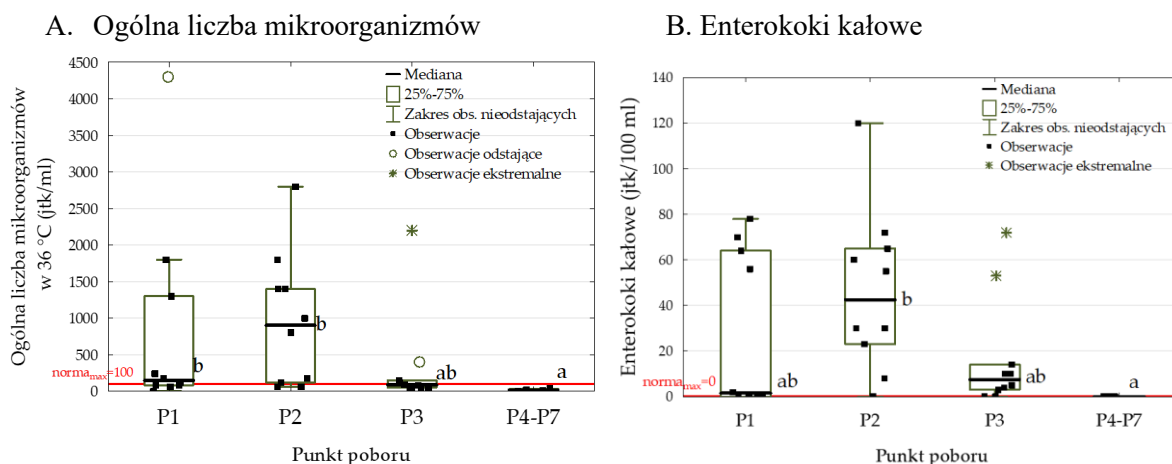
zwierciadła wód podziemnych na wysokie sumy opadów atmosferycznych w miesiącach letnich 2021 roku. Można również stwierdzić, że równomierne opady atmosferyczne w ciągu całego 2022 roku miały wpływ na mniejsze wahania zwierciadła wód podziemnych i przepływu wody w strumieniu Świerszcz. Dzięki stosunkowo wysokim opadom atmosferycznym w latach 2021-2022, na terenie RPN nastąpiło odbudowanie się zwierciadła wód poziomu kredowego.

W tabelach 6 – 8 przedstawiono statystyki opisowe wybranych badanych parametrów mikrobiologicznych, fizycznych i chemicznych wód opadowych w odniesieniu do wód płynących i podziemnych w zlewni strumienia Świerszcz. Natomiast na wykresach pudełkowych nr 12-14 zaprezentowano wahania stężeń badanych parametrów w analizowanych wodach.

Wody opadowe mają dużą zmienność cech jakościowych w czasie i w przestrzeni. Stwierdzono istotne statystycznie różnice w rozkładach ogólnej liczby mikroorganizmów w temperaturze 36 °C (Kruskal-Wallis $H=12,38$; $p=0,006$) pomiędzy różnymi rodzajami wód. W wodach opadowych pobranych w punktach P1 i P2 występowało znacząco więcej bakterii, niż w wodach pobranych ze studni głębinowych, ale nie stwierdzono istotnych różnic w stosunku do wód płynących P3 (ryc. 12A). Wody opadowe były zgodne z normą dla wody pitnej w 40% i 20% liczby pomiarów, odpowiednio w punkcie pomiarowym P1 i P2. Średnie wartości ogólnej liczby mikroorganizmów w temperaturze 36°C w wodach opadowych (P1 i P2) były ponad 8 razy większe niż wartość dopuszczalna określona w wodzie do picia (tabela 6). Było to prawdopodobnie spowodowane przez zanieczyszczenie wód opadowych odchodami ptaków występującymi na powierzchni dachów, z których spływają wody opadowe. Znacznie mniejszą średnią wartość ogólnej liczby mikroorganizmów w temperaturze 36°C stwierdzono w wodzie strumienia Świerszcz, która jednak również była ponad 3 razy większa niż wartość dopuszczalna określona w wodzie do picia i w 40% przypadków nie była zgodna z normami wody pitnej (tabela 6). W przypadku wód opadowych pobieranych w punkcie P1 oraz wód ze strumienia Świerszcz (P3) stwierdzono skrajnie dużą zmienność ogólnej liczby mikroorganizmów w temperaturze 36°C (tabela 6). Tylko w wodach głębinowych (P4-P7) nie stwierdzono przekroczenia normy określonej dla jakości wody do picia. Jednak niewielkie liczebności mikroorganizmów w temperaturze 36°C stwierdzono w wodach głębinowych (tabela 6). Porównanie liczby mikroorganizmów i enterokoków kałowych w poszczególnych punktach pomiarowych przedstawia ryc.12.

Tabela 6. Statystyki opisowe badanych parametrów mikrobiologicznych wód opadowych w odniesieniu do wód płynących i podziemnych oraz zgodność z normami wody pitnej. Punkty pomiarowe: P1 – wody opadowe, Zwierzyniec, P2 – wody opadowe, Florianka, P3 – wody powierzchniowe, strumień Świerszcz, P4-7 wody podziemne, studnie, N – ilość pomiarów, * Rozporządzenie Ministra Zdrowia [2017].

Punkty	Liczba N	Średnia	Mediana	Min	Max	Odch. stan..	Współ. zmienn.	Wartość opisowa	Zgodność z normą* dla wody do picia (%)
Ogólna liczba mikroorganizmów w temperaturze 36 °C (jtk/ml)									
P1	10	816,7	150	0	4300	1369,2	167,6	skrajnie duża	40
P2	10	962,4	900	62	2800	908,7	94,4	duża	20
P3	10	325	86	50	2200	667,2	205,3	skrajnie duża	60
P4-P7	4	17,25	16	0	37	15,5	90,0	duża	100
Ogólna liczba mikroorganizmów w temperaturze 22 °C (jtk/ml)									
P1	10	1500	1700	170	2900	861,6	57,4	duża	-
P2	10	1490	1500	420	3500	919,0	61,7	duża	-
P3	10	1308	1350	150	2800	771,2	59,0	duża	-
P4-P7	4	67,5	77,5	30	85	26,0	38,5	przeciętna	-
Bakterie grupy coli (jtk/100 ml)									
P1	10	12,2	0	0	72	26,2	215,1	skrajnie duża	-
P2	10	45,7	60	0	72	31,8	69,7	duża	-
P3	10	58,4	57,5	21	90	19,1	32,8	przeciętna	-
P4-P7	4	0	0	0	0	0	0	mała	-
<i>Escherichia coli</i> (jtk/100 ml)									
P1	10	0,2	0	0	2	0,6	316,2	skrajnie duża	90
P2	10	13,5	0	0	70	23,6	174,6	skrajnie duża	60
P3	10	23,3	27	4	38	10,9	46,8	duża	0
P4-P7	4	0	0	0	0	0	0	mała	100
Enterokoki kałowe (jtk/100 ml)									
P1	10	27,1	1,5	0	78	34,8	128,3	bardzo duża	40
P2	10	46,3	42,5	0	120	35,6	76,8	duża	10
P3	10	17,1	7,5	0	72	24,8	144,8	bardzo duża	20
P4-P7	4	0	0	0	0	0	0	mała	100
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (jtk/100 ml)									
P1	10	9	1,5	0	35	13,2	146,7	bardzo duża	50
P2	10	8,8	0	0	35	14,1	160,2	skrajnie duża	60
P3	10	9,4	0	0	32	12,8	136,2	bardzo duża	60
P4-P7	4	0	0	0	0	0	0	mała	100



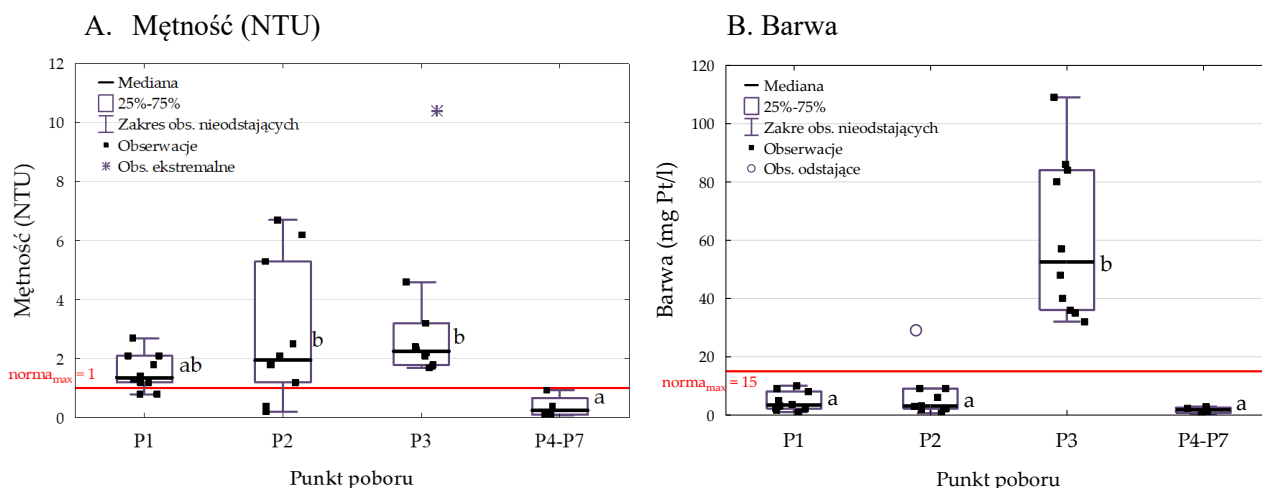
Ryc. 12. Przykładowe parametry mikrobiologiczne wód opadowych (P1-P2) w odniesieniu do wód płynących (P3) i podziemnych (P4-P7) oraz zgodności z normami dla wody pitnej.

W różnych rodzajach badanych wód stwierdzono istotne statystycznie różnice w rozkładach liczby enterokoków kałowych (Kruskal-Wallis $H=9,46$; $p=0,024$). W wodach opadowych pobieranych w punkcie P2 stwierdzono istotnie większe liczby tych bakterii niż w wodach pobranych ze studni głębinowych (P4-P7). Natomiast nie stwierdzono istotnych różnic liczby enterokoków kałowych w wodach pobranych w punktach P1 i P3 (ryc. 12B). W punktach P1 i P2 stwierdzono odpowiednio 40% i 10% zgodność liczby enterokoków kałowych z normą dla wody do picia z Rozporządzenia Ministra Zdrowia [2017]. Tylko w wodach głębinowych (P4-P7) nie stwierdzono przekroczenia normy określonej dla enterokoków kałowych w wodzie do picia. W przypadku wyników analiz jakości wody strumienia Świerszcz tylko 20% przypadków dało wynik zgodny z obowiązującą normą. Z obserwacji przeprowadzonych przez autora rozprawy wynika, że na kalenicach dachów przy Dyrekcji RPN często przesiadują sierpówki *Streptopelia decaocto*, we Floriance zaś obserwuje się licznie występujące jaskółki *Hirundo rustica*. W rynnach zaś obserwowano gryzonie, ponieważ strych stajni służy jako magazyn siana. Jest to prawdopodobnie powód nieco większej ilości mikroorganizmów i enterokoków kałowych w wodach opadowych we Floriance.

W tabeli 7 przedstawiono statystyki opisowe wybranych parametrów fizycznych wód opadowych w odniesieniu do wód płynących i podziemnych.

Tabela 7. Statystyki opisowe badanych parametrów fizycznych wód opadowych w odniesieniu do wód płynących i podziemnych oraz zgodność z normami dla wody pitnej. Punkty pomiarowe: P1 – wody opadowe, Zwierzyniec, P2 – wody opadowe, Florianka, P3 – wody powierzchniowe, strumień Świerszcz, P4-7 wody podziemne, studnie, N - ilość pomiarów, * Rozporządzenie Ministra Zdrowia [2017].

Punkt y	Ilość N	Średnia	Mediana	Min	Max	Odch. stan..	Współ. zmienn.	Wartość opisowa	Zgodność z normą* dla wody do picia (%)
Mętność (NTU)									
P1	10	1,54	1,36	0,8	2,7	0,62	40,1	duża	20
P2	10	2,82	1,95	0,2	6,7	2,37	84,1	duża	20
P3	10	3,24	2,25	1,7	10,4	2,66	82,0	duża	0
P4-P7	4	0,38	0,25	0,08	0,93	0,39	103,1	bardzo duża	100
Barwa (mg/l Pt)									
P1	10	4,59	3,40	0,97	10	3,27	71,3	duża	100
P2	10	6,58	3,04	0,59	29	8,42	127,9	bardzo duża	90
P3	10	60,7	52,5	32	109	27,05	44,6	duża	0
P4-P7	4	1,60	1,74	0,1	2,83	1,19	74,4	duża	100
Przewodność elektryczna właściwa w temperaturze 25°C (µS/cm)									
P1	10	40,256	30,85	16,21	84,64	22,85	56,8	duża	100
P2	10	16,60	13,43	6,92	37,32	10,08	60,7	duża	100
P3	10	238,3	246,5	186	272	27,62	11,6	mała	100
P4-P7	4	384,5	392,5	310	443	59,17	15,4	mała	100



Ryc. 13. Przykładowe parametry fizyczne wód opadowych (P1-P2) w odniesieniu do wód płynących (P3) i podziemnych (P4-P7) oraz zgodności z normami dla wody pitnej.

Mętność cechują istotne statystycznie różnice w badanych grupach wód (Kruskal-Wallis $H=12,60$; $p=0,006$). Nie stwierdzono istotnych różnic wartości mętności między wodami opadowymi w punktach P1 i P2. W wodach opadowych pobieranych w punkcie P2 oraz w wodach strumienia Świerszcz – P3 mętność była istotnie wyższa, niż w wodach ze studni głębinowych. Natomiast nie stwierdzono różnic wartości mętności między wodami

opadowymi pobieranym w punkcie P1, a wodą ze studni głębinowych (P4-P7) (ryc. 13A). Jedynie w przypadku wód ze studni głębinowych nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnej normy określonej dla wody pitnej. W przypadku pozostałych badanych wód (opadowych i powierzchniowych) wartości mętności nieznacznie przekraczały dopuszczalną wartość dla wody do picia. Spełnienie norm wody pitnej dla wód opadowych wyniosło 20%, zarówno dla prób z punktów P1, jak i P2.

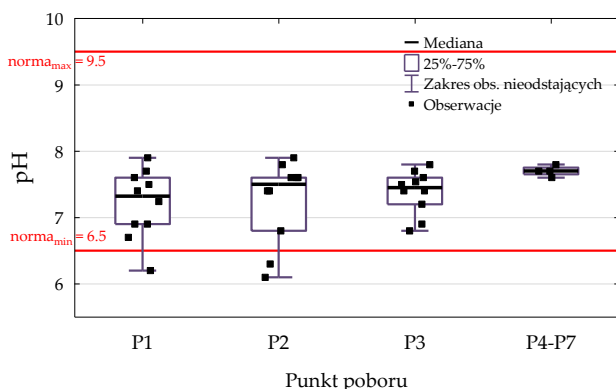
Nie stwierdzono istotnych różnic w barwie wód opadowych pobieranych w punktach P1 i P2 oraz w przypadku wody ze studni głębinowych (P4-P7). Natomiast w wodzie strumienia Świerszcz barwa była istotnie wyższa (Kruskal-Wallis $H=22,19$; $p<0,001$) (ryc. 13B) i znacznie przekraczała wartość dopuszczalną określoną dla wody do picia. Barwa wody w strumieniu Świerszcz wynika z rozpuszczania rud darniowych i kwasów humusowych. Barwa wód opadowych (P1 i P2) oraz wód ze studni głębinowych (P4-P7) spełniała wymagania zalecane dla wody do picia. Tylko raz w punkcie P2 stwierdzono przekroczenie normy określonej dla barwy w przypadku wody pitnej (ryc. 13B). Zgodność z normami wody pitnej dla wód opadowych wyniosła 100% i 90% odpowiednio dla P1 i P2.

W tabeli 8 przedstawiono statystyki opisowe wybranych parametrów chemicznych wód opadowych w odniesieniu do wód płynących i podziemnych.

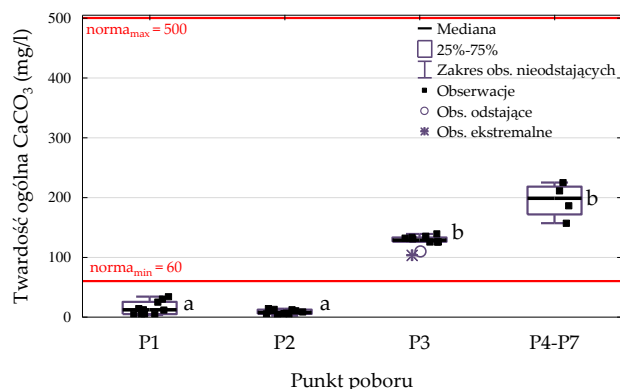
Tabela 8. Statystyki opisowe badanych parametrów chemicznych wód opadowych w odniesieniu do wód płynących i podziemnych oraz zgodność z normami dla wody pitnej. Punkty pomiarowe: P1 – wody opadowe, Zwierzyniec, P2 – wody opadowe, Florianka, P3 – wody powierzchniowe, strumień Świerszcz, P4-7 wody podziemne, studnie, N - ilość pomiarów, *Rozporządzenie Ministra Zdrowia [2017].

Punkty	Ilość N	Średnia	Mediana	Min	Max	Odch. stan..	Współ. zmienn.	Wartość opisowa	Zgodność z normą* dla wody do picia (%)
pH *									
P1	10	6,90	7,32	6,2	7,9	0,50	7,25	mała	90
P2	10	6,79	7,50	6,1	7,9	0,60	8,84	mała	80
P3	10	7,26	7,45	6,8	7,8	0,31	4,27	mała	100
P4-P7	4	7,69	7,70	7,6	7,8	0,08	1,041	mała	100
Jon amonowy (mg/l)									
P1	10	0,098	0,05	0,003	0,42	0,13	129,9	bardzo duża	100
P2	10	0,940	0,80	0,06	3,72	1,08	114,6	bardzo duża	40
P3	10	0,146	0,15	0,049	0,36	0,10	66,9	duża	100
P4-P7	4	0,011	0,01	0,008	0,012	0,00	17,6	mała	100
Azotany (mg/l)									
P1	10	2,31	2,37	0,73	3,72	1,14	49,3	duża	100
P2	10	1,68	1,53	0,14	4,25	1,31	78,0	duża	100
P3	10	1,10	0,975	0,37	2,4	0,53	48,4	duża	100
P4-P7	4	6,97	6,49	1,59	13,3	4,82	69,1	duża	100
Azotyny (mg/l)									
P1	10	0,010	0,003	0,0002	0,056	0,02	171,1	skrajnie duża	100
P2	10	0,151	0,024	0,0023	1,34	0,42	276,2	skrajnie duża	90
P3	10	0,019	0,018	0,0038	0,062	0,02	87,8	duża	100
P4-P7	4	0,00045	0,00045	0,0002	0,0007	0,00	64,2	duża	100
Stężenie manganu (mg/l)									
P1	10	0,005	0,004	0,0002	0,011	0,00	81,2	duża	100
P2	10	0,021	0,010	0,001	0,084	0,03	131,5	bardzo duża	80
P3	10	0,101	0,088	0,0113	0,21	0,06	61,5	duża	20
P4-P7	4	0,012	0,01	0,006	0,022	0,01	58,1	duża	100
Całkowite stężenie żelaza (mg/l)									
P1	10	0,0358	0,031	0,013	0,066	0,02	54,5	duża	100
P2	10	0,0955	0,021	0,003	0,670	0,21	215,1	skrajnie duża	90
P3	10	0,599	0,541	0,299	0,969	0,24	40,4	duża	0
P4-P7	4	0,0325	0,033	0,003	0,062	0,03	99,6	duża	100
Chlorki (mg/l)									
P1	10	1,020	1,025	0,134	2,18	0,58	56,757	duża	100
P2	10	1,339	0,73	0,13	3,06	116	86,643	duża	100
P3	10	1,684	1,75	0,201	3,11	1,06	63,205	duża	100
P4-P7	4	3,93	3,285	3,15	6	1,38	35,18	przeciętna	100
Twardość ogólna CaCO ₃ (mg/l)									
P1	10	14,59	12,1	3,37	34	11,35	77,792	duża	0
P2	10	8,16	7,595	2,3	14	4,14	50,675	duża	0
P3	10	126,1	128,5	103	139	11,28	8,944	mała	100
P4-P7	4	194,75	198,5	157	225	29,89	1535	mała	100

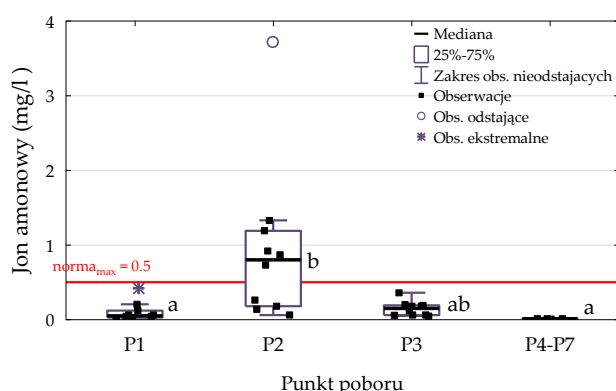
A. Odczyn wody pH



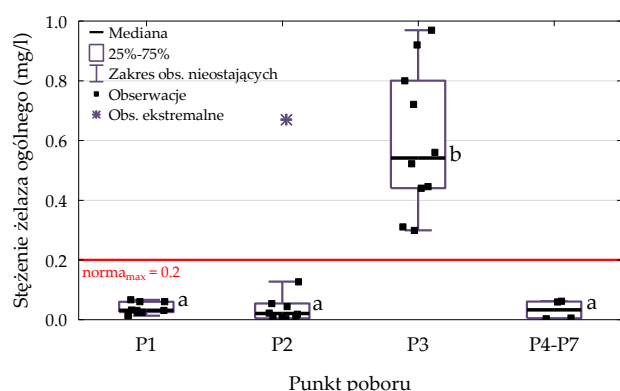
B. Twardość ogólna CaCO₃



C. Jon amonowy



D. Stężenie żelaza ogólnego (Fe)



Ryc. 14. Przykładowe parametry chemiczne wód opadowych (P1-P2) w odniesieniu do wód płynących (P3) i podziemnych (P4-P7) oraz zgodności z normami dla wody pitnej.

Nie stwierdzono istotnych różnic w rozkładach wartości pH wody (Kruskal-Wallis $H=4,59$; $p=0,204$) między badanymi punktami pomiarowymi (ryc. 14A). W większości przypadków wody opadowe, podobnie jak wody ze strumienia Świerszcz i ze studni głębinowych, pod względem wartości pH spełniały wymagania stawiane wodzie do picia. Jednakże w wodach opadowych (pobieranych z punktów P1 i P2) kilkakrotnie stwierdzono obniżone wartości odczynu poniżej 6,5. Miało to miejsce w sierpniu i we wrześniu 2022 r., kiedy notowano stosunkowo niewielkie opady atmosferyczne, które prawdopodobnie mogły mieć charakter tzw. „kwaśnych deszczy”. Zgodność z normami wody pitnej dla wód opadowych wyniosła odpowiednio 90% i 80% dla P1 i P2.

W ramach badań stwierdzono istotne różnice zawartości jonu amonowego w badanych wodach (Kruskal-Wallis $H=18,05$; $p<0,001$). Istotnie wyższe różnice zawartości jonu amonowego odnotowano w punkcie P2, niż w punkcie P1, czy w wodzie strumienia Świerszcz (P3) oraz w wodach głębinowych (P4-P7). Tylko w wodach opadowych pobieranych w punkcie P2 stwierdzano przekroczenia dopuszczalnej wartości określonej w wodzie do picia dla jonu amonowego na poziomie 0,5 mg/l (ryc. 14C). Zgodność

z normami wody pitnej dla wód deszczowych wyniosła 100% i 40% odpowiednio dla P1 i P2. Podwyższone zawartości jonu amonowego w próbach wody pobieranych w punkcie P2, podobnie jak w przypadku ogólnej liczby mikroorganizmów w temperaturze 36°C, mogą być spowodowane przez zanieczyszczenie wód opadowych odchodami ptaków występującymi na powierzchni dachów, z których spływają wody opadowe. Dachy, z których pobierano wody opadowe w punkcie P2, są zlokalizowane na terenie Ośrodka Hodowli Zwierząt centrum Roztoczańskiego Parku Narodowego, dlatego też liczba ptaków występujących w tym miejscu może być większa, niż w centrum Zwierzyńca, gdzie zlokalizowany jest punkt P1.

Na podstawie wykonanych badań, stwierdzono istotne różnice w przypadku wartości twardości ogólnej w analizowanych punktach poboru prób wody (Kruskal-Wallis $H=25,72$, $p<0,001$). W wodach opadowych pobieranych z punktów P1 i P2 stwierdzono wartości twardości ogólnej niższe od minimalnej normy (120 mg/l) określonej dla wody do picia (ryc. 14B). Spełnienie norm wody pitnej dla wód opadowych wyniosło 0%, zarówno dla P1 jak i P2. Uzyskane pomiary wskazują, że wody opadowe można zakwalifikować do I klasy czystości wg klasyfikacji określonej dla wód powierzchniowych. Uzyskane wyniki wskazują, że wody opadowe są bardzo miękkie i pozbawione związków wapnia, przez co raczej nie powinny być zalecane do picia w dużych ilościach. Istotnie wyższe wartości twardości ogólnej odnotowano dla wód ze strumienia Świerszcz (P3) oraz dla wód ze studni głębinowych (P4-P7). Wyniki te potwierdzają, że są to wody pochodzące z górnokredowego poziomu wodonośnego.

Istotne różnice stwierdzono również w przypadku zawartości żelaza ogólnego w badanych rodzajach wód (Kruskal-Wallis $H=18,90$, $p<0,001$). W przypadku żelaza podobnie, jak w przypadku manganu, najwyższe jego wartości notowano w wodach strumienia Świerszcz – punkt P3 (ryc. 14D). W punkcie tym dopuszczalna norma określona dla wody pitnej, w przypadku żelaza na poziomie 0,2 mg/l, była przekroczona przez cały okres badań. Natomiast w wodach opadowych w punkcie P2 jeden raz odnotowano przekroczenie dopuszczalnej normy. Zgodność z normami wody do picia dla wód deszczowych dla punktów P1 i P2 wyniosła odpowiednio 100 i 90%.

Uzyskane wyniki potwierdzają dużą zmienność parametrów wód opadowych w czasie i przestrzeni. Badania wskazują na korzystny skład organoleptyczny, fizykochemiczny i mikrobiologiczny wód opadowych. Czystość wód opadowych czasami odpowiadała normom wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi i była zbliżona do jakości wód podziemnych, a nawet lepsza niż w przypadku wód powierzchniowych pobieranych ze strumienia Świerszcz.

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że w przypadku planowanego wykorzystania wód opadowych do picia dla konika polskiego konieczne będzie poddanie ich procesom filtracji i dezynfekcji (np. lampą UV).

Wcześniejsze badania innych autorów wykazały, że wody opadowe charakteryzują się zazwyczaj dość dobrą jakością [Sazakli i in. 2007; Skwarzyńska i in. 2014; Struk-Sokołowska 2020]. Tylko niektóre parametry w wodach opadowych przekraczają normy określone dla wody przeznaczonej do picia przez ludzi [Skwarzyńska i in. 2014]. Również wcześniejsze badania Józwiakowskiego i in. [2016], dotyczące jakości wód opadowych odpływających z dwóch dachów budynków gospodarczych przy Dyrekcji Roztoczańskiego Parku Narodowego wykazały, że charakteryzują się one dosyć dobrą jakością. W badanych wodach stwierdzono podwyższoną zawartość amoniaku oraz bakterii z grupy coli, coli typu kałowego, a także bakterii mezo- i psychrofilnych, co było prawdopodobnie spowodowane zanieczyszczeniem powierzchni dachów odchodami ptaków. Natomiast słabo zasadowy odczyn wód może wskazywać na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego i powierzchni dachów pyłami z lokalnych palenisk oraz na wpływ zanieczyszczeń od zwierząt. Józwiakowski i in. [2016] wskazali, że pod względem wskaźników mikrobiologicznych i niektórych wskaźników chemicznych, badane wody opadowe nie nadają się do picia oraz do celów higienicznych, ale mogą być z powodzeniem wykorzystywane do mycia pojazdów, podlewania terenów zielonych, czy spłukiwania toalet.

Dzięki zastosowaniu instalacji do zagospodarowania wód opadowych, która powstała przy dyrekcji RPN w 2014 roku, osiągnięto efekt ekologiczny, gdyż ograniczono zużycie wysokiej jakości wód podziemnych z roztoczańskiego poziomu wodonośnego na obszarze prawnie chronionym. Jednocześnie instalacja przyczynia się do poprawy wizerunku RPN jako jednostki proekologicznej, wdrażającej nowoczesne rozwiązania technologiczne, służące ochronie i zachowaniu najcenniejszych walorów środowiska przyrodniczego [Józwiakowski i in. 2016].

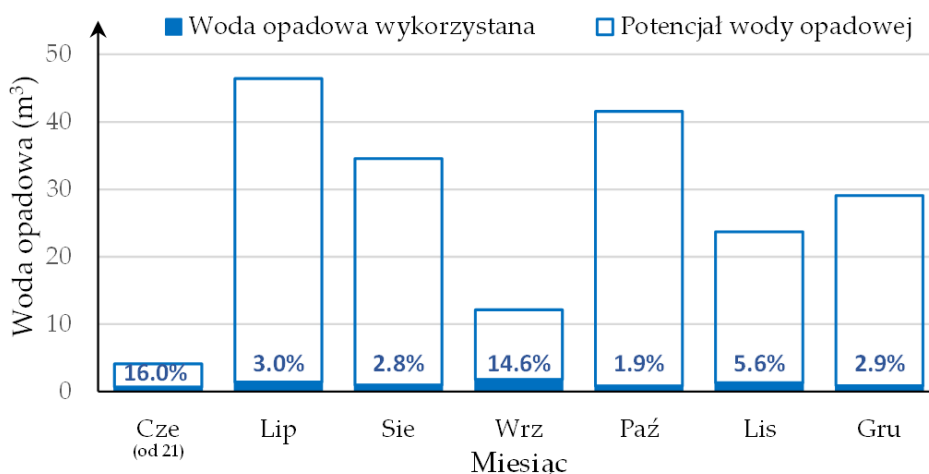
6.3. Efekty oczyszczania wód opadowych w testowej instalacji przy Dyrekcji RPN

Badania skuteczności działania testowej instalacji do oczyszczania wód opadowych przy Dyrekcji RPN prowadzono od czerwca do grudnia 2023 r. Wyniki z tych badań przedstawiono w pracy Grabowskiego i in. [2023] – publikacja nr 3.

W celu określenia ilości wód opadowych możliwych do zagospodarowania w obiektach przy Dyrekcji RPN wykorzystano dane ze stacji meteorologicznej przy Ośrodku Edukacyjno-

Muzealnym RPN (około 300 m od obiektu badań). Aby określić ilość wody opadowej, spływającej z dachów dwóch budynków gospodarczych (ryc. 4, 5) do zbiorników betonowych, zastosowano wzór 2. Wzór ten pozwala na określenie ilości wody opadowej spływającej z dachu z uwzględnieniem wysokości rocznych opadów, powierzchni dachów (487 m²) oraz współczynnika spływu powierzchniowego = 0,9. W okresie prowadzonych badań suma opadów atmosferycznych wyniosła 437 mm, co daje objętość wody opadowej możliwą do wykorzystania na poziomie 191,5 m³. Jednocześnie odczyty z wodomierzy pokazały, że sumaryczne zużycie wody na poszczególne cele wynosi 7,76 m³, co stanowi 4% ilości wody mogącej dopłynąć do zbiorników. Widać, że istnieje możliwość wykorzystania nadwyżki gromadzonych wód opadowych na inne cele.

Na rycinie 15 przedstawiono oszacowane ilości wody spływającej do zbiorników w różnych miesiącach w okresie badań, a także ilość wody wykorzystanej do mycia samochodów i podlewania trawników. Największe ilości wody spływającej z dachów do zbiorników odnotowano w lipcu (46,42 m³) i październiku (41,55 m³), natomiast najmniejszą w czerwcu (niepełny miesiąc 4,12 m³) i we wrześniu (12,14 m³).

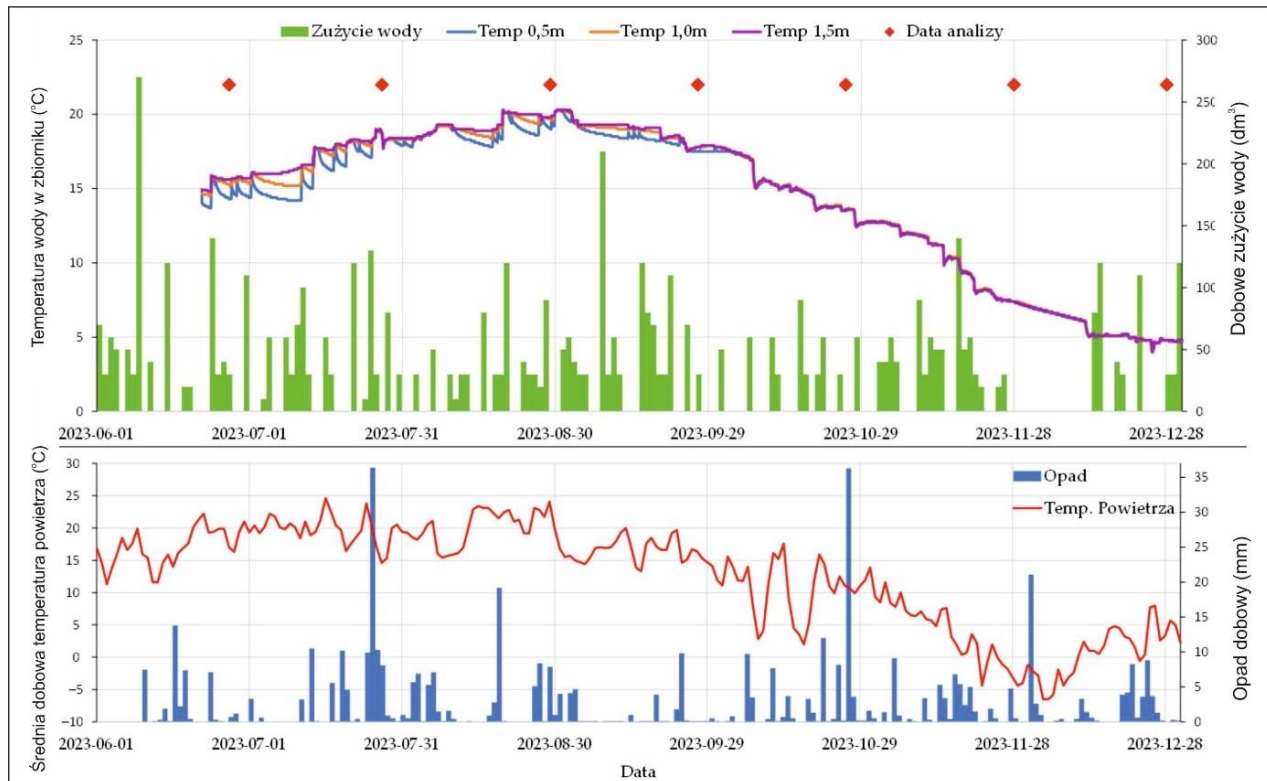


Ryc. 15. Ilość wód opadowych możliwych do wykorzystania w analizowanym 2023 roku.

6.3.1. Zmiany temperatury wód opadowych w zbiorniku

W ramach badań skuteczności oczyszczania wody jednocześnie analizowano warunki termiczne wody w betonowym zbiorniku. W celu przedstawienia zmian temperatury wody w zbiorniku na różnych głębokościach, licząc od dna zbiornika (0,5; 1; 1,5 m), przeanalizowano także średnie dobowe temperatury powietrza zewnętrznego, dobowe sumy opadów atmosferycznych oraz zużycie wód opadowych gromadzonych w zbiorniku. Na rycinie 16 czerwonymi punktami zaznaczono również terminy, w których wykonano analizy

laboratoryjne parametrów jakościowych wody w zbiorniku i po jej uzdatnianiu w testowanej instalacji.



Ryc. 16. Zmiany temperatury wód opadowych w zbiorniku w okresie badań w odniesieniu do temperatury powietrza zewnętrznego, wielkości opadów i zużycia wody [Grabowski i in. 2024].

Uzyskane wartości temperatury wody na różnych głębokościach zbiornika wykazują wzajemnie silną korelację. Współczynnik korelacji r Pearsona wyniósł od 0,989 (między poziomem 0,5 m i 1,5 m) do 0,0998 (między poziomami 0,5 m i 1 m). Największe różnice temperatury wody na poszczególnych głębokościach występowały w miesiącach ciepłych (czerwiec-wrzesień), gdzie najniższą temperaturę uzyskano dla poziomu znajdującego się blisko dna zbiornika, a najwyższą na poziomie 1 m. Największą różnicę temperatur wody na tych poziomach odnotowano 10 lipca 2023 r. i wyniosła ona $4,2^{\circ}\text{C}$, kiedy poziom lustra wody w zbiorniku – po dłuższym okresie mniejszych opadów – był najniższy i bliski 1,5 m.

W miesiącach chłodniejszych (od połowy września) temperatura wody na termometrach zanurzonych na różnych poziomach była bardzo podobna i różnica mieściła się w granicach $0,5^{\circ}\text{C}$. Temperatura wody w zbiorniku była też skorelowana z zewnętrzną temperaturą powietrza. Współczynnik korelacji wyniósł od 0,84 (dla poziomu 0,5 m) do 0,88 (dla poziomu 1,5 m). Z wykresu (ryc. 16) widać jednak, że temperatura wody zmienia się

z opóźnieniem czasowym w stosunku do temperatury powietrza (ok. 1 miesiąca). Dokładniejsze wyznaczenie czasu opóźnienia wymaga jednak dłuższego okresu badań.

Na wykresie temperatur wody można zaobserwować również piki skorelowane z opadami atmosferycznymi. W miesiącach ciepłych (czerwiec-sierpień) od chwili rozpoczęcia badań obserwowano stopniowy wzrost temperatury, wynikający z napływu ciepłej wody opadowej z dachów. Najwyższe przyrosty temperatury wody na poziomie 0,5 m od dna zbiornika odnotowano 20 lipca (o 1,52°C), 25 lipca (o 1,34°C) i 11 lipca (o 1,24°C). Po większych opadach temperatura wody w zbiorniku na wszystkich poziomach wyrównywała się, a następnie przy braku opadów w niższej położonych partiach zbiornika stopniowo spadała (najbardziej przy dnie zbiornika), natomiast dla najwyższego punktu pomiarowego (1,5 m) pozostawała na podobnym poziomie.

W miesiącach chłodnych (wrzesień-grudzień), w przypadku wystąpienia opadów atmosferycznych, napływ dodatkowej wody opadowej do zbiornika powodował już obniżenie temperatury wody w zbiorniku. Na poziomie 0,5 metra od dna zbiornika największy spadek temperatury wody odnotowano 8 października (o 1,62°C), 20 listopada (o 0,93°C) i 14 listopada (o 0,9°C).

Jak wykazano, zastosowanie zbiornika betonowego zagłębionego w ziemi korzystnie wpływa na stabilizację temperatury wody, co nie dopuszcza do niekontrolowanych przemian chemicznych i biologicznych. Zbiorniki o dużej pojemności wpływają korzystnie na uśrednianie temperatury wody w skrajnie niekorzystnych warunkach – np. w przypadku spływu wód z gorących dachów po długotrwałych suszach, czy po gwałtownych opadach deszczu oraz przy spływie wody z topnienia śniegu. Dodatkowo panujące w zbiorniku ciemności uniemożliwiają rozwój glonów i różnych mikroorganizmów, które mogłyby przy niekontrolowanym wzroście utrudniać działanie zestawu filtracyjnego stosowanego do uzdatniania wody. Jak podkreśla M. Zdeb [2017] wody deszczowe ulegają samooczyszczeniu w czasie magazynowania w zamkniętych zbiornikach, jednak w stopniu niezapewniającym bezpieczeństwa w użytkowaniu dla celów spożywczych i higienicznych. Jest to zapewne związane z tym, że wody spływające z powierzchni dachów mogą zawierać ptasie odchody, o czym wspomniano już wcześniej w innych pracach [Jóźwiakowski i in. 2016; Zdeb i in. 2021; Grabowski i in. 2023; Hamilton i in. 2019; Hamilton i in. 2018]. Niezależnie od tego wody, opadowe zawierają związki występujące w stanie stałym, ciekłym lub gazowym, wymywane z atmosfery i odkładające się na podłożu. Wielkość i skład opadu suchego dla zlewni strumienia Świerszcza opisano w Raportach Stacji Bazowej ZMŚP Roztocze [Raport 2021].

6.3.2. Skuteczność oczyszczania wód opadowych w instalacji testowej

W tabeli 9 podano podstawowe statystyki opisowe (wartość minimalną, medianę, średnią, maksymalną i odchylenie standardowe) wartości wybranych parametrów organoleptycznych, fizycznych i chemicznych zmierzonych w badanych wodach opadowych przed i po oczyszczaniu w badanej instalacji testowej. W tabeli nie uwzględniono parametrów, które były również analizowane, ale ich wyniki były poniżej progu oznaczalności pomiarowej. W ostatniej kolumnie przedstawiono wyniki nieparametrycznego testu Wilcoxona dla prób zależnych, wskazujące czy wystąpiły statystycznie różne wartości parametrów próbek wody pobranych ze zbiornika i po oczyszczaniu w badanej instalacji.

Ze względu na fakt, iż obiekt badawczy znajduje się na terenie prawnie chronionym, powietrze w otoczeniu jest bardzo czyste, co z kolei przekłada się na stosunkowo dobrą jakość wód opadowych. Stąd wyniki analizy wskaźników fizyko-chemicznych wskazują na bardzo niskie ich wartości, znacząco niższe od wymagań stawianych wodzie do picia. Przy tak niskich wartościach nieuchronne błędy analityczne generują czasem fluktuacje między wynikami przed urządzeniami oczyszczającymi i po nich. Tak niski poziom zanieczyszczeń może budzić też wątpliwość wprowadzenia do instalacji zestawu filtrów. Jednak było to konieczne ze względu na zanieczyszczenia bakteriologiczne. Do podniesienia skuteczności działania lampy UV konieczne jest podczyszczenie wody, a szczególnie obniżenie mętności.

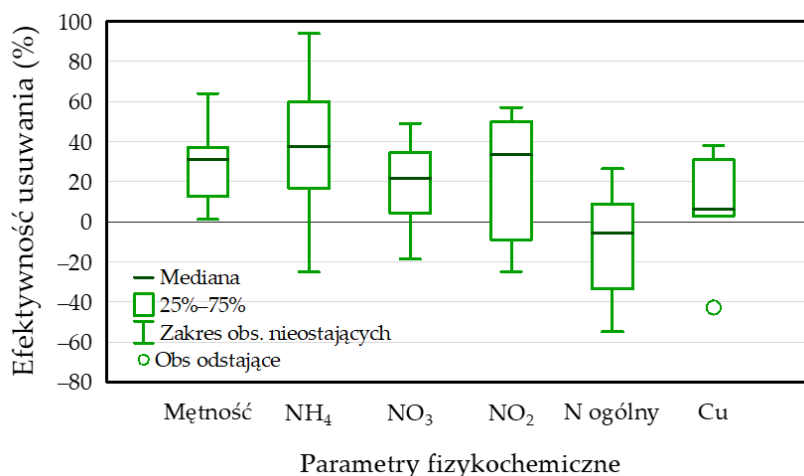
Skuteczność działania całego systemu uzdatniania wód opadowych została potwierdzona testem Wilcoxona (Tabela 9). Przy pomocy tego testu wykazano, że w przypadku najważniejszych wskaźników zanieczyszczeń (mętność, przewodnictwo, jon amonowy, azotany i cynk) odnotowane w wodzie wartości są istotnie różne statystycznie. Bardzo bliskie potwierdzenia były także takie wskaźniki, jak azotyny i twardość ogólna, które przy większej liczbie próbek prawdopodobnie byłyby istotne statystycznie.

Tab. 9. Podstawowe parametry fizykochemiczne i statystyki opisowe.

* istotne statystycznie różnice między wartościami parametrów dla wody przed oczyszczaniem (RW – ang. *raw water*) i po oczyszczaniu (TW – ang. *treated water*), SD – odchylenie standardowe

Parameter i jednostka	Próbka	min	mediana	średnia	max	SD	Wilcoxon z p-value
Mętność NTU	RW	0,93	1,35	1,71	3,2	0,88	z=2,37
	TW	0,59	0,98	1,14	2,2	0,51	p=0,018 *
Barwa mg Pt/dm ³	RW	0,4	1	1,96	5,0	1,80	z=0,913
	TW	0,4	1,3	2,4	5,0	1,86	p=0,361
pH	RW	6,3	6,8	-	7,8	-	z=0,524
	TW	6,5	6,8	-	7,5	-	p=0,600
Przewodność właściwa w temperaturze 25°C – μS/cm	RW	8,8	29,1	25,87	34	9,17	z=2,206
	TW	14	32,9	31,56	51	12,06	p=0,028 *
Jon amonowy mg/dm ³	RW	0,04	0,1	0,096	0,15	0,035	z=2,18
	TW	0,006	0,05	0,051	0,1	0,028	p=0,028 *
Azotany mg/dm ³	RW	0,24	1,98	1,78	3,23	1,21	z=2,031
	TW	0,21	1,38	1,31	2,53	0,841	p=0,043 *
Azotyny mg/dm ³	RW	0,007	0,011	0,011	0,023	0,0054	z=1,77
	TW	0,003	0,01	0,0088	0,015	0,0043	p=0,076
Magnez mg/dm ³	RW	0,001	0,003	0,0031	0,008	0,0023	z=1,48
	TW	0,001	0,005	0,0049	0,008	0,0030	p=0,138
Żelazo ogólne mg/dm ³	RW	0,0023	0,023	0,0232	0,046	0,0159	z=0,943
	TW	0,0014	0,018	0,0165	0,031	0,0103	p=0,345
Chlorki mg/dm ³	RW	0,98	1,21	2,199	4	1,416	z=1,05
	TW	0,82	2	1,977	3	1,029	p=0,295
Twardość ogólna mg/dm ³	RW	1,02	12	10,43	15	5,15	z=1,77
	TW	0,98	15	12,85	21	6,75	p=0,076
Azot ogólny mg/dm ³	RW	2,11	3,235	3,35	4,23	0,78	z=0,524
	TW	3,11	3,405	3,53	4,21	0,409	p=0,600
Fosfor ogólny mg/dm ³	RW	0,005	0,0245	0,0262	0,05	0,018	z=0,734
	TW	0,003	0,0315	0,0257	0,041	0,0149	p=0,463
Miedź mg/dm ³	RW	0,112	0,373	0,365	0,7	0,209	z=0,943
	TW	0,109	0,2795	0,359	1	0,322	p=0,345
Cynk mg/dm ³	RW	0,016	0,0585	0,054	0,079	0,021	z=2,20
	TW	0,022	0,068	0,064	0,085	0,022	p=0,028 *

Na rycinie 17 przedstawiono zmiany efektywności usuwania wybranych wskaźników fizycznych i chemicznych wód opadowych w analizowanej instalacji testowej.



Ryc. 17. Skuteczność usuwania wybranych parametrów fizycznych i chemicznych w analizowanej instalacji testowej

Wykazano, że mediana skuteczności usuwania zanieczyszczeń w analizowanym systemie oczyszczania wód opadowych nie była zbyt wysoka i dla amoniaku wynosiła 38,8%, dla mętności – 29,6%, dla NO₂ – 27,9%, dla NO₃ – 19,8%, a dla Cu – 6,9% (Ryc. 17). Niewielkie efekty usuwania podanych wskaźników zanieczyszczeń można tłumaczyć niskim stężeniami tych parametrów w wodzie opadowej ze zbiornika, o czym wspomniano już wcześniej. Podobne badania dotyczące efektywności oczyszczania wód opadowych, przy zastosowaniu różnych filtrów, wykonywali Teixeira and Ghisi [2019]. Autorzy Ci wykazali, że skuteczność filtra piaskowego w zakresie usuwania mętności, amoniaku i azotanów, wynosiła odpowiednio: 13, 34 i 10%. Natomiast w przypadku filtra membranowego wymienione wskaźniki były usuwane ze skutecznością na poziomie: 11,0, 32,1 i 13,6%. Inni autorzy [Cheng i in. 2023] również wykazali, że zastosowanie np. filtrów z keramzytem i węglem aktywnym nie zapewnia zbyt wysokiej skuteczności usuwania związków azotu.

Uzyskane wyniki badań własnych i dane z literatury wskazują, że systemy uzdatniania wód opadowych oparte na procesach filtracji, powinny stanowić fazę przygotowania wody do dalszego ich uzdatniania w procesie dezynfekcji, który powinien zapewniać skuteczną eliminację zanieczyszczeń mikrobiologicznych.

W tabeli 10 podano podstawowe statystyki opisowe (wartość minimalną, medianę, średnią, maksymalną i odchylenie standardowe) wybranych wskaźników mikrobiologicznych w badanych wodach opadowych przed i po oczyszczeniu w testowanej instalacji. W ostatniej

kolumnie przedstawiono wyniki nieparametrycznego testu Wilcoxon dla prób zależnych, wskazujące, czy wystąpiły statystycznie istotne różnice wartości parametrów próbek wody pobranych ze zbiornika i po oczyszczaniu w analizowanej instalacji.

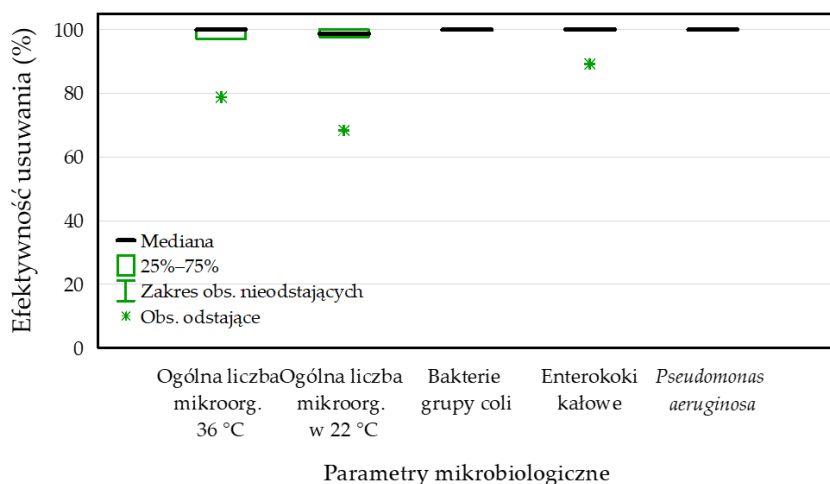
Tab. 10. Podstawowe parametry mikrobiologiczne i statystyki opisowe

* istotne statystycznie różnice między wartościami parametrów dla wody przed uzdatnianiem (RW - ang. *raw water*) i po uzdatnianiu (TW - ang. *treated water*), SD – odchylenie standardowe.

Parameter i jednostka	Próbka	min	mediana	średnia	max	SD	Wilcoxon z p-value
Ogólna liczba mikroorganizmów w 22 °C jtk/ml	RW	78	160	3045,4	14000	5091,6	z=2,37
	TW	0	0	73,71	420	154,6	p=0,018 *
Ogólna liczba mikroorganizmów w 36 °C jtk/ml	RW	120	610	4314,3	23000	8342,0	z=2,37
	TW	0	25	91,57	520	190,2	p=0,018 *
Liczba bakterii grupy coli jtk/100 ml	RW	0	0	1,429	10	3,780	-
	TW	0	0	0	0	-	
Liczba <i>Escherichia coli</i> jtk/100 ml	RW	0	0	0	0	-	-
	TW	0	0	0	0	-	
Liczba enterokoków kałowych jtk/100 ml	RW	1	15	19,57	48	17,99	z=2,37
	TW	0	0	0,571	4	1,511	p=0,018 *
Liczba <i>Pseudomonas aeruginosa</i> jtk/100 ml	RW	0	0	14	38	17,66	z=1,60
	TW	0	0	0	0	-	p=0,109

Jak wskazano w tabeli 10, liczebności bakterii psychrofilnych i mezofilnych w wodzie pobieranej ze zbiorników są bardzo zróżnicowane i wahają się do kilku, a nawet kilkunastu tysięcy. Mimo tak dużej liczebności bakterii, zastosowany system oczyszczania, a szczególnie działanie bakteriobójcze lampy UV, okazało się być bardzo skuteczne. W wielu próbkach wody pobieranych po zastosowaniu systemu uzdatniania, efektywność dezynfekcji była bardzo wysoka i wynosiła od ok. 98% do 100% (ryc. 18). Incydentalnie w sierpniu 2023 r. skuteczność usuwania bakterii psychrofilnych wyniosła 78,8%, a mezofilnych 68,3%. Jest to zaskakujące, gdyż w wodzie ze zbiornika bakterii psychrofilnych było jedynie 160 jtk/ml, a mezofilnych 120 jtk/ml. Bakterie *Escherichia coli* i bakterie grupy coli pojawiły się w wodzie ze zbiornika jedynie w listopadzie 2023 r. i to w niewielkiej liczebności, natomiast w wodzie po uzdatnianiu nie wykryto ich obecności w żadnej próbce. Enterokoki kałowe pojawiały się w próbkach ze zbiornika w liczebnościach po kilkadziesiąt osobników. Natomiast oczyszczanie wody, a szczególnie dezynfekcja, były na tyle skuteczne, że w wodzie uzdatnionej wykazano jedynie 4 sztuki enterokoków kałowych w próbce pobranej w sierpniu 2023 r. Podobnie, jak w przypadku bakterii grupy coli, bakterie *Pseudomonas aeruginosa*

zostały odnotowane w próbkę we wrześniu 2023 r. w wodzie ze zbiornika, natomiast w próbkach wody oczyszczonej ich nie odnotowano.



Ryc. 18. Skuteczność usuwania wybranych wskaźników mikrobiologicznych

Oceniając skuteczność funkcjonowania zastosowanego systemu oczyszczania wody można stwierdzić, że dla całego okresu pomiarowego mediana efektywności usuwania bakterii psychrofilnych wyniosła 99,3%, bakterii mezofilnych 98,6%. Natomiast bakterie typu coli, enterokoki kałowe oraz typu *Pseudomonas aeruginosa* były eliminowane w 100% (ryc. 18).

Reasumując można stwierdzić, że wdrożona instalacja testowa do oczyszczania wód opadowych, oparta na procesach filtracji i lampie UV, jest dosyć skuteczna i pozwala na wykorzystanie oczyszczonych wód opadowych do celów technicznych, hodowlanych i rolniczych. Dodatkowo, zastosowany system ma możliwości regulacyjne przy pomocy zmiany natężenia przepływu, a w konsekwencji zmiany dawki energii. Z literatury wiadomo, że skuteczność dezynfekcji wyrażona w formie logarytmicznej jest liniową funkcją dawki promieniowania [Augsburger i in. 2021] oraz zależy od zastosowanej lampy UV, a ściślej długości jej fali [Reiszadeh i Adeli 2020].

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że zastosowanie trzystopniowego układu filtracyjnego oraz lampy dezynfekcyjnej UV pozwala przekształcić wodę opadową na przydatną do wykorzystania w celu pojenia zwierząt (np. koników polskich na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego) oraz do mycia pojazdów. Ograniczeniem w wykorzystaniu wód opadowych do spożywania przez ludzi jest zbyt niska twardość oraz możliwość incydentalnego pojawiania się różnego typu mikroorganizmów w wodzie

uzdatnionej. Mimo tego, na podstawie wykonanych badań wykazano, że doprowadzenie wody opadowej do lepszych parametrów jakościowych jest możliwe i wymaga niewielkich modyfikacji. Celem badań było także wykazanie, że woda opadowa nie zawiera metali ciężkich, a stężenia żelaza, manganu, związków azotu oraz fosforu są na niskim poziomie. Dlatego odpowiednio oczyszczona woda opadowa może być wykorzystywana do spłukiwania toalet oraz szczególnie do prania, gdzie akurat niska twardość stanowi bardzo dużą zaletę.

Przeprowadzone badania wykazały, że instalacja testowa do oczyszczania wód opadowych oparta na procesach filtracji i lampie UV może być wdrożona w systemie do zagospodarowania wód opadowych w Ośrodku Hodowli Zwierząt we Floriancie w Roztoczańskim Parku Narodowym. Realizację tego obiektu zaplanowano na lata 2024-2025 na podstawie Programu Funkcjonalno-Użytkowego opracowanego m.in. przez Autora rozprawy doktorskiej [Grabowski i in. 2022a]. Budowa obiektu zostanie sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w ramach Umowy 212/2024/Wn03/OP-WK/D. „Zielone i niebieskie technologie w Roztoczańskim Parku Narodowym w latach 2024-2026”

7. Wnioski

Badania przeprowadzone w latach 2021-2023 na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego i prace projektowe dotyczące systemu do zagospodarowania wód opadowych, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków naukowych i wdrożeniowych:

Wnioski naukowe

1. Zmiany klimatu zmuszają do gromadzenia wód opadowych w celu zaspokojenia potrzeb OHZ we Floriancie na terenie RPN ze źródeł alternatywnych. Określono, że z dachów budynków osad leśnych należących do RPN można zebrać łącznie 9109 m³ wody rocznie.
2. Wody opadowe wykazują dużą zmienność zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym, w czasie i przestrzeni.
 - a. Surowe wody opadowe z zasady mają korzystny skład organoleptyczny, fizykochemiczny i mikrobiologiczny. Jednak stężenia niektórych parametrów nie są zgodne z normami określonymi dla wody do picia (np. twardość ogólna, amoniak, mętność, czy wskaźniki mikrobiologiczne). Podwyższone zawartości amoniaku, czy wskaźników mikrobiologicznych prawdopodobnie są spowodowane zanieczyszczeniem powierzchni dachów ptasimi odchodami.
 - b. Wody opadowe na terenie RPN nie zawierają metali ciężkich, a zawartość żelaza, manganu, związków azotu i fosforu jest niewielka.
 - c. Wody opadowe są bardzo miękkie, gdyż są pozbawione związków wapnia. Z tego względu nie powinny być podstawowym produktem konsumpcyjnym. W wodach opadowych notowano okresowo obniżone wartości pH < 6,5, głównie przy niewielkich opadach w okresie zimowym, które prawdopodobnie mogły mieć charakter „kwaśnych deszczy”.
3. Gromadzenie wód opadowych w podziemnych betonowych zbiornikach korzystnie wpływa na stabilizację temperatury wody, co nie dopuszcza do niekontrolowanych przemian chemicznych i biologicznych.
4. Analizowana instalacja testowa do oczyszczania wód opadowych oparta na procesie filtracji i dezynfekcji (lampa UV), zainstalowana przy Dyrekcji RPN, skutecznie usuwała zanieczyszczenia fizyczne, chemiczne i mikrobiologiczne.

Wnioski wdrożeniowe

1. Z przeprowadzonych badań wynika, że wody opadowe po uzdatnieniu w procesach filtracji i dezynfekcji mogą być wykorzystane do pojenia koników polskich w OHZ we Floriance na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego, a także do mycia pojazdów, podlewania terenów zieleni, czy spłukiwania toalet. Mogą także służyć do napełniania zbiorników przeciwpożarowych i zasilaniu miejsc rozrodu płazów.
2. Na podstawie średnich sum opadów z wielolecia 2001-2020 określono, że największe ilości wód opadowych na terenie OHZ we Floriance występują w okresie wiosenno-letnim (od maja do sierpnia), czyli wtedy kiedy zapotrzebowanie na wodę jest największe. W okresie tym wody opadowe w 100% pokryją zapotrzebowanie na wodę do różnych, wcześniej wspomnianych celów. W pozostałych miesiącach wody opadowe pokryją od 54 – 90% zapotrzebowania na wodę na terenie OHZ we Floriance.
3. Otrzymane wyniki badań i pomiary terenowe pozwoliły na zaprojektowanie nowego systemu zagospodarowania wód opadowych, który zostanie wdrożony w latach 2025-2026 roku w Ośrodku Hodowli Zwierząt RPN. System ten pozwoli na wykorzystanie wód opadowych m.in. do pojenia koników polskich – zwierzęcia herbowego Roztoczańskiego Parku Narodowego.

Odpowiadając na pytanie sformułowane w problemie badawczym w oparciu o uwarunkowania określone w tezach pracy stwierdza się, że jakość i ilość wód opadowych oraz ich gromadzenie w podziemnych zbiornikach pozwala na ich uzdatnieniu w procesach filtracji i dezynfekcji, w celu wykorzystania ich do pojenia koników polskich. Cel rozprawy został osiągnięty, gdyż praktyczne zastosowanie systemu przyczyni się do zmniejszenia wykorzystania wód podziemnych i wykorzystania wód opadowych na cele hodowlane oraz sanitarne, techniczne, przeciwpożarowe, z odprowadzaniem nadmiaru wód do miejsc rozrodu płazów w dawnych stawach w Ośrodku Hodowli Zachowawczej w Roztoczańskim Parku Narodowym we Floriance.

Piśmiennictwo

- Abdulla, F.A.; Al-Shareef, A. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243, 195–207.
- Adedeji, O.; Reuben, O.; Olatoye, O. (2014). Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2, 114–122.
- Adugna, M.B.; Jensen, B.; Lemma, S. (2018). Assessing the potential for rooftop rainwater harvesting from large public institutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 336.
- Aladenola, O.O.; Adeboye, O.B. (2010). Assessing the potential for rainwater harvesting. *Water Resources Management*, 24, 2129–2137.
- Augsburger, N.; Rachmadi, A.T.; Zaouri, N.; Lee, Y.; Hong, P.Y. (2021). Recent Update on UV Disinfection to Fulfill the Disinfection Credit Value for Enteric Viruses in Water. *Environmental Science & Technology*, 55, 16283–16298.
- Bartoszewski, S.; Michalczyk, Z. (2015). Stosunki wodne W: Roztoczański Park Narodowy. Przyroda i człowiek; Red. Reszel, R., Grądział, T., Wyd. Roztoczański Park Narodowy: Zwierzyniec, 53–60.
- Bruins, H.J.; Evenari, M.; Nessler, U. (1986). Rainwater-harvesting agriculture for food production in arid zones: The challenge of the African famine. *Applied Geography*, 6, 13–32.
- Brzezińska-Wójcik, T.; Harasimiuk, M.; Krukowski, M. (2013). Geologia Osady powierzchniowe. W: Roztoczański Park Narodowy. Środowisko i człowiek; Red. Kałamucki, K., Grabowski, T.; Monografia kartograficzna; Wyd. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, Polska.
- Buraczyński, J. (2002). Roztocze. Środowisko przyrodnicze; Wydawnictwo Lubelskie: Lublin; s. 341.
- Buraczyński, J.; Grzechnik, L.; Meksuł, M. (2013). Roztoczański Park Narodowy na tle regionów fizyczno-geograficznych. W: Roztoczański Park Narodowy Przyroda i Człowiek, Monografia kartograficzna; Red. Kałamucki, K., Grabowski, T.; Wyd. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, Polska.
- Cheng J., Bi J., Gong Y., Cheng X., Yu J., Gan H., Wang R., Wang K. (2023). Processes of nitrogen removal from rainwater runoff in bioretention filters modified with ceramsite and activated carbon. *Environmental Technology*, 44 (22): 3317-3330.
- Chubaka, C.E.; Ross, K.E.; Edwards, J.W. (2017). Rainwater for drinking water: A study of household attitudes. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 216, 299–311.
- Dębicki R., Bartmiński P., Chodorowski J., Miśta T. (2015). Gleby. W. Roztoczański Park Narodowy. Przyroda i człowiek; Red. Reszel R., Grądział T., wyd. Roztoczański Park Narodowy.
- Eensaar, A. (2021). Analysis of the spatio-temporal variability of air temperature near the ground surface in the Central Baltic area from 2005 to 2019. *Atmosphere*, 12, 60.
- Eroksuz, E.; Rahman, A. (2010). Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1449–1452.
- Ertop, H.; Kocięcka, J.; Atilgan, A.; Liberacki, D.; Niemiec, M.; Rolbiecki, R. (2023). The Importance of Rainwater Harvesting and Its Usage Possibilities: Antalya Example (Turkey). *Water*, 15, 2194.
- Evans, C.; Coombes, P.; Dunstan, R. (2006). Wind, rain and bacteria: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater. *Water Resources*, 40, 37–44.

- Evans, C.A.; Harrison, T.; Coombes, P.J.; Dunstan, H.R.; Dunstan, R.H. (2007). Identifying the major influences on the microbial composition of roof harvested rainwater and the implications for water quality. *Water Science & Technology*, 55, 245–253.
- Farreny, R.; Morales-Pinzón, T.; Guisasola, A.; Tayà, C.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Resources*, 45, 3245–3254.
- Forster, J. (1998). The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. *Water Science & Technology*, 38, 83–90.
- Ghisi, E.; Bressan, D.L.; Martini, M. (2007). Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, 42, 1654–1666.
- Grabowski, T.; Józwiakowski K.; Roczeń, P. (2022a). Program Funkcjonalno-Użytkowy [PFU] dla budowy instalacji odprowadzania i oczyszczania wód opadowych z budynków Ośrodka Hodowli Zachowawczej we Floriance w Roztoczańskim Parku Narodowym.
- Grabowski, T.; Józwiakowski, K.; Bochniak, A.; Micek, A. (2022b). Changes in the Amount of Rainwater in the Roztocze National Park (Poland) in 2001–2020 and the Possibility of Using Rainwater in the Context of Ongoing Climate Variability. *Water*, 14, 1334.
- Grabowski, T.; Józwiakowski, K.; Bochniak, A.; Stachyra, P.; Radliński, B. (2023). Assessment of Rainwater Quality Regarding Its Use in the Roztocze National Park (Poland) – Case Study. *Applied Sciences*, 13, 6110.
- Grabowski, T.; Bochniak A.; Siwiec, T.; Józwiakowski, K. (2024). Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland) *Sustainability*, 16, 4709, 1-23.
- Grabowski, T.; Stachyra, P.; Brusak, V.; Kałamucka, W.; Stanicka, M.; Shevchuk, O.; Zinco, Y.; Krychevska, D. (2015). Ochrona przyrody Roztocza. W. Roztocze. Przyroda i człowiek; Red. Grabowski, T., Harasimiuk, M., Kaszewski, B.M., Kravchuk, Y., Lorens, B., Michalczyk, Z., Shabliy, O., Wyd. Roztoczański Park Narodowy: Zwierzyniec, 227-271.
- Grabowski, T.; Józwiakowski, K.; Bochniak, A.; Roczeń, P.; Marcyniuk, J. (2022c). Program Funkcjonalno-Użytkowy [PFU] dla budowy instalacji odprowadzania i oczyszczania wód opadowych z budynków Ośrodka Hodowli Zachowawczej we Floriance w Roztoczańskim Parku Narodowym wraz z punktem poboru wody na cele przeciwpożarowe, techniczne i hodowlane. Maszynopis. Zwierzyniec, Roztoczański Park Narodowy, 1-30.
- Harrison, I.; Green, P.; Farrell, T.; Juffe-Bignoli, D.; Saenz, L.; Vörösmarty, C. (2016). Protected areas and freshwater provisioning: A global assessment of freshwater provision, threats and management strategies to support human water security: Protected areas and freshwater provisioning. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26, 103–120.
- Herrmann, T.; Schmida, U. (1999). Rainwater utilisation in Germany: Efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*, 1, 307–316.
- Hoss, C.G.; Tavares, J.M.R.; Moreira, A.J.G.; Filho, P.B.; Matthiensen, A. (2022). Assessing the Potential for Rainwater Harvesting Use in a Concentrated Animal Feeding Operation Region in the South of Brazil. *Sustainability*, 14, 12523.
- Jędruszkiewicz, J. (2010). Projekcje zmian warunków termicznych Polski na lata 2021–2050 na podstawie regionalnych modeli klimatycznych. W. Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany i ich konsekwencje; Red. Bednarz, E., Kolendowicz, L; Wydawnictwo Naukowe Bogucki: Poznań, 65–77.
- Józwiakowski, K.; Listosz, A.; Gizińska-Górna, M.; Pytka, A.; Marzec, M.; Sosnowska, B.; Chołody, M.; Dyczko, A. (2016). Quality of rainwaters outflowing from roofs of garage buildings of park authority of Roztocze National Park. *Journal of Ecological Engineering*, 17, 208–215.

- Józwiakowski, K.; Marzec, M.; Słowik, T.; Wałęga, A.; Krzanowski, S.; Skwarzyńska, A.; Pieńko, A. (2013). Koncepcja budowy instalacji do wykorzystania wód deszczowych na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego wraz ze wstępnym kosztorysem; Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Lublin, Polska.
- Kałamucka, W.; Grabowski, T. red. (2021). System obszarów chronionych Roztocza w Polsce i na Ukrainie a rozwój zrównoważony regionu. Roztoczański Park Narodowy. Zwierzyniec, s. 1-382.
- Kaszewski, B.M.; Siwek, K. (2015a). Klimat. W. Roztoczański Park Narodowy. Przyroda i człowiek. Red.; Reszel, R., Grądział, T., Wyd.; Roztoczański Park Narodowy, 61–65.
- Kaszewski, B.M.; Siwek, K.; Gluza, A.; Shuber, P. (2015b). Klimat W. Roztocze. Przyroda i człowiek. Red.; Grabowski, T., Harasimiuk, M., Kaszewski, B.M., Kravchuk, Y., Lorens, B., Michalczyk, Z., Shabliy, O., Wyd. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, 123–133.
- Kim, Y.; Han, M.; Kabubi, J.; Sohn, H.G.; Nguyen, D.C. (2016). Community-based rainwater harvesting (CB-RWH) to supply drinking water in developing countries: Lessons learned from case studies in Africa and Asia. *Water Supply*, 16, 1110–1121.
- Kondracki, J. (2011). Geografia regionalna Polski, wyd. 3. PWN: Warszawa, s. 440.
- Królikowska, J.; Królikowski, A. (2012). Wody opadowe. Odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie. Wyd. Seidel-Przywecki Sp. z o.o., s. 368.
- Kruszel, J.; Ziernicka-Wojtaszek, A. (2016). Diversity of Air Temperature in Poland in the Years 1971–2010. *Journal of Ecological Engineering*, 17, 227–231.
- Kundzewicz, Z.W.; Matczak, P. (2012). Climate change regional review: Poland. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change*, 3, 297–311.
- Lorenc, H.; Prządka, Z. (2006). Programy pomiarowe zintegrowanego monitoringu środowiska — wytyczne organizacji sieci pomiarowej. Program pomiarowy A1: Meteorologia. W: Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badawcze, wyd. 2; Red. Kostrzewski, A., Kruszyk, R., Kolander; Uniwersytet im. Adama Mickiewicza: Poznań, s. 10.
- Maciejewski, Z.; Radliński, B.; Stachyra, P. (2020). Analiza zmienności wybranych elementów meteorologicznych i hydrologicznych oraz ich wpływu na środowisko przyrodnicze w Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska na Roztoczu w latach 2012–2019. W: Aktualny stan i zmiany w środowisku przyrodniczym geoeosystemów jako wskaźnika zmian klimatu. ZMŚP.
- Miah, M.; Sayok, A.; Sarok, A.; Uddin, M.B. (2017). Rain Water Harvesting for Sustainable Biodiversity Conservation at Lawachara National Park in Bangladesh: A Study on Policy Challenges. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 10, 11–26.
- Micek, A.; Józwiakowski, K.; Marzec, M.; Listosz, A. (2020). Technological Reliability and Efficiency of Wastewater Treatment in Two Hybrid Constructed Wetlands in the Roztocze National Park (Poland). *Water*, 12, 3435.
- Michalska, B. (2011). Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 67–75.
- Morey, A.; Dhurve, B.; Haste, V.; Wasnik, B. (2016). Rainwater Harvesting System. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3, 2158–2162.
- Musayev, S.; Burgess, E.; Mellor, J. (2018). A global performance assessment of rainwater harvesting under climate change. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 62–70.

- Palla, A.; Gnecco, I.; Lanza, L.G.; La Barbera, P. (2012). Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 71–80.
- Radliński, B.; Maciejewski, Z.; Rawiak, A.; Stachyra, P.; Smoła, M.; Gień, G. (2021). Sprawozdanie z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego na Stacji Bazowej Roztocze w 2020 r. Roztoczański Park Narodowy: Zwierzyniec, s. 225.
- Raeiszadeh, M.; Adeli, B. (2020). A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. *ACS Photon*, 7, 2941–2951.
- Raimondi, A.; Quinn, R.; Abhijith, G.R.; Becciu, G.; Ostfeld, A. (2023). Rainwater Harvesting and Treatment: State of the Art and Perspectives. *Water*, 15, 1518.
- Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Roztocze Roztoczańskiego Parku Narodowego w roku 2020.(2021). Maszynopis. Zwierzyniec, RPN.
- Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Roztocze Roztoczańskiego Parku Narodowego w roku 2023. Maszynopis. Zwierzyniec, RPN.
- Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych. Dz. U. z 2009, poz. 124.
- Sprawozdanie z realizacji Programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego monitoringu środowiska przyrodniczego w Stacji Bazowej Roztocze Roztoczańskiego Parku Narodowego w 2012 r.; [red.] Stachyra, P.; Grabowski, T.; Kaszewski, B.M.; Stacja Bazowa ZMSP Roztocze; Roztoczański Park Narodowy: Zwierzyniec, 2013.
- Romer, E. (1949). Regiony klimatyczne Polski; Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego: Wrocław, Polska, Seria B, nr 16; S. 23.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych. Dz.U. 2019, poz. 2148.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody. Dz.U. 2002 nr 8, poz. 70.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. Dz. U. z 2021r., poz. 1475.
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 19 kwietnia 2018 r. w sprawie ustanowienia Planu Ochrony dla Roztoczańskiego Parku Narodowego. Dz.U. 2018, poz. 1081.
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz.U. 2017, poz. 2294.
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 14 października 2021 r. w sprawie specjalnego obszaru ochrony siedlisk Roztocze Środkowe (PLH060017), Dz.U. 2021, poz. 2085.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 stycznia 2011 r. w sprawie obszarów specjalnej ochrony ptaków. Dz. U. 2011, poz.1330.
- Sazakli, E.; Alexopoulos, A.; Leotsinidis, M. (2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Resorces*, 41, 2039–2047.

- Semaan, M.; Day, S.D.; Garvin, M.; Ramakrishnan, N.; Pearce, A. (2020). Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: A systematic literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 100033.
- Siegel, S.; Castellan, N.J. (1988). *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, 2nd ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Skwarzyńska, A.; Józwiakowski, K.; Sosnowska, B.; Pytka, A.; Marzec, M.; Gizińska, M.; Szyszlak-Bargłowicz, J.; Słowik, T.; Zajac, G. (2014). Jakość wód opadowych i ocena możliwości ich wykorzystania w indywidualnych gospodarstwach domowych. *Technologia Wody* 2014. 6, 20–23.
- Struk-Sokołowska, J.; Gwoździej-Mazur, J.; Jadwiszczak, P.; Butarewicz, A.; Ofman, P.; Wdowikowski, M.; Kaźmierczak, B. (2020). The Quality of Stored Rainwater for Washing Purposes. *Water*, 12, 252.
- Szwagrzyk, J.; Bodziarczyk, J. (2021). Ekspertyza dotycząca konieczności wprowadzenia zmian w Planie ochrony ekosystemów leśnych Roztoczańskiego Parku Narodowego; Maszynopis: Kraków, Polska, s. 90.
- Teixeira, C.A.; Ghisi, E. (2019). Comparative Analysis of Granular and Membrane Filters for Rainwater Treatment. *Water*, 11, 1004.
- Ustawa o ochronie przyrody z dnia 16 kwietnia 2004 roku. Dz.U. 2023, poz. 1336, 1688, 1890.
- Villar-Navascués, R.; Pérez-Morales, A.; Gil-Guirado, S. (2020). Assessment of Rainwater Harvesting Potential from Roof Catchments through Clustering Analysis. *Water*, 12, 2623.
- Voicu, D.D.; Dumitru, M. (2024). The state of the research on circular economy in the European Union: A bibliometric review. *Cleaner Waste Systems*, 100127.
- Wu, L.; Gao, J.; Zhao, W.; Xu, X.; Yin, Y.; Wu, L. (2016). Quality assessment of rainwater and harvested rainwater stored in different types of cisterns. *Water Science & Technology Water Supply*, 17, 652–664.
- Yawalkar, R.; Ingole, S.; Derkar, S.; Gaurkar, M.; Kawle, S.; Hingwe, G. (2021). Rainwater Harvesting by Rooftop Method. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 8, 1988–1991.
- Zdeb, M., Zamorska, J., Papciak, D., Skwarczyńska-Wojśa, A. (2021). Investigation of Microbiological Quality Changes of Roof-Harvested Rainwater Stored in the Tanks, *Resources*, 10, 103.
- Zhang, Y.; Chen, D.; Chen, L.; Ashbolt, S. (2009). Potential for rainwater use in high-rise buildings in Australian cities. *Journal of Environmental Management*, 91, 222–226.
- Ziernicka-Wojtaszek, A.; Kopcińska, J. (2020). Variation in Atmospheric Precipitation in Poland in the Years 2001–2018. *Atmosphere*, 11, 794.

Opracowanie i wdrożenie systemu do gromadzenia oraz wykorzystania wód opadowych do pojenia zwierząt na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego

OŚWIADCZENIA

Załącznik nr 7 – Oświadczenia o współautorstwie

Tadeusz Grabowski



**Rada Dyscypliny: Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie**

Oświadczenie o współautorstwie I.

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

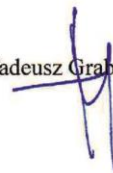
Grabowski T., Józwiakowski K., Bochniak A., Micek A. 2022. Changes in the Amount of Rainwater in the Roztocze National Park (Poland) in 2001–2020 and the Possibility of Using Rainwater in the Context of Ongoing Climate Variability. *Water*, 14, 1334, s. 1-20.

mój udział własny polegał na:

opracowaniu koncepcji badań, opracowaniu danych, analizie danych, badaniach, opracowaniu metodyki badań, analizie źródeł literatury, nadzorze merytoryczny, zatwierdzeniu artykułu, przygotowanie rękopisu, przeglądzie i edycji ostatecznej wersji tekstu.

Zwierzyniec, 16 września 2024 roku

Tadeusz Grabowski



Oświadczenie o współautorstwie II.

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

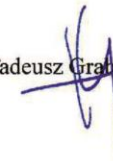
Grabowski T., Józwiakowski K., Bochniak A., Stachyra P., Radliński B. 2023. Assessment of Rainwater Quality Regarding Its Use in the Roztocze National Park (Poland)—Case Study. *Applied Sciences*, 13, 6110, s. 1-22.

mój udział własny polegał na:

opracowaniu koncepcji badań, opracowaniu danych, analizie danych, badaniach, opracowaniu metodyki badań, analizie źródeł literatury, nadzorze merytoryczny, zatwierdzeniu artykułu, przygotowanie rękopisu, przeglądzie i edycji ostatecznej wersji tekstu

Zwierzyniec, 16 września 2024 roku

Tadeusz Grabowski



Oświadczenie o współautorstwie III.

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

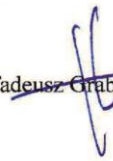
Grabowski T., Bochniak A., Siwiec T., Józwiakowski K. 2024. Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland). *Sustainability*, 16, 4709, s. 1-23

mój udział własny polegał na:

opracowaniu koncepcji badań, opracowaniu danych, analizie danych, badaniach, opracowaniu metodyki badań, analizie źródeł literatury, nadzorze merytoryczny, zatwierdzeniu artykułu, przygotowanie rękopisu, przeglądzie i edycji ostatecznej wersji tekstu

Zwierzyniec, 16 września 2024 roku

Tadeusz Grabowski



Oświadczenia
oraz określenie wkładu współautorów dotyczące publikacji

Grabowski, T.; Józwiakowski, K.; Bochniak A.; Micek, A. Changes in the Amount of Rainwater in the Roztocze National Park (Poland) in 2001–2020 and the Possibility of Using Rainwater in the Context of Ongoing Climate Variability. *Water* 2022, 14, 1334, s. 1-20

l.p.	Autorzy	Udział w %	Objaśnienia	Podpis
1	Grabowski Tadeusz	70	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K.	<i>Tadeusz Grabowski</i>
2	Józwiakowski Krzysztof	15	F, E, G, H, I, J, K.	<i>K. Józwiakowski</i>
3	Bochniak Andrzej	10	B, C, H, G, I, J, F.	<i>A. Bochniak</i>
4.	Agnieszka Micek	5	F, H.	<i>Agnieszka Micek</i>

Objaśnienia:

- A. Koncepcja badań
- B. Opracowanie danych
- C. Analiza danych
- D. Badania
- E. Metodyka badań
- F. Źródła literaturowe
- G. Nadzór merytoryczny
- H. Zatwierdzenie artykułu
- I. Przygotowanie rękopisu
- J. Przegląd i edycja ostatecznej wersji tekstu
- K. Pozyskanie finansowania

Zwierzyniec, 6 września 2024r.

Oświadczenia

oraz określenie wkładu współautorów dotyczące publikacji

Grabowski, T.; Józwiakowski, K.; Bochniak A.; Stachyra P.; Radliński, B. Assessment of Rainwater Quality Regarding Its Use in the Roztocze National Park (Poland)—Case Study. Applied Sciences 2023,13, 6110, s. 1-22

I.p.	Autorzy	Udział w %	Objaśnienia	Podpis
1	Grabowski Tadeusz	60	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K.	<i>Tadeusz Grabowski</i>
2	Józwiakowski Krzysztof	15	F, E, G, H, I, J, K.	<i>K. Józwiakowski</i>
3	Bochniak Andrzej	15	B, C, E, H, G, I, J, F.	<i>Andrzej Bochniak</i>
4	Stachyra Przemysław	5	D, F, H.	<i>Przemysław Stachyra</i>
5.	Bogusław Radliński	5	N, F, H.	<i>Bogusław Radliński</i>

Objaśnienia:

- A. Koncepcja badań
- B. Opracowanie danych
- C. Analiza danych
- D. Badania
- E. Metodyka badań
- F. Źródła literaturowe
- G. Nadzór merytoryczny
- H. Zatwierdzenie artykułu
- I. Przygotowanie rękopisu
- J. Przegląd i edycja ostatecznej wersji tekstu
- K. Pozyskanie finansowania

Zwierzyniec, 6 września 2024r.

**Oświadczenia
oraz określenie wkładu współautorów dotyczące publikacji**

Grabowski, T.; Bochniak A.; Siwiec, T.; Józwiakowski K. Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland). Sustainability 2024, 16, 4709, s. 1-23

l.p.	Autorzy	Udział w %	Objaśnienia	Podpis
1	Grabowski Tadeusz	60	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K.	Tadeusz Grabowski
2	Bochniak Andrzej	15	B, C, E, H, G, I, J, F.	A. Bochniak
3	Siwiec Tadeusz	10	D, F, G, H, J.	T. Siwiec
4	Józwiakowski Krzysztof	15	C, E, F, G, H, I, J, K	K. Józwiakowski

Objaśnienia:

- A. Koncepcja badań
- B. Opracowanie danych
- C. Analiza danych
- D. Badania
- E. Metodyka badań
- F. Źródła literaturowe
- G. Nadzór merytoryczny
- H. Zatwierdzenie artykułu
- I. Przygotowanie rękopisu
- J. Przegląd i edycja ostatecznej wersji tekstu
- K. Pozyskanie finansowania

Zwierzyniec, 6 września 2024r.

**ZAŁĄCZNIKI – KOPIE PUBLIKACJI BĘDĄCE PODSTAWĄ
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ – 3 artykuły**