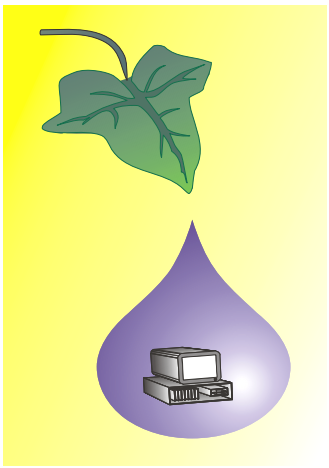


Dofinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Sprawozdanie z realizacji II etapu umowy nr DM/13/2020/F pt.

„Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz przeprowadzenie badań w roku 2021”,

zawartej pomiędzy

Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska w Warszawie

a

Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Zadanie nr 2

Stan geoekosystemów Polski w 2021 roku

Poznań
2022

Mikołaj Majewski
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Pracownia Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Centrum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Stacja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Poznań-Morasko
Stacja Bazowa ZMŚP Poznań-Morasko
majewski@amu.edu.pl
Andrzej Kostrzewski
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
Centrum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
anko@amu.edu.pl

Stan geoekosystemów Polski w 2021 roku na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Poznań 2022

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE 4

2. ZLEWNIE BADAWCZE ZMŚP 9

3. ZLEWNIE BADAWCZE ZMŚP A OBSZARY SZCZEGÓLNIE CENNE PRZYRODNICZO: PARKI NARODOWE I SIEĆ NATURA 2000 17

4. PROGRAM BADAWCZO-POMIAROWY STACJI BAZOWYCH ZMŚP 23

5. GEOINDYKATORY OBIEGU WODY W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP 33

5.1. Warunki pogodowe 33

5.2. Wody podziemne 52

5.3. Wody powierzchniowe 56

5.4. Skrócony bilans wodny 61

6. GEOINDYKATORY JAKOŚCI WODY W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP 64

6.1. Opady atmosferyczne 64

6.2. Wody podziemne 75

6.3. Wody powierzchniowe 77

6.4. Bilans jonów denudacyjnych i biogennych 84

7. WPŁYW UWARUNKOWAŃ ABIOTYCZNYCH NA PRZYRODĘ OŻYWIONĄ W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP 90

7.1. Termiczne pory roku 90

7.2. Sezon wegetacyjny 94

7.3. Zanieczyszczenie powietrza 97

7.4. Uszkodzenia drzew i drzewostanów 99

7.5. Roślinne gatunki inwazyjne obcego pochodzenia 101

7.6. Hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych 102

8. STAN GEOEKOLOGICZNY I POTENCJAŁ ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP 105

8.1. Potencjał środowiska przyrodniczego w oparciu o ocenę usług geoekosystemów 106

8.2. Stan geoekologiczny 108

9. PODSUMOWANIE STANU EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMÓW ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH POLSKI W 2021 ROKU 112

10. LITERATURA 120

Spis rycin 125

Spis tabel 126

1. WPROWADZENIE

Opracowanie zostało wykonane zgodnie z umową nr DM/13/2020/F pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz przeprowadzenie badań w roku 2021", (zwana dalej umową ZMŚP). Umowa została zawarta 24 listopada 2020 roku pomiędzy Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska w Warszawie a Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu i została sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Przedmiotowe opracowanie wykonano w ramach zadania 2 pt. „Przygotowanie opracowania o stanie geoekosystemów Polski za rok 2021". W pracy przedstawiono stan geoekosystemów Polski w 2021 roku hydrologicznym, z odniesieniem do wieloletniego (1994-2020) okresu badań w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP). Takie podejście badawcze umożliwia określenie skali przemian środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów eksperymentalnych zlewni rzecznych i jeziornych, w powiązaniu z obserwowanymi zmianami klimatu i różnymi przejawami antropopresji.

Program badawczo-pomiarowy ZMŚP w 2021 roku realizowano w jedenastu Stacjach Bazowych (SB ZMŚP): Wolin, Parsęta (dawna nazwa Storkowo), Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie (dawna nazwa Koniczynka), Poznań-Morasko (dawna nazwa Różany Strumień), Kampinos, Łysogóry (dawna nazwa Święty Krzyż), Roztocze, Beskid Niski (dawna nazwa Szymbark) i Karkonosze. Podstawę opracowania stanowiły merytoryczne raporty ze Stacji ZMŚP za 2021 rok hydrologiczny (od 1 listopada 2020 roku do 31 października 2021 roku), w których przedstawiono funkcjonowanie geoekosystemów (zlewni) eksperymentalnych, uznanych za reprezentatywne w wybranych strefach krajobrazowych Polski (tj. Degórska i in. 2022, Jóźwiak i in. 2022, Kejna i in. 2022, Kijowska-Strugała i in. 2022, Krakowski i in. 2022, Krzysztofiak i in. 2022, Major i in. 2022, Olszewski i in. 2022, Stachyra i in. 2022, Szpikowski i in. 2022, Tylkowski i in. 2022). W opracowaniu wykorzystano także dane zgromadzone w Centralnej Bazie Danych ZMŚP za lata hydrologiczne 1994-2021. Szczególnie przydatne w prezentowanych studiach porównawczych było syntetyczne opracowanie dotyczące funkcjonowania i przemian środowiska przyrodniczego wybranych geoekosystemów Polski w oparciu o realizację programu ZMŚP w latach 1994-2015 (Kostrzewski, Majewski 2018). Powyższe opracowanie umożliwiło odniesienie stanu środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów do lat poprzednich (1994-2015).

Program ZMŚP jest programem naukowo-badawczym, służy przedstawieniu aktualnego stanu i tendencji rozwoju monitorowanych geoekosystemów, jak również ochronie struktury krajobrazowej Polski. Pod względem metodologicznym program ZMŚP opiera się na koncepcji funkcjonowania systemu i realizuje założenia zachowania georóżnorodności i bioróżnorodności kraju (Kostrzewski 1993). Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, w porównaniu z monitoringami branżowymi, rozszerza stan rozpoznania funkcjonowania środowiska przyrodniczego w zakresie związków przyczynowo-skutkowych, skali przemian i kierunków rozwoju środowiska geograficznego wybranych geoekosystemów Polski (Kostrzewski i in. 2007). Metodologia programu ZMŚP podporządkowana jest koncepcji kompleksowego ujęcia funkcjonowania środowiska przyrodniczego poprzez określenie bilansu energii (wody) i materii (głównie substancji rozpuszczonych) w zlewni rzecznej lub jeziornej (Kostrzewski 1995). Monitorowane elementy abiotyczne, dotyczące oceny ilościowej i jakościowej obiegu wody, spełniają rolę geoindykatorów stanu środowiska (Szpikowski 2012, Tylkowski 2015a). W zintegrowanym monitoringu badania obejmują także wybrane biotyczne elementy geoekosystemu, które spełniają rolę biowskaźników stanu i tendencji rozwoju środowiska. Podstawowym obiektem badań w ZMŚP jest eksperymentalna zlewnia rzeczna lub jeziorna, w zasięgu której zlokalizowane są testowe powierzchnie badawcze, reprezentatywne dla badanego krajobrazu (Kostrzewski 1995). Celem realizowanego programu ZMŚP jest określenie aktualnego stanu oraz wieloletnich tendencji przemian i kierunków rozwoju środowiska przyrodniczego zlewni rzecznych i jeziornych ZMŚP. Przemiany środowiska przyrodniczego odnoszone są m.in do obserwowanych aktualnie zmian klimatu i narastającej antropopresji. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do sporządzenia prognoz krótko i długoterminowych rozwoju środowiska przyrodniczego oraz przedstawienia kierunków zagrożeń i wskazania działań ochronnych, co jest bardzo istotne zarówno z merytorycznego, jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

W corocznych raportach Stacji Bazowych ZMŚP zamieszczane są informacje o stanie środowiska przyrodniczego i kierunkach zagrożeń badanych geoekosystemów zlewni rzecznych i jeziornych. Istotnym elementem rocznych sprawozdań jest prezentacja propozycji działań, które umożliwią zrównoważony rozwój środowiska przyrodniczego i pozwolą zachować walory i zasoby przyrodnicze.

Realizowany program pomiarowy ZMŚP, systematyczna jego weryfikacja (co 3 lata), a także systematyczna standaryzacja stosowanych metodyk terenowych i laboratoryjnych (Kostrzewski i in. 1995, 2006; Kostrzewski, Majewski 2021) sprawiły, że aktualnie nawiązuje on do europejskiego programu ICP Integrated Monitoring (Manual for Integrated Monitoring

1998), funkcjonującego w ramach Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości, przyjętej w Genewie w dniu 13 listopada 1979 roku. Od 2017 roku 9 stacji z sieci badawczo-pomiarowa monitoringu geoekosystemów ZMŚP na terenie Polski (Stacje Bazowe: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze i Beskid Niski) należy do ww. programu europejskiego. Ponadto wybrane Stacje Bazowe ZMŚP zostały wskazane jako stacje monitoringowe, na których badane są wskaźniki wpływu zanieczyszczenia powietrza na ekosystemy na potrzeby dyrektywy NEC.

Podstawowym celem niniejszego opracowania jest syntetyczne przedstawienie informacji o stanie środowiska przyrodniczego oraz tendencjach przemian i rozwoju wybranych geoekosystemów Polski w 2021 roku na tle wielolecia 1994-2020. Prowadzony monitoring naukowo-badawczy w wytypowanych eksperymentalnych zlewniach, uznanych za reprezentatywne dla krajobrazu Polski, dotyczy głównie dwóch aspektów:

1. Przepływu energii (wody) i obiegu materii (substancji rozpuszczonych) w geoekosystemach, co pozwala na określenie bilansu wodnego (analiza ilościowa) i prawidłowości obiegu substancji rozpuszczonych (analiza jakościowa) dla dwóch układów przestrzennych:
   - wertykalnego, związanego głównie z migracją wody i materii rozpuszczonej w zlewni w podsystemach: atmosfera – roślinność – profil glebowy – wody podziemne – wody powierzchniowe;
   - obszarowego, związanego z atmosferyczną dostawą wody i substancji rozpuszczonych do badanej zlewni oraz późniejszym ich odprowadzaniem przez odpływ fluwialny poza badaną zlewnię.
2. Bioindykacji wybranych elementów przyrody ożywionej, które są czułe na zmiany bilansu energetycznego i materialnego geoekosystemu, m.in. wzrost stężenia biogenów i elementów toksycznych, np. w porostach i makrofitach.

Koncepcja geoindykatorów zaproponowana przez Międzynarodową Unię Geologiczną (IUNG) w roku 1992 stanowiła próbę ujednolicenia i uporządkowania różnorodnych wskaźników stosowanych szeroko w naukach geograficznych, a szczególnie w monitoringu i ochronie środowiska (Zwoliński 1998). W niniejszym opracowaniu wykorzystano kilka geowskaźników, które wcześniej zastosowano w corocznych, syntetycznych raportach ZMŚP (Szpikowski 2011, 2012; Tylkowski 2014, 2015a, 2016; Tylkowski, Kostrzewski 2017, 2018; Majewski, Kostrzewski 2019, 2020, 2021). Geowskaźniki przedstawione w niniejszym opracowaniu dotyczą jakościowych i ilościowych właściwości obiegu wody. Charakterystyka

jakościowa i ilościowa atmosferycznej dostawy wody do zlewni, wody w niej krążącej i z niej odpływającej potwierdza prawidłowość, że obieg wody i rozpuszczonej w niej materii stanowi najważniejszy wskaźnik zmian środowiska przyrodniczego w umiarkowanej strefie morfoklimatycznej. W związku z powyższym, programy badawcze ZMŚP dostosowane są do stwierdzonej prawidłowości, iż obieg wody posiada największe znaczenie dla funkcjonowania środowiska geograficznego geoekosystemów Polski (Kostrzewski 1993, 2003). Obieg wody decyduje o przemianach środowiska przyrodniczego w badanych zlewniach, niezależnie od położenia w strukturze krajobrazowej Polski. Szczególnie istotne dla oceny zarówno sfery abiotycznej, jak i biotycznej jest określenie ilości wody krążącej w geoekosystemie wraz ze wskazaniem długookresowych trendów obiegu wody, a zwłaszcza dynamiki jej obiegu w danym roku. Szczególnie istotne jest odniesienie obserwowanych zmian obiegu wody do uwarunkowań hydrometeorologicznych w zakresie: rozkładu czasowego opadów i odpływu rzecznego, występowania susz oraz opadów rozlewnych i nawalnych, identyfikacji epizodów i okresów występowania wezbrań i niżówek w wodach powierzchniowych i podziemnych. Dostawa wody do badanych geoekosystemów jest regionalnie zróżnicowana i nawiązuje do położenia poszczególnych zlewni w różnych regionach fizycznogeograficznych Polski. Podstawowe znaczenie mają warunki termiczne i opadowe, które decydują m.in. o klimatycznym bilansie wodnym, czyli różnicy pomiędzy opadem i parowaniem terenowym. Klimatyczny bilans wodny warunkuje np. wielkość zasilania i odnawiania zasobów wód podziemnych, odpływ ze zlewni oraz funkcjonowanie świata roślinnego i zwierzęcego. Przedstawione zależności są bardzo ważne z praktycznego punktu widzenia, m.in. dla celów planowanych zmian struktury użytkowania terenu.

W oparciu o założenia metodologiczne i metodyczne ZMŚP sporządzano coroczne opracowania syntetyczne o stanie geoekosystemów Polski (Kruszyk 2003, 2004, 2005, 2006, 2009, 2010; Major 2007, 2008; Szpikowski 2011, 2012; Tylkowski 2013, 2014, 2015a, 2016; Tylkowski, Kostrzewski 2017, 2018; Majewski, Kostrzewski 2019, 2020, 2021). W początkowych opracowaniach (Zwoliński 1997; Kolander 1999; Kruszyk 2003; Mazurek, Zwoliński 2000, 2001, 2002) prezentowano głównie wyniki uzyskane przez Stacje Bazowe w ramach realizacji poszczególnych programów badawczych, a w mniejszym stopniu przedstawiano związki przyczynowo-skutkowe między komponentami środowiska przyrodniczego. Wykonywane od 2003 roku kompleksowe oceny stanu środowiska przyrodniczego stanowiły postęp w stosunku do pierwszych opracowań ZMŚP. Zwłaszcza wykonywane od 2011 roku coroczne opracowania zawierają informacje o aktualnym stanie, trendach wieloletnich oraz zagrożeniach rozwoju środowiska geograficznego.

Raport za 2021 rok, będący przedmiotem niniejszego opracowania, podobnie jak sprawozdania za lata 2011-2020 został sporządzony w oparciu o wybrane geowskaźniki ilościowe i jakościowe obiegu wody wprowadzone przez Szpikowskiego (2011) i uzupełnione przez Tylkowskiego (2016). Ponadto w opracowaniu wskazano trendy zmian w środowisku przyrodniczym badanych zlewni od 1994 roku, ze szczególnym uwzględnieniem zdarzeń ekstremalnych. Przedstawiono również stan środowiska wodnego w nawiązaniu do wybranych parametrów fizykochemicznych, uwzględnionych np. w Ramowej Dyrektywie Wodnej.

Uzyskane dotychczas w ramach ZMŚP wyniki mogą stanowić podstawę przedstawienia kierunków rozwoju badanych geoekosystemów, które reprezentują odmienne typy krajobrazu. Identyfikacja źródeł zagrożeń środowiska przyrodniczego obszarów monitorowanych w ramach programu ZMŚP jest ważna w kontekście działań ochronnych prowadzonych w ramach Europejskiej Sieci Ekologicznej NATURA 2000, gdyż zdecydowana większość zlewni ZMŚP (9 z 11) położonych jest w jej granicach.

Obecny zasób zebranych informacji i danych ZMŚP pozwala na aktualną ocenę stanu środowiska oraz na predykcję jego rozwoju. Centralna Baza Danych ZMŚP zawiera ponad 1,8 mln rekordów przedstawiających rzeczywiste, terenowe dane z okresu 1994-2021. Zgromadzone w bazie danych dane o krótkim interwale czasowym (dane dobowe i miesięczne) są istotne dla realizacji głównych założeń metodycznych ZMŚP, gdyż pozwalają na wprowadzanie i stosowanie geoindykatorów i bioindykatorów w ocenie jakości środowiska. Przedstawione założenia o charakterze metodologicznym i metodycznym stanowią podstawę prezentacji wyników realizowanego programu ZMŚP w 2021 roku. Szczegółowe informacje o programie ZMŚP znajdują się na stronie internetowej http://zmsp.gios.gov.pl.

2. ZLEWNIE BADAWCZE ZMŚP

Podstawowym obiektem badań w sieci Stacji Bazowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego są reprezentatywne dla poszczególnych regionów geograficznych eksperymentalne zlewnie rzeczne lub jeziorne. Przyjęta koncepcja funkcjonowania zlewni rzecznej, traktowanej jako geoekosystem (Kostrzewski 1993), określa indywidualność programu ZMŚP w porównaniu z branżowymi programami monitoringu. W poszczególnych zlewniach i ich otulinach zlokalizowane są powierzchnie testowe i profile badawcze oraz stanowiska pomiarowe. W 2021 roku komplementarne badania terenowe i analitykę laboratoryjną prowadzono wg standaryzowanych metod w 11 Stacjach Bazowych ZMŚP (Ryc. 1, Ryc. 2, Tab. 1, Tab. 2) (Kostrzewski, Majewski 2021).

Lokalizacja Stacji Bazowych ZMŚP uwzględnia zróżnicowanie krajobrazowe stref fizycznogeograficznych (Kondracki 2000, Solon i in. 2018) i krajobrazowych (Mizgajski, Stępniewska 2012; Kostrzewski i in. 2014) w Polsce oraz mezoregionów w odniesieniu do dominujących form pokrycia terenu (Łowicki, Mizgajski 2013) (Ryc. 1, Tab. 1).

Głównie uwarunkowania organizacyjne sprawiły, że lokalizacja Stacji Bazowych ZMŚP nie jest równomierna w poszczególnych strefach krajobrazowych. Najwięcej Stacji Bazowych ZMŚP położonych jest w strefie pojezierzy (Stacje Bazowe: Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie i Poznań-Morasko). Po dwie stacje znajdują się w strefie wyżyn (Stacje Bazowe: Łysogóry i Roztocze) oraz gór średnich (Stacje Bazowe: Beskid Niski i Karkonosze). Po jednej stacji występuje na wybrzeżu Morza Bałtyckiego, w obrębie nizin nadmorskich (Stacja Bazowa Wolin) i na obszarze nizin środkowopolskich (Stacja Bazowa Kampinos) (Ryc. 1).

Pod względem dominujących form pokrycia terenu w zlewniach ZMŚP występuje duże zróżnicowanie (Tab. 1). Najmniej przekształcone przez człowieka formy pokrycia terenu występują na terenie parków narodowych w zlewni Świerszcza i Wrzosówki (leśne) i jeziora Gardno (leśne i średnio nienaturalne). Nienaturalny i średnio zalesiony typ pokrycia terenu występuje w zlewni Kanału Olszowieckiego, natomiast w zlewni Wieńca i Bystrzanki dominuje pokrycie terenu w formie rolniczej i średnio nienaturalnej. Największym stopniem antropogenicznej przemiany pokrycia terenu cechują się zlewnie Strugi Toruńskiej oraz Czarnej Hańczy, które zakwalifikowano jako nienaturalne bądź rolnicze. Zlewnie Różanego Strumienia, górnej Parsęty i jeziora Łękuk charakteryzują się dużym zróżnicowaniem form pokrycia terenu, bez dominacji określonego typu.

Ryc. 1. Lokalizacja Stacji ZMŚP w strefach krajobrazowych Polski (Kostrzewski i in. 2014 zmienione)

Tab. 1. Charakterystyka położenia zlewni eksperymentalnych ZMŚP w strefach krajobrazowych i dominującej formy pokrycia terenu (Kostrzewski i in. 2014, zmienione)

Stacja ZMŚP	Zlewnia	Strefa krajobrazowa	Dominująca forma pokrycia terenu	Rok włączenia do sieci Stacji Bazowych ZMŚP
Wolin	jezioro Gardno	Morze Bałtyckie	leśna i średnio nienaturalna	2010
Parsęta	górna Parsęta	Pojezierza	zróżnicowana	1994
Puszcza Borecka	jezioro Łękuk	Pojezierza	zróżnicowana	1994
Wigry	Czarna Hańcza	Pojezierza	rolnicza	1994
Pojezierze Chełmińskie	Struga Toruńska	Pojezierza	rolnicza	1994
Poznań-Morasko	Różany Strumień	Pojezierza	zróżnicowana	2016
Kampinos	Kanał Olszowiecki	Niziny	nienaturalna i średnio leśna	1994
Łysogóry	Wieniec	Wyżyny	rolnicza i średnio nienaturalna	1994
Roztocze	Świerszcz	Wyżyny	leśna	2012
Beskid Niski	Bystrzanka	Góry średnie	rolnicza i średnio nienaturalna	1994
Karkonosze	Wrzosówka	Góry średnie	leśna	2016

Badane zlewnie eksperymentalne w systemie ZMŚP są różnej wielkości, o powierzchni mniejszej niż 100 km^2. Do największych powierzchniowo geoekosystemów należą zlewnie: górnej Parsęty (74,0 km^2), Świerszcza (46,5 km^2) i Strugi Toruńskiej (35,2 km^2). Z kolei najmniejsze w sieci ZMŚP są zlewnie Wieńca (1,3 km^2) i jeziora Gardno (2,4 km^2). Lokalizacja Stacji Bazowych ZMŚP uwzględnia zróżnicowanie struktury krajobrazowej kraju, a wytypowane zlewnie badawcze można uznać za reprezentatywne dla poszczególnych regionów geograficznych (Ryc. 2, Tab. 2).

Ryc. 2. Lokalizacja Stacji Bazowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w makroregionach fizycznogeograficznych Polski, (Kondracki 2000, zmienione)

WOLIN – *Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań*; PARSĘTA – *Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań*; PUSZCZA BORECKA – *Instytut Ochrony Środowiska PIB, Warszawa*; WIGRY – *Wigierski Park Narodowy, Krzywe*; POJEZIERZE CHEŁMIŃSKIE – *Uniwersytet M. Kopernika, Toruń*; POZNAŃ-MORASKO – *Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań*; KAMPINOS – *Kampinoski Park Narodowy, Izabelin*; ŁYSOGÓRY – *Uniwersytet J. Kochanowskiego, Kielce*; ROZTOCZE – *Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec*; BESKID NISKI – *Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Kraków;* KARKONOSZE – *Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra*

Tab. 2. Charakterystyka fizycznogeograficzna zlewni eksperymentalnych ZMŚP

Stacja Bazowa ZMŚP	Zlewnia	Powierzchnia [km^2]	Zlewnia/ Dorzecze	Mezoregion fizycznogeograficzny	Makroregion fizycznogeograficzny
Wolin	jezioro Gardno	2,4	Morze Bałtyckie	Uznam i Wolin	Pobrzeże Szczecińskie
Parsęta	Parsęta	74,0	Parsęta	Pojezierze Drawskie	Pojezierze Zachodniopomorskie
Puszcza Borecka	jezioro Łękuk	13,3	Węgorapa/ Pregoła	Pojezierze Ełckie	Pojezierze Mazurskie
Wigry	Czarna Hańcza	11,0	Niemen	Pojezierze Wschodniosuwalskie, Równina Augustowska	Pojezierze Litewskie
Pojezierze Chełmińskie	Struga Toruńska	35,5	Wisła	Pojezierze Chełmińskie	Pojezierze Chełmińsko-Dobrzyńskie, Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka
Poznań-Morasko	Różany Strumień	7,7	Warta/Odra	Pojezierza Poznańskie, Poznański Przełom Warty	Pojezierze Wielkopolskie
Kampinos	Kanał Olszowiecki	21,0	Łasica/Wisła	Kotlina Warszawska	Nizina Środkowo-Mazowiecka
Łysogóry	Wieniec	1,3	Kamienna/Wisła	Góry Świętokrzyskie	Wyżyna Kielecka
Roztocze	Świerszcz	46,5	Wieprz/Wisła	Roztocze Zachodnie/ Roztocze Środkowe	Roztocze
Beskid Niski	Bystrzanka	13,0	Ropa/Wisła	Beskid Niski	Beskidy Środkowe
Karkonosze	Wrzosówka	11,5	Kamienna/Odra	Karkonosze	Sudety Zachodnie

W aktualnym rozmieszczeniu Stacji Bazowych ZMŚP można wyróżnić trzy transekty południkowe, które ujmują równoleżnikowy układ głównych stref krajobrazowych Polski:

1. Transekt zachodni: strefa młodoglacjalna Niżu Polskiego (Stacje Bazowe: Wolin, Parsęta, Poznań-Morasko), strefa górska (Stacja Bazowa Karkonosze).
2. Transekt środkowy: strefa młodoglacjalna Niżu Polskiego (Stacja Bazowa Pojezierze Chełmińskie), strefa staroglacjalna Niżu Polskiego (Stacja Bazowa Kampinos), strefa wyżynna (Stacja Bazowa Łysogóry), strefa górska (Stacja Bazowa Beskid Niski).
3. Transekt wschodni: strefa młodoglacjalna Niżu Polskiego (Stacje Bazowe: Wigry i Puszcza Borecka), strefa wyżynna (Stacja Bazowa Roztocze).

W układzie równoleżnikowym wyróżnić można także trzy transekty, które odzwierciedlają strefowość krajobrazową naszego kraju, a mianowicie:

1. W strefie wybrzeża i młodoglacjalnej Niżu Polskiego można wyznaczyć transekt obejmujący Stacje Bazowe: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry.
2. Drugi transekt obejmuje strefę nizin środkowych i wysoczyzn, Stacje: Poznań-Morasko, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos.
3. Kolejny transekt równoleżnikowy, w zasięgu strefy gór i wyżyn, obejmuje Stacje: Karkonosze, Łysogóry i Roztocze.

W strefie wybrzeża i młodoglacjalnej Niżu Polskiego położone są następujące zlewnie ZMŚP: jeziora Gardno (Stacja Bazowa Wolin), górnej Parsęty (Stacja Bazowa Parsęta), jeziora Łękuk (Stacja Bazowa Puszcza Borecka), Czarnej Hańczy (Stacja Bazowa Wigry), Strugi Toruńskiej (Stacja Bazowa Pojezierze Chełmińskie) i Różanego Strumienia (Stacja Bazowa Poznań-Morasko). Pierwsze cztery spośród wymienionych zlewni są w niewielkim stopniu przekształcone antropogenicznie, natomiast ostatnie dwie stacje (Pojezierze Chełmińskie i Poznań-Morasko) podlegają znacznej antropopresji (odpowiednio: rolniczej i miejskiej).

Zlewnia jeziora Gardno (Stacja Bazowa Wolin) reprezentuje geoekosystem nadmorski, położony na wyspie Wolin, na obszarze Wolińskiego Parku Narodowego. Zlewnia jeziora Gardno położona jest w zasięgu mikroregionu Pasma Wolińskiego. Indywidualnością geograficzną badanej zlewni jest jej nadmorskie położenie w bezpośrednim sąsiedztwie wybrzeża klifowego, w strefie klimatu umiarkowanego, w zasięgu rzeźby terenu o charakterze młodoglacjalnym, gdzie występują znaczne deniwelacje i spadki terenu. Cechą charakterystyczną obszaru badań jest brak odpływu powierzchniowego, niemal całkowite zalesienie zlewni z dominacją drzewostanu bukowego, duży udział aerozoli morskich w obiegu wody i materii rozpuszczonej oraz względnie mała antropopresja. Wskazane cechy fizycznogeograficzne pozwalają uznać badaną zlewnię ZMŚP jeziora Gardno jako zlewnię reprezentatywną dla podobnych obiektów położonych w nadmorskiej strefie młodoglacjalnej Polski (Tylkowski i in. 2022).

Zlewnia górnej Parsęty, będąca obiektem badań Stacji Bazowej Parsęta, położona jest w obrębie Pomorza Środkowego, w mezoregionie Pojezierza Drawskiego. Zlewnia cechuje się rzeźbą strefy młodoglacjalnej, zróżnicowaną pod względem morfolitologicznym, cechami klimatu umiarkowanego i stosunkowo niewielkim stopniem przekształceń antropogenicznych, które w niewielkim stopniu wpływają na funkcjonowanie środowiska przyrodniczego. Można ją uznać za reprezentatywną dla obszarów młodoglacjalnych umiarkowanej strefy klimatycznej (Szpikowski i in. 2022).

Szczególną lokalizację w północnym pasie pojezierzy posiada Stacja Bazowa Puszcza Borecka, położona w strefie młodoglacjalnej z charakterystycznym zespołem form polodowcowych. Indywidualnością Stacji jest brak większych lokalnych źródeł zanieczyszczeń. Badania jakości powietrza i wód docierających do podłoża zlewni jeziora Łękuk oraz zebrane dane pomiarowe dostarczają informacji na temat dostawy i depozycji składników będących efektem transportu transgranicznego oraz ich wpływu na funkcjonowanie ekosystemów leśnych i jeziornych. Na tym terenie występuje większość podstawowych zespołów leśnych, typowych dla klimatu umiarkowanego północno-wschodniej Polski.

Zlewnia badawcza Stacji Bazowej Wigry jest zlewnią różnicową Czarnej Hańczy, ograniczoną dwoma profilami pomiarowymi. Krajobraz zlewni określają utwory i formy lodowcowe oraz wodnolodowcowe z okresu recesji lądolodu podczas fazy pomorskiej. Obszar ten ma najsurowsze warunki klimatyczne w całej nizinnej części kraju. Zlewnia eksperymentalna odznacza się niezwykle wysoką wartością przyrodniczą, zwłaszcza ze względu na bogate i zróżnicowane florystycznie zespoły roślinne występujące głównie na dnie podmokłej doliny. Tereny wzdłuż rzeki zajmuje kompleks torfowisk niskich i przejściowych, z których wiele zachowało swój pierwotny charakter. Charakterystyczną cechą zlewni badawczej jest jej znaczny stopień bezodpływowości (Krzysztofiak i in. 2022).

Zlewnia Strugi Toruńskiej na terenie Stacji Bazowej Pojezierze Chełmińskie reprezentuje młodoglacjalny geoekosystem przeobrażony rolniczo, silnie zagrożony obszarowymi zanieczyszczeniami rolniczymi, zanieczyszczeniami powietrza z pobliskich szlaków komunikacyjnych oraz emitowanymi przez zakłady produkcyjne Torunia i Bydgoszczy. W krajobrazie zlewni dominują kompleksy pól uprawnych, na których prowadzona jest wielkołanowa i wysokotowarowa produkcja rolnicza. Cały obszar jest prawie bezleśny i silnie zmeliorowany. Zlewnia Strugi Toruńskiej jest reprezentatywna dla krajobrazów pojeziernych ostatniego zlodowacenia bałtyckiego. Jej indywidualnością jest znacząca antropopresja, intensywne rolnictwo oraz brak lasów. Zlewnia jest położona w strefie podmiejskiej Torunia i podlega coraz większej presji ze strony rozbudowującego się miasta oraz rozwoju sieci transportowej (Kejna i in. 2022).

Zlewnia Różanego Strumienia, będąca obiektem badań Stacji Bazowej Poznań-Morasko, reprezentuje typowy krajobraz młodoglacjalny i znajduje się w obrębie strefy marginalnej stadiału poznańskiego zlodowacenia bałtyckiego. Analizowany obszar charakteryzuje się znacznymi deniwelacjami, przekraczającymi 100 m. Indywidualnością geograficzną badanej zlewni jest jej położenie w granicach aglomeracji miasta Poznania, co

pozwala na uzyskanie danych charakteryzujących skalę i dynamikę przemian zlewni rzecznych w wyniku gospodarczej działalności człowieka. Środowisko przyrodnicze zlewni charakteryzuje się znacznymi przekształceniami będącymi rezultatem działalności człowieka. Do najważniejszych problemów środowiskowych istniejących na obszarze zlewni należy zaliczyć zagrożenie związane z zanieczyszczeniem wód powierzchniowych i podziemnych na skutek nieuporządkowanej gospodarki wodno-ściekowej (Major i in. 2022).

Krajobraz staroglacjalny Polski centralnej reprezentowany jest przez zlewnię Kanału Olszowieckiego (Stacja Bazowa Kampinos), położoną w obrębie Puszczy Kampinoskiej, gdzie dominuje geoekosystem bagienno-łąkowy w różnych fazach naturalnej sukcesji. Zlewnia położona jest w zabagnionym obniżeniu, wypełnionym utworami organicznymi, Obszar ten znajduje się pod wpływem zanieczyszczeń atmosferycznych z Warszawy oraz w mniejszym stopniu zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego z Równiny Łowicko-Błońskiej (Olszewski i in. 2022).

Stacja Bazowa Łysogóry obejmuje badaniami zlewnię leśno-rolniczą Wieńca w Górach Świętokrzyskich, w masywie Łysogór. Zlewnia pozostaje w strefie oddziaływania lokalnych, jak i ponadregionalnych emisji przemysłowych, co spowodowało już niekorzystne zmiany w ekosystemach leśnych, m.in. w drzewostanach jodłowych. Indywidualność zlewni określona jest głównie rzeźbą Gór Świętokrzyskich, co powoduje, że panujące tu warunki dużej wilgotności powietrza, dość wysokich sum rocznych opadów oraz stosunkowo długich okresów z małą prędkością wiatru i częstymi ciszami atmosferycznymi. Takie warunki stwarzają możliwość nierzadkiego i długotrwałego bezpośredniego oddziaływania mas powietrza atmosferycznego nasyconego emisjami przemysłowymi i komunikacyjnymi na elementy hylo-, pedo- i hydrosfery (Jóźwiak i in. 2022).

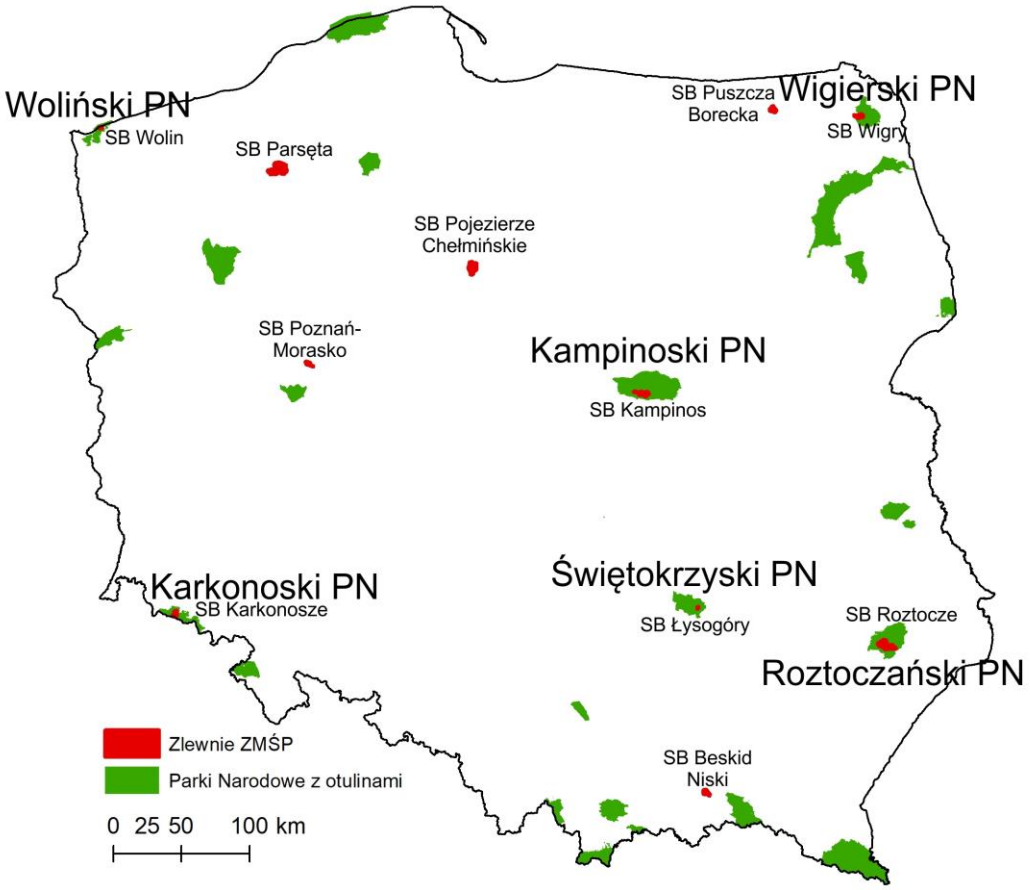
Stacja Bazowa Roztocze realizuje badania w wyżynnej zlewni śródleśnego cieku – Świerszcza, położona jest w mezoregionach Roztocza Środkowego i Roztocza Zachodniego. Strefa źródliskowa Świerszcza zlokalizowana jest w obszarze mokradłowym, w systemie borów bagiennych oraz torfowisk wysokich o ombrofilnym charakterze gospodarki wodnej. Strumień Świerszcz na przeważającej długości biegu ma naturalny charakter i przecina stare drzewostany olchowe, sosnowe i jodłowe. Powierzchnia zlewni charakteryzuje się urozmaiconą rzeźbą terenu, mozaiką środowisk oraz słabym zaludnieniem z rozproszoną zabudową. Dominującym typem siedliska w zlewni są lasy (pochodzenia naturalnego oraz ukształtowane antropogenicznie, tworzące mozaikę zespołów roślinnych) (Stachyra i in. 2022).

Stacja Bazowa Beskid Niski, zlokalizowana w zlewni Bystrzanki, reprezentuje geoekosystem części Karpat Fliszowych, który w coraz mniejszym stopniu narażony jest na napływ zanieczyszczeń atmosfery, m.in. w wyniku likwidacji zakładów przemysłowych w Gorlicach. Monitoring w Stacji Bazowej Beskid Niski uwzględnia specyfikę wynikającą z występowania piętrowości klimatycznej i roślinnej oraz z natężenia procesów oraz zjawisk przyrodniczych charakterystycznych dla Karpat Fliszowych, m.in. ruchów osuwiskowych i procesów erozji wodnej gleb (Kijowska-Strugała i in. 2022).

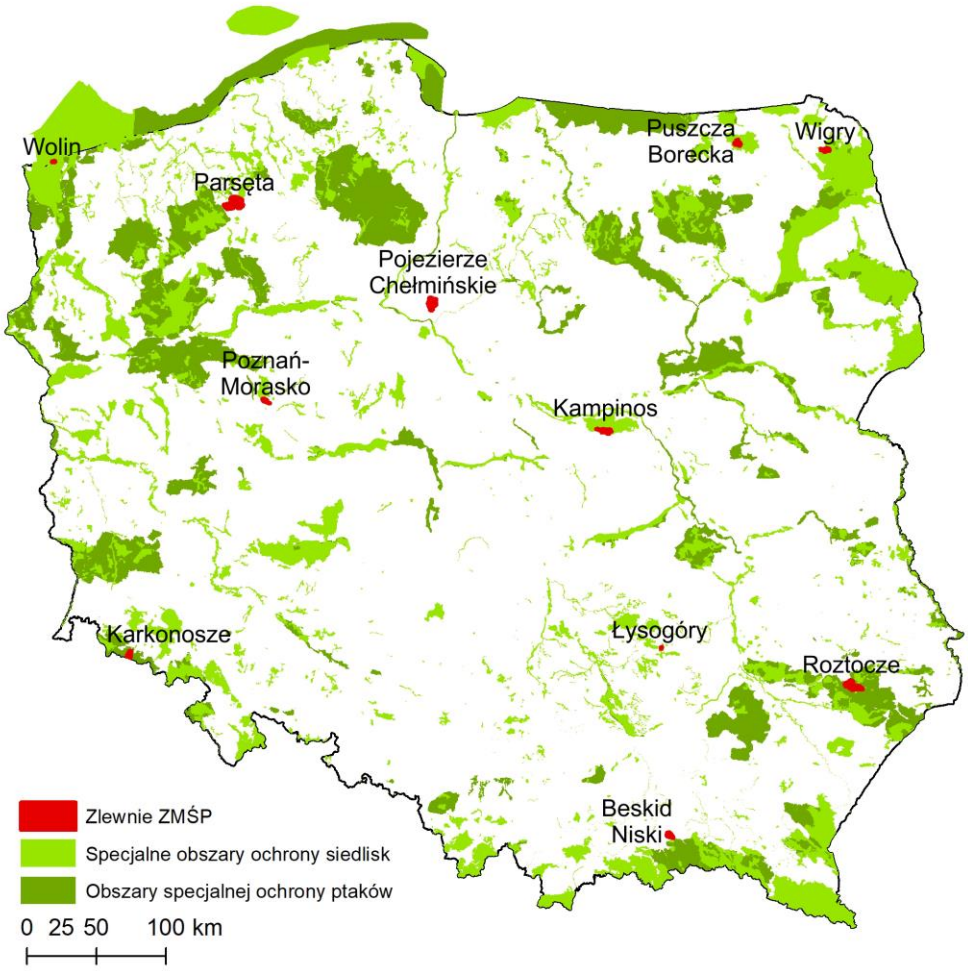
Stacja Bazowa Karkonosze położona w zlewni Wrzosówki reprezentuje krajobraz gór średnich. W zlewni występuje duża różnorodność ekosystemów, siedlisk i zbiorowisk roślinnych, charakteryzujących się typową dla obszarów górskich piętrowością. Piętro regla dolnego porośnięte jest lasami o strukturze siedliskowej i gatunkowej typowej dla całego obszaru Sudetów. Należą do nich siedliska leśne m.in. kwaśnej buczyny sudeckiej oraz boru świerkowo-jodłowego, odtwarzane obecnie drogą restytucji jodły pospolitej. Zlokalizowane są tu cenne ekosystemy łąkowe. Regiel górny porasta górnoreglowa świerczyna sudecka, urozmaicona licznymi stokowymi torfowiskami przejściowymi. Zlewnia Wrzosówki jest reprezentatywna dla całego obszaru Karkonoszy i łączy w sobie elementy górskie oraz borealne (Krakowski i in. 2022).

3. ZLEWNIE BADAWCZE ZMŚP A OBSZARY SZCZEGÓLNIE CENNE PRZYRODNICZO: PARKI NARODOWE I SIEĆ NATURA 2000

Sześć zlewni ZMŚP położonych jest w Parkach Narodowych: Wolińskim, Wigierskim, Kampinoskim, Świętokrzyskim, Roztoczańskim i Karkonoskim (Ryc. 3). Lokalizacja Stacji Bazowych ZMŚP na terenie parków narodowych zabezpiecza ich funkcjonowanie w zakresie uzyskiwania wieloletnich serii obserwacyjnych. Dziewięć zlewni badawczych ZMŚP położonych jest na obszarach włączonych do sieci Natura 2000 (Ryc. 4). Położenie zlewni ZMŚP w obszarach cennych przyrodniczo zwiększa znaczenie programu ZMŚP w zadaniach dotyczących m.in. ochrony wartościowych siedlisk, zachowania dobrych warunków dla ochrony fauny i flory m.in. dziko żyjących ptaków (Dyrektywa 2009/147/WE, tzw. Dyrektywa Ptasia oraz Dyrektywa 92/43/EWG, tzw. Dyrektywa Siedliskowa). W związku z powyższym program ZMŚP może być także wykorzystany do oceny oddziaływań i zagrożeń w programie Natura 2000.



Ryc. 3. Lokalizacja Stacji Bazowych ZMŚP w Parkach Narodowych Polski

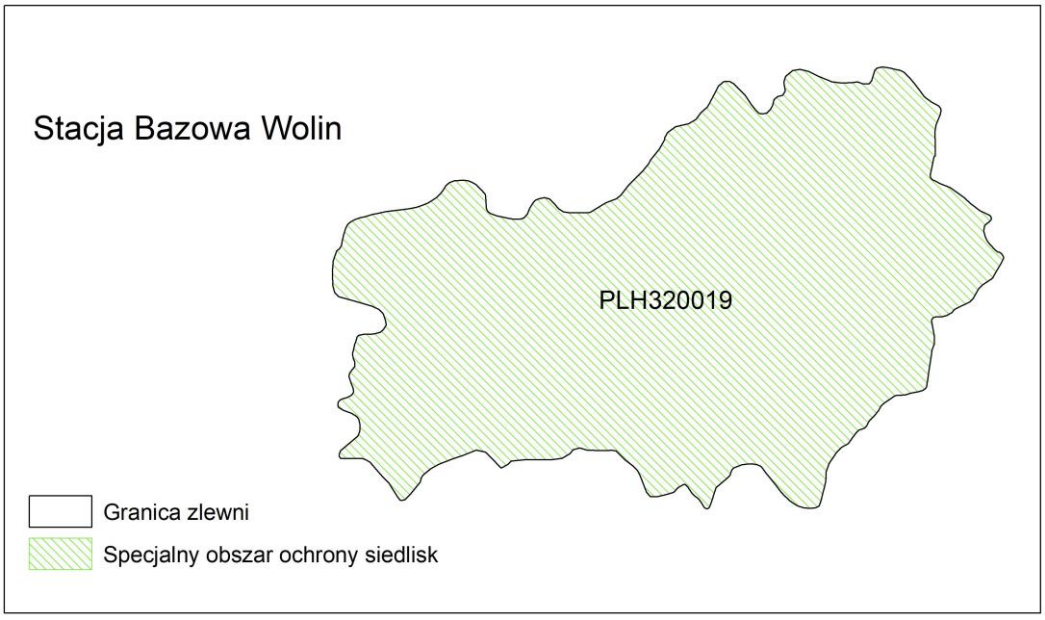


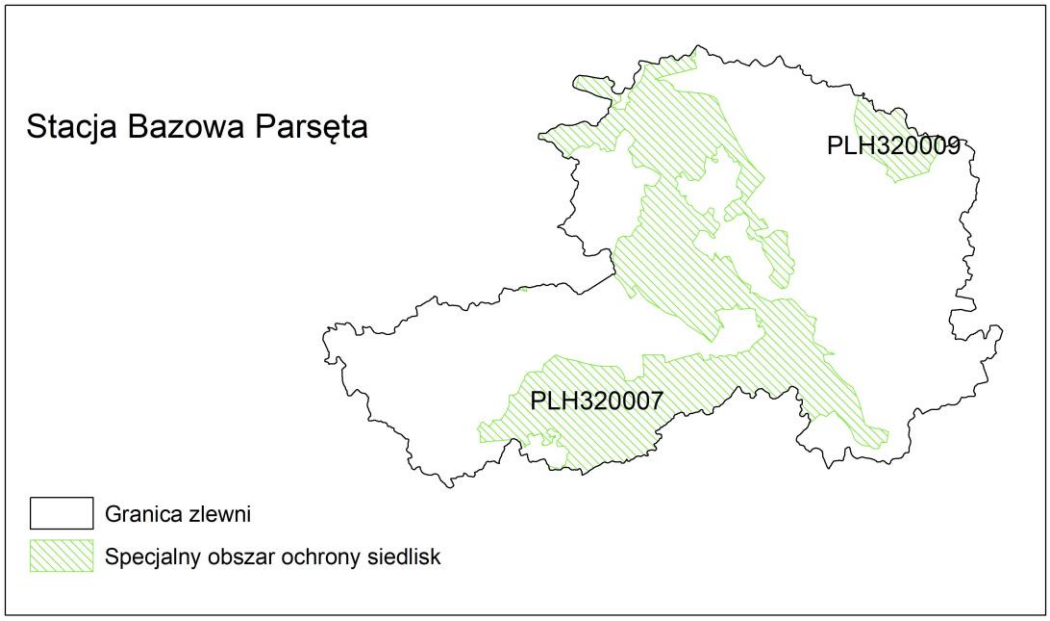
Ryc. 4. Lokalizacja zlewni badawczych ZMŚP na tle Obszarów Natura 2000 w Polsce

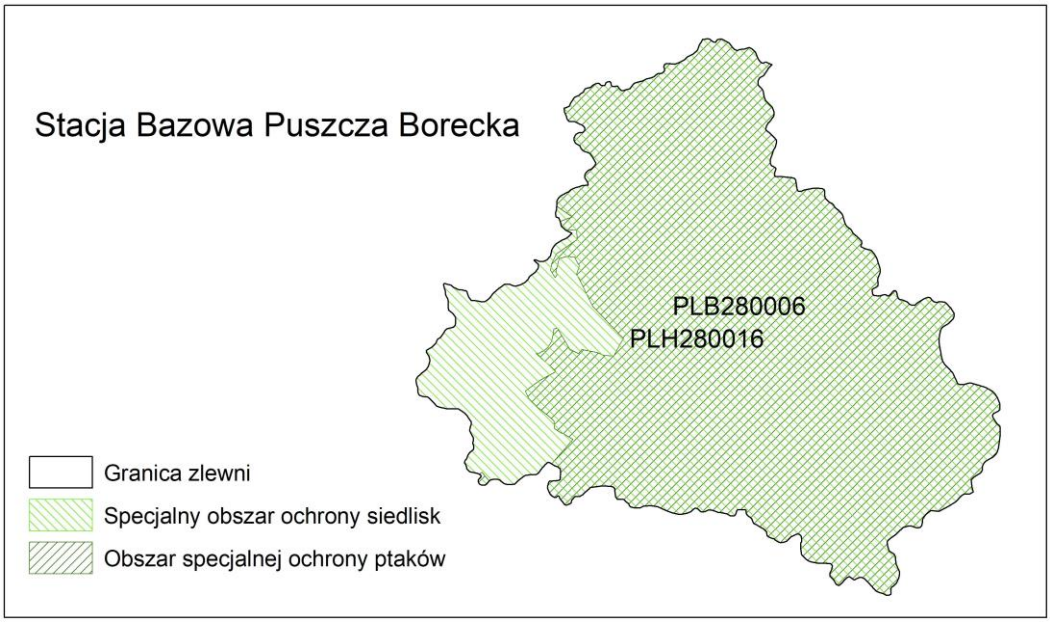
Spośród jedenastu Stacji Bazowych ZMŚP aż dziewięć jest położonych całkowicie albo częściowo na obszarach Natura 2000. Jedynie zlewnie Strugi Toruńskiej i Różanego Strumienia są położone poza granicami obszarów Natura 2000:

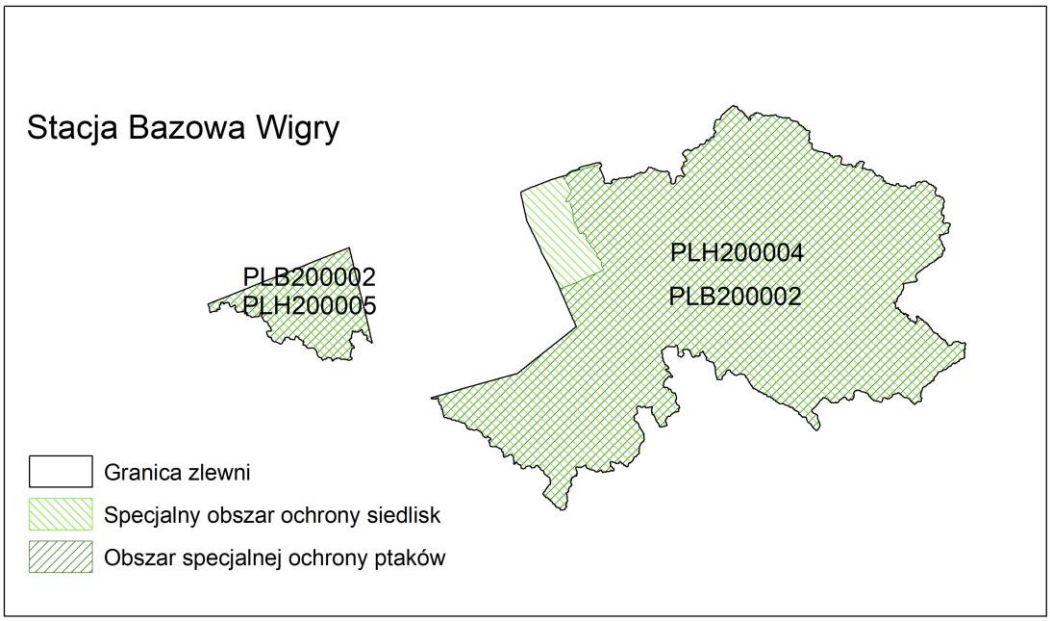
1. Zlewnia jeziora Gardno w Białej Górze położona jest całkowicie w Wolińskim Parku Narodowym oraz w granicach obszaru Natura 2000 *Wolin i Uznam (PLH320019)* (Ryc. 5).
2. Około 33,5% powierzchni zlewni górnej Parsęty (Stacja Bazowa Parsęta) wchodzi w skład Obszaru Natura 2000 *Dorzecze Parsęty (PLH320007) i Jeziora Szczecineckie (PLH 320009)* (Ryc. 5).
3. Zlewnia jeziora Łękuk monitorowana przez Stację Bazową Puszcza Borecka w około 80% położona jest w granicach obszaru Natura 2000 *Puszcza Borecka (PLH280006) i Ostoja Borecka (PLH280016)* (Ryc. 5).

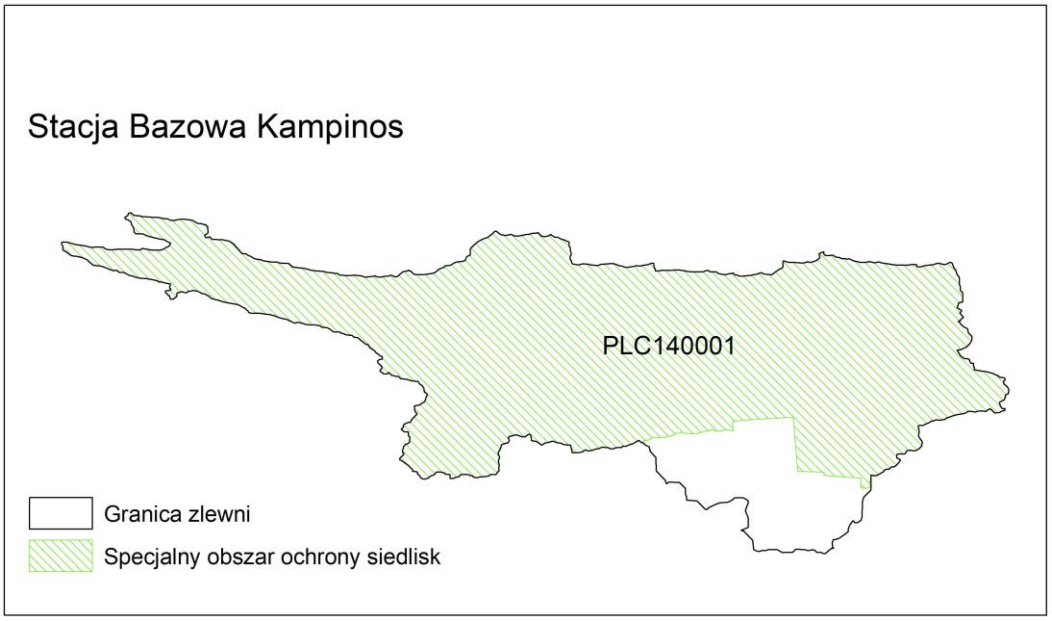
4. Zlewnia Czarnej Hańczy, objęta monitoringiem Stacji Bazowej Wigry, wchodzi w około 80% w skład obszaru Natura 2000 *Ostoja Wigierska (PLH200004)* (Ryc. 5). Ponadto ok. 65% powierzchni zlewni znajduje się w Wigierskim Parku Narodowym.
5. Zlewnia Kanału Olszowieckiego (Stacja Bazowa Kampinos) w około 90% położona jest na terenie obszaru Natura 2000 *Puszcza Kampinoska (PLC140001)* oraz w Kampinoskim Parku Narodowym (Ryc. 5).
6. Około 70% zlewni badawczej Wieńca (Stacja Bazowa Łysogóry) leży w granicach obszaru Natura 2000 *Łysogóry (PLH260002)* oraz na terenie Świętokrzyskiego Parku Narodowego (Ryc. 5).
7. Zlewnia Świerszcza monitorowana przez Stację Bazową Roztocze w około 40% leży w granicach Roztoczańskiego Parku Narodowego i jednocześnie w obszarze o znaczeniu wspólnotowym sieci Natura 2000 *Roztocze Środkowe PLH060017*. Pozostała część zlewni położona jest w granicach otuliny parku narodowego. W całości zlewnia Świerszcza znajduje się na obszarze specjalnej ochrony ptaków Natura 2000 *Roztocze PLB060012* (Ryc. 5).
8. Zlewnia Wrzosówki (Stacja Bazowa Karkonosze) położona jest w całości w Karkonoskim Parku Narodowym i jego otulinie oraz na obszarach Natura 2000: *Karkonosze PLH020006* i *Karkonosze PLB020007* (Ryc. 5).
9. W granicach zlewni Bystrzanki, monitorowanej przez Stację Bazową Beskid Niski, znajduje się bardzo mały fragment obszaru Natura 2000 *Wisłoka z dopływami PLH 180052*.

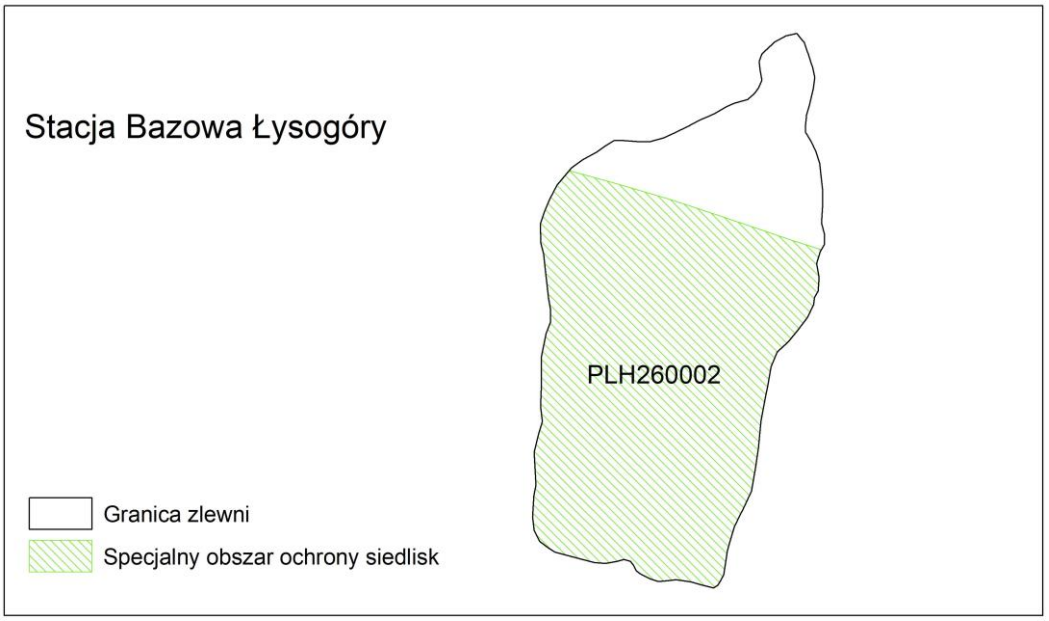


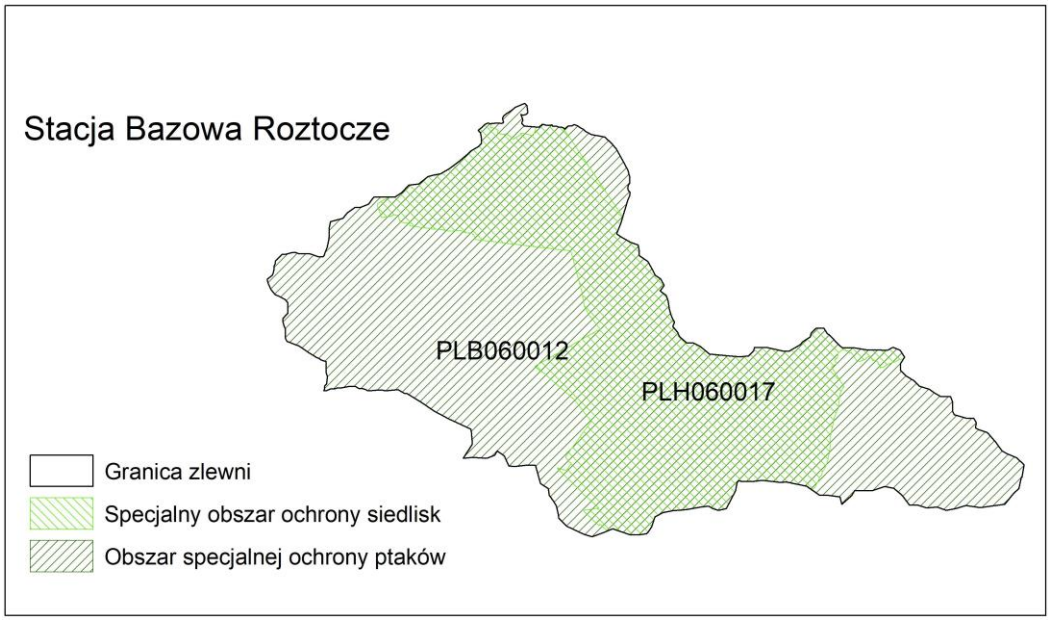

Stacja Bazowa Parsęta
PLH320009
PLH320007
Granica zlewni
Specjalny obszar ochrony siedlisk

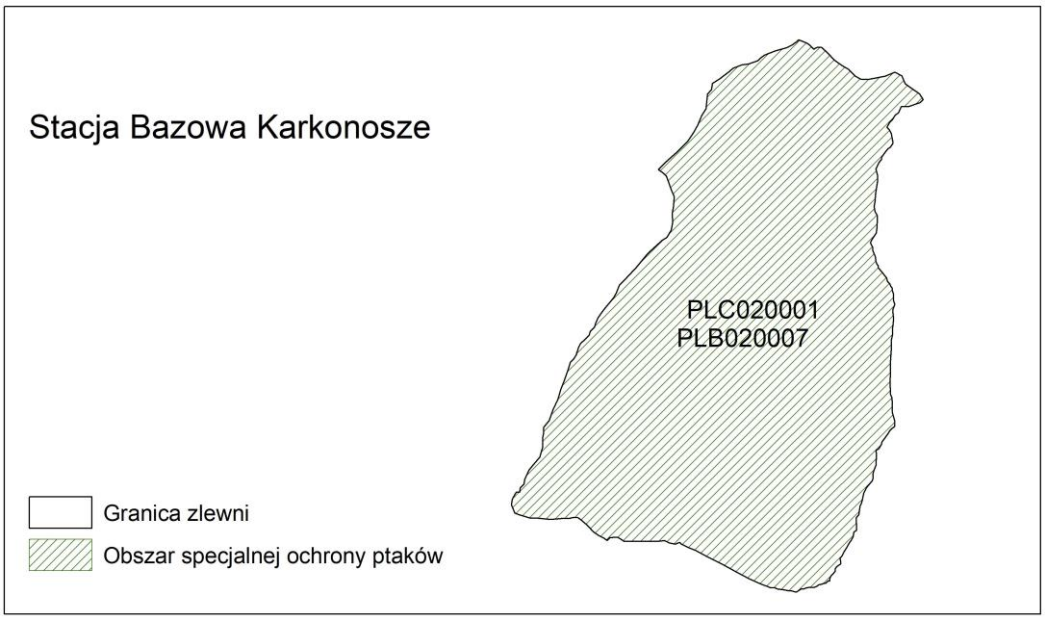

Stacja Bazowa Puszcza Borecka
PLB280006
PLH280016
Granica zlewni
Specjalny obszar ochrony siedlisk
Obszar specjalnej ochrony ptaków


Stacja Bazowa Wigry
PLB200002
PLH200005
PLH200004
PLB200002
Granica zlewni
Specjalny obszar ochrony siedlisk
Obszar specjalnej ochrony ptaków


Stacja Bazowa Kampinos
PLC140001
Granica zlewni
Specjalny obszar ochrony siedlisk


Stacja Bazowa Łysogóry
PLH260002
Granica zlewni
Specjalny obszar ochrony siedlisk


Stacja Bazowa Roztocze
PLB060012
PLH060017
Granica zlewni
Specjalny obszar ochrony siedlisk
Obszar specjalnej ochrony ptaków



Ryc. 5. Położenie zlewni Stacji Bazowych ZMŚP w zasięgu Obszarów Natura 2000

Z powyższego zestawienia wynika, że zlewnie badawcze Stacji Bazowych ZMŚP mogą w zasadniczy sposób wspierać krajowy system ochrony przyrody w ramach sieci Natura 2000. W przypadku zdecydowanej większości siedlisk Natura 2000, struktura i ich funkcjonowanie, jak również utrzymanie ich właściwego stanu ochrony zależy od zbadania dynamiki procesów i zjawisk zachodzących naturalnie i warunkowanych antropogenicznie. Monitoring biologicznych zasobów ekologicznej sieci Natura 2000 odbywa się na podstawie metodyk opublikowanych przez GIOŚ i jest wykonywany przez m.in. GIOŚ, RDOŚ i parki narodowe (http://siedliska.gios.gov.pl/pl/monitoring/metodyka). Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego dysponuje danymi naukowymi, które są systematycznie zbierane z wykorzystaniem metod obserwacyjno-pomiarowych i są niezbędne do opisu czynników warunkujących stan siedlisk. Przykładowo, w przypadku siedliska 1230 Klify na wybrzeżu Bałtyku do fundamentalnych czynników warunkujących stan tego siedliska należą m.in. bardzo liczne procesy generowane m.in. warunkami hydrometeorologicznymi, jak erozje, w tym: wietrzna (deflacja, akumulacja), wodna (powierzchniowa, liniowa) i wodno-grawitacyjna (osuwiska, obrywy, osiadania, spełzywania, spływy). Prowadzone w zlewniach badania posiadają ważne znaczenie dla osiągnięcia podstawowych celów projektu Natura 2000, zachowania dziedzictwa przyrodniczego Polski oraz kształtowania polityki zrównoważonego rozwoju (Herbich 2003).

4. PROGRAM BADAWCZO-POMIAROWY STACJI BAZOWYCH ZMŚP

W 2021 roku Stacje Bazowe ZMŚP realizowały pełen zakres programów pomiarowych ZMŚP (Tab. 3). Niektóre programy wykonywane były we współpracy z jednostkami zewnętrznymi np. program zanieczyszczenia powietrza z przedsiębiorstwem Propagator z Krakowa.

Pełen zakres pomiarowy realizowany był w tych Stacjach Bazowych, w których występowały określone w programie ZMŚP komponenty środowiska przyrodniczego (Tab. 3). W Stacji Pojezierze Chełmińskie w zlewni Strugi Toruńskiej ze względu na brak zwartej powierzchni leśnej nie wykonywano programów: chemizm opadu podkoronowego, chemizm spływu po pniach, opad organiczny oraz uszkodzenia drzew i drzewostanów. W 2021 roku program C3 chemizm spływu po pniach po raz pierwszy był realizowany we wszystkich pozostałych 10 zlewniach. We wcześniejszych latach program ten był wykonywany jedynie na powierzchniach badawczych z dominacją drzewostanu liściastego. Program H2 wody powierzchniowe – jeziora wykonywany był w zlewniach zawierających zbiorniki jeziorne, tylko w stacjach położonych w strefie młodoglacjalnej Polski: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka i Pojezierze Chełmińskie. W Stacji Puszcza Borecka ze względu na brak odpowiedniego cieku nie wykonywano programu H1 wody powierzchniowe – rzeki. Sześć Stacji Bazowych (Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko, Kampinos, Beskid Niski, Karkonosze) zrealizowała jako nieobowiązkowy program E1 – Gleby w zakresie przewidzianym do realizacji przez Stacje Bazowe (pomiary pH i przewodności).

W 2021 roku w Stacjach Bazowych ZMŚP wykonywane były przez ekspertów ZMŚP programy specjalistyczne, które dotyczyły określenia stanu środowiska przyrodniczego, głównie w odniesieniu do programów biotycznych realizowanych w różnych interwałach czasowych. Na wszystkich Stacjach zrealizowano programy Metale ciężkie i siarka w porostach D1 oraz Metale ciężkie i siarka w mchach (zadanie 6 umowy ZMŚP – dr hab. Małgorzata Jóźwiak, Europejski Instytut Kształcenia Podyplomowego EIPOS w Kielcach). Program Gleby E1, realizowany raz na 10 lat w danej zlewni, wykonano w Stacjach Wolin i Karkonosze (zadanie 7. umowy ZMŚP – prof. dr hab. Jolanta Komisarek, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu). W czterech Stacjach ZMŚP: Wolin, Parsęta, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos wykonano Program I1 Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznego, który realizowany jest raz na 3 lata w danej zlewni (zadanie 5. umowy ZMŚP prof. dr hab. Krzysztof Szoszkiewicz, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu). Natomiast program Ocena usług geoekosystemów, realizowany również raz na

3 lata w danej zlewni, (zadanie 10. umowy ZMŚP dr Piotr Lupa, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu) zrealizowano w czterech Stacjach Bazowych: Wigry, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos (Tab. 4).

Tab. 3. Podstawowy program pomiarowy realizowany przez Stacje Bazowe ZMŚP w 2021 r.

Program pomiarowy	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Meteorologia A1											
Zanieczyszczenie powietrza B1											
Chemizm opadów atmosferycznych C1											
Chemizm opadu podkoronowego C2											
Chemizm spływu po pniach C3											
Gleby E1*											
Chemizm roztworów glebowych F1											
Wody podziemne F2											
Opad organiczny G2											
Wody powierzchniowe – rzeki H1											
Wody powierzchniowe – jeziora H2											
Gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny J3											
Uszkodzenia drzew i drzewostanów K1											

	zrealizowany przez Stacje		nierealizowany – brak w zlewni danego komponentu środowiska geograficznego
	zrealizowany we współpracy z jednostkami zewnętrznymi		niezrealizowany – awaria, brak sprzętu, lub inne przyczyny

***** realizacja programu E1 przez Stacje Bazowe w roku 2021 miała charakter przygotowawczy. Realizacja w pełnym zakresie zgodnym z metodyką jest obowiązkowa od 2022 r.

Tab. 4. Programy badawczo-pomiarowe ZMŚP zrealizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP przez Ekspertów ZMŚP w 2021 roku

Program pomiarowy	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Metale ciężkie i siarka w porostach D1											
Metale ciężkie i siarka w mchach D2											
Gleby E1											
Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznego I1											
Ocena usług geoekosystemów											

	zrealizowany przez Eksperta ZMŚP		programy będą realizowane w kolejnych latach zgodnie z harmonogramem

W tabeli 5. przedstawiono programy i parametry pomiarowe zrealizowane w 2021 roku przez Stacje ZMŚP, zarówno w ramach zakresu obligatoryjnego jak i rozszerzonego. Zrealizowano 13 programów ZMŚP, wśród których badano 126 parametrów podstawowych i 49 parametrów rozszerzonych.

Tab. 5. Zakres programów i parametrów pomiarowych ZMŚP wykonanych w Stacjach Bazowych w 2021 roku

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
METEOROLOGIA A1	Zakres obligatoryjny			
	ciśnienie atmosferyczne (zredukowane do poziomu morza)	PRES	pomiar ciągły/średnia dobowa	Wszystkie stacje
	temperatura powietrza na 2 m	TA_D	pomiar ciągły/średnia dobowa	
	minimalna temperatura powietrza na 2 m	TA_N	pomiar ciągły/minimalna dobowa	
	maksymalna temperatura powietrza na 2 m	TA_X	pomiar ciągły/maksymalna dobowa	
	temperatura minimalna powietrza przy powierzchni gruntu (na 5 cm nad gruntem)	TA_G	pomiar ciągły/minimalna dobowa	
	temperatura gruntu na głębokościach 5, 10, 20 i 50 cm	T_S	pomiar ciągły/średnia dobowa	
	wilgotność względna powietrza na 2 m	HH	pomiar ciągły/średnia dobowa	
	wysokość opadów na 1 m	RR_T	1/dobę/suma	
	prędkość wiatru na 10 m	WIV	pomiar ciągły/średnia dobowa	
	kierunek wiatru na 10 m	WID	pomiar ciągły/wartość modalna	
	grubość pokrywy śnieżnej	SC_H	1/dobę	
	usłonecznienie	SOL_P	pomiar ciągły/suma dobowa	
	natężenie promieniowania słonecznego	SOL_T_S	pomiar ciągły/suma dobowa ze średnich godzinnych	
	Zakres rozszerzony			
	czas trwania opadów	RR_P	rejestracja ciągła	Puszcza Borecka

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
ZANIECZYSZCZENIE POWIETRZA B1	Zakres obligatoryjny			
	siarka w dwutlenku siarki S-SO_2 (oznaczana metodą pasywną)	SO2S_P	1/miesiąc	Wszystkie stacje
	azot w dwutlenku azotu N-NO_2 (oznaczana metodą pasywną)	NDON_P		
	Zakres rozszerzony			
	siarka w dwutlenku siarki S-SO_2 (metoda manualna lub automatyczna)	SO2S	1/dobę	Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Beskid Niski
	azot w dwutlenku azotu N-NO_2 (metoda manualna lub automatyczna)	NDON		
	ozon O_3	O3		Puszcza Borecka, Kampinos, Roztocze
	azot azotanowy [HNO_3(g)+NO_3(a)]	NO3N_T		Puszcza Borecka
	azot amonowy [NH_3(g)+NH_4(a)]	NH4N_T		
	dwutlenek węgla CO_2	CO2		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	pył zawieszony	PM10		Pojezierze Chełmińskie
CHEMIZM OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH C1	Zakres obligatoryjny			
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND	12/rok z próbek dobowych lub tygodniowych	Wszystkie stacje
	odczyn (pH)	PH		
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	azot azotanowy N-NO_3	NO3N		
	azot amonowy N-NH_4	NH4N		
	chlorki Cl	CL		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	Zakres rozszerzony			
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT	12/rok z próbek dobowych lub tygodniowych	Puszcza Borecka
	kadm Cd	CD		
	miedź Cu	CU		
	ołów Pb	PB		
	mangan Mn	MN		
	żelazo Fe	FE		
	cynk Zn	ZN		
	nikiel Ni	NI		
	arsen As	AS		
	chrom Cr	CR		
	glin Al	AL		Puszcza Borecka, Łysogóry

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
CHEMIZM OPADU PODKORONOWEGO C2	Zakres obligatoryjny			
	opad podkoronowy	RR_TF	12/rok	Wszystkie stacje oprócz Pojezierza Chełmińskiego (brak powierzchni leśnej)
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND	12/rok z próbek tygodniowych	
	odczyn (pH)	PH		
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	azot azotanowy N-NO_3	NO3N		
	azot amonowy N-NH_4	NH4N		
	chlorki Cl	CL		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	Zakres rozszerzony			
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT	12/rok z próbek tygodniowych	Puszcza Borecka
	mangan Mn	MN		Puszcza Borecka, Łysogóry
	żelazo Fe	FE		
	glin Al	AL		
CHEMIZM SPŁYWU PO PNIACH C3	Zakres obligatoryjny			
	spływ po pniach	RR_SF	12/rok	Wszystkie stacje oprócz Pojezierza Chełmińskiego (brak powierzchni leśnej)
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND	12/rok z próbek tygodniowych	
	odczyn (pH)	PH		
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	azot azotanowy N-NO_3	NO3N		
	azot amonowy N-NH_4	NH4N		
	chlorki Cl	CL		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	Zakres rozszerzony			
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT	12/rok z próbek tygodniowych	Puszcza Borecka
	mangan Mn	MN		Puszcza Borecka, Łysogóry
	żelazo Fe	FE		
	glin Al	AL		
GLEBY E1	Zakres obligatoryjny (realizacja programu E1 przez Stacje Bazowe w roku 2021 ma charakter przygotowawczy)			
	odczyn (pH) zawiesiny w H_2O	PH_EW20	1/rok	Poznań-Morasko, Kampinos, Łysogóry, Beskid Niski, Karkonosze
	przewodność zawiesiny w H_2O	COND_EW		
	odczyn (pH) zawiesiny w $CaCl_2$	PH_EC20		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
CHEMIZM ROZTWORÓW GLEBOWYCH F1	Zakres obligatoryjny			
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND	1/miesiąc	Wszystkie stacje
	odczyn (pH)	PH		
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	azot azotanowy N-NO_3	NO3N		
	azot amonowy N-NH_4	NH4N		
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT		
	chlorki Cl	CL		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	Zakres rozszerzony			
	glin Al	AL	1/miesiąc	Wolin, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Karkonosze
	żelazo Fe	FE		Puszcza Borecka, Łysogóry
	mangan Mn	MN		
WODY PODZIEMNE F2	Zakres obligatoryjny			
	poziom wód gruntowych lub wydajność źródła	WL SPRING_D	pomiar automatyczny lub 1/miesiąc	Wszystkie stacje
	temperatura wody	TEMP	pomiar automatyczny lub 1/miesiąc lub 1/kwartał	
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND		
	odczyn pH	PH	1/2 miesiące	
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	azot azotanowy N-NO_3	NO3N		
	azot amonowy N-NH_4	NH4N		
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT		
	chlorki Cl	CL		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
WODY PODZIEMNE F2	Zakres rozszerzony			
	glin Al	AL	1/2 miesiące	Wolin, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Karkonosze
	BZT5	BZT5		Wolin, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Beskid Niski, Karkonosze
	tlen rozpuszczony O_2	O2		Wolin, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski, Karkonosze
	mangan Mn	MN		Puszcza Borecka, Łysogóry
	żelazo Fe	FE		
	rozpuszczony węgiel organiczny RWO	DOC		Puszcza Borecka
OPAD ORGANICZNY G2	Zakres obligatoryjny			
	opad organiczny (masa sucha)	LDEP_D_f	12/rok	Wszystkie stacje – oprócz Pojezierza Chełmińskiego (brak powierzchni leśnej)
	całkowity węgiel organiczny C_{org}	TOC	1/rok z próbek miesięcznych	
	azot ogólny $N_{ogól.}$	NTOT		
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT		
	potas K	K		
	Zakres rozszerzony			
	siarka ogólna $S_{ogól.}$	STOT	1/rok z próbek miesięcznych	Puszcza Borecka, Kampinos, Roztocze
	wapń Ca	CA		Puszcza Borecka, Kampinos, Łysogóry, Roztocze
	magnez Mg	MG		
	sód Na	NA		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
WODY POWIERZCHNIOWE RZEKI H1	Zakres obligatoryjny			
	poziom wody	WL	ciągła rejestracja	Wszystkie stacje – oprócz Puszczy Boreckiej (brak cieku)
	zjawiska lodowe	ZLR	obserwacja	
	zarastanie koryta	ZK		
	przepływ obliczony na podstawie aktualnej krzywej przepływu	Q_E	1/doba	
	temperatura wody	TEMP	1/tydzień lub 1/miesiąc	
	przewodność elektrolityczna	COND		
	odczyn pH	PH		
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	azot azotanowy N-NO_3	NO3N		
	azot amonowy N-NH_4	NH4N		
	siarka siarczanowa S-SO_4	SO4S		
	chlorki Cl	CL		
	fosfor ogólny $P_{ogól.}$	PTOT		
	tlen rozpuszczony O_2	O2D		
	BZT_5	BZT5		
	zawiesina	SUS		
	Zakres rozszerzony			
	glin Al	AL	1/tydzień lub 1/miesiąc	Wolin, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Karkonosze
	mangan Mn	MN		Łysogóry
	żelazo Fe	FE		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
WODY POWIERZCHNIOWE JEZIORA H2	Zakres obligatoryjny			
	poziom wody	WL	pomiar automatyczny lub 1/miesiąc	Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie
	temperatura wody	TEMP	pomiar automatyczny lub 1/kwartał	
	przewodność elektrolityczna (SEC)	COND		
	odczyn pH	PH	1/kwartał	
	zasadowość (jeżeli pH > 4,5)	ALK		
	sód Na	NA		
	potas K	K		
	wapń Ca	CA		
	magnez Mg	MG		
	azot azotanowy N-NO3	NO3N		
	azot amonowy N-NH4	NH4N		
	siarka siarczanowa S-SO4	SO4S		
	chlorki	CL		
	fosfor ogólny Pogól.	PTOT		
	fosfor fosforanowy PO4P	PO4P		
	tlen rozpuszczony O2	O2D		
	BZT5	BZT5		
	Zakres rozszerzony			
	glin Al.	AL	1/kwartał	Wolin, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie
	mangan Mn	MN		Puszcza Borecka
	żelazo Fe	FE		
	rozpuszczony węgiel organiczny RWO	DOC		
GATUNKI INWAZYJNE OBCEGO POCHODZENIA – ROŚLINY J3	Zakres obligatoryjny			
	liczba gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia (zlewnia)	NSPEC_I_DB	Co roku, przez cały sezon wegetacyjny	Wszystkie stacje
	liczba kwadratów MGRS według gatunków (zlewnia)	NUM_MGRS_DB		
	liczba dotychczas przebadanych kwadratów MGRS (zlewnia)	NUM_MGRS_COM		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
USZKODZENIA DRZEW I DRZEWOSTANÓW K1	Zakres obligatoryjny			
	defoliacja	DEFO	1/rok	Wszystkie stacje (oprócz Pojezierza Chełmińskiego – brak powierzchni leśnej)
	odbarwienie	DISC		
	Zakres rozszerzony			
	uszkodzone drzewa	DAM_(c)	1/rok	Wigry

Poza programem badawczo-pomiarowym ZMŚP, Stacje Bazowe realizowały w 2021 roku także programy specjalistyczne, których zakres wynikał z położenia zlewni, a przede wszystkim z indywidualności poszczególnych elementów środowiska fizycznogeograficznego. Programy specjalistyczne w istotny sposób wzbogacają rozpoznanie różnych przejawów i specyfiki mechanizmu funkcjonowania środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów (Tab. 6).

Tab. 6. Programy specjalistyczne realizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku

Stacja Bazowa	Program specjalistyczny
Wolin	Morfodynamika wybrzeża klifowego
Parsęta	Erozja wodna gleb
Puszcza Borecka	Pomiar stanu zanieczyszczenia atmosfery metalami ciężkimi i WWA
Wigry	Monitoring zmian poziomu wód gruntowych w podmokłych ekosystemach leśnych
Pojezierze Chełmińskie	Bilans promieniowania
Poznań-Morasko	Monitoring migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych
Kampinos	Monitoring zimujących nietoperzy i bociana białego
Łysogóry	Funkcjonowanie geoekosystemu w warunkach alkalicznej imisji
Roztocze	Monitoring ptaków Polski: monitoring flagowych gatunków ptaków, monitoring lęgowych sów leśnych, monitoring rzadkich dzięciołów, monitoring pospolitych ptaków lęgowych, monitoring gatunków rzadkich – łabędź krzykliwy
Beskid Niski	Erozja wodna gleb
Karkonosze	Właściwości fizyczne i chemizm pokrywy śnieżnej

5. GEOINDYKATORY OBIEGU WODY W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP

Ilościowa charakterystyka obiegu wody w badanych zlewniach została ujęta w odniesieniu do następujących czynników determinujących zasoby wodne: warunki pogodowe, wody podziemne, wody powierzchniowe oraz bilans wodny. Powyższe wskaźniki ilościowe zasobów wodnych odnoszą się do 2021 roku hydrologicznego.

5.1. Warunki pogodowe

Charakterystyka warunków pogodowych uwzględnia wskaźniki i klasyfikacje meteorologiczne, mające znaczenie w dynamice obiegu wody w zlewniach oraz determinujące zasoby wodne i możliwość retencji wody:

- średnia roczna temperatura powietrza i roczna suma opadów atmosferycznych na tle wielolecia,
- liczba dni charakterystycznych pod względem termiczno-wilgotnościowym,
- klasyfikacja termiczno-opadowa,
- zdarzenia ekstremalne.

Średnia roczna temperatura powietrza i suma opadów atmosferycznych na tle wielolecia

Warunki termiczne (opisane w postaci średniej rocznej temperatury powietrza) są dla badanych zlewni zróżnicowane i determinowane ich położeniem w określonym regionie klimatycznym Polski. Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego, który charakteryzuje się w regionach północno-zachodnich cechami oceanizmu (zwłaszcza Stacje Wolin i Parsęta), a w regionach południowo-wschodnich cechami kontynentalizmu (głównie Stacje Roztocze oraz Beskid Niski) (Tab. 7, Ryc. 6). O zmienności przestrzennej warunków termicznych świadczyć może również spadek średniej rocznej temperatury powietrza w północnej strefie młodoglacjalnej Niżu Polskiego, z zachodu na wschód, od wartości 9,6°C w Wolinie, poprzez 8,0°C w Parsęcie do 7,6°C w Puszczy Boreckiej i 7,3°C w Wigrach. W powyższym transekcie równoleżnikowym bardzo dobrze zaznacza się wpływ oceanizmu (Stacje Wolin i Parsęta) oraz kontynentalizmu (Stacje Puszcza Borecka i Wigry), które kształtują termiczne właściwości klimatu strefy młodoglacjalnej Polski. Wzrost kontynentalizmu klimatu w Polsce północnej nie wykazuje wyraźnej zmienności (głównie spadku) rocznej sumy opadów w kierunku wschodnim. W 2021 roku wystąpiła wręcz odwrotna sytuacja, w której w zlewniach położonych bliżej Morza Bałtyckiego zanotowano zdecydowanie niższe opady. Średnia roczna suma opadów w Polsce północnej wynosiła od 443,5 mm w Parsęcie do 655,8 mm w Puszczy Boreckiej. Stwierdzono natomiast wyraźne

zmniejszenie się ilości opadów w transekcie południkowym Niżu Polskiego np. od Stacji Bazowej Puszcza Borecka (655,8 mm) do Stacji Bazowej Kampinos (585,0 mm). W Stacjach Bazowych położonych dalej na południe wyższe opady są efektem ich położenia na wyżej wyniesionych obszarach wyżynnych, a zwłaszcza górskich (np. Stacja Beskid Niski 860,6 mm, czy Stacja Karkonosze 1025,1 mm).

Poza czynnikami kontynentalno-oceanicznymi na warunki termiczne i opadowe w zlewniach ZMŚP wpływają czynniki lokalne, związane m.in. z rzędną terenu (np. wysoko położone Stacje: Łysogóry w Górach Świętokrzyskich, Beskid Niski w Beskidach, Karkonosze w Sudetach), jak również odległością od dużych zbiorników wodnych (np. nadmorskie położenie Stacji Wolin, czy też bliskie sąsiedztwo dużych jezior w Stacjach Puszcza Borecka i Wigry).

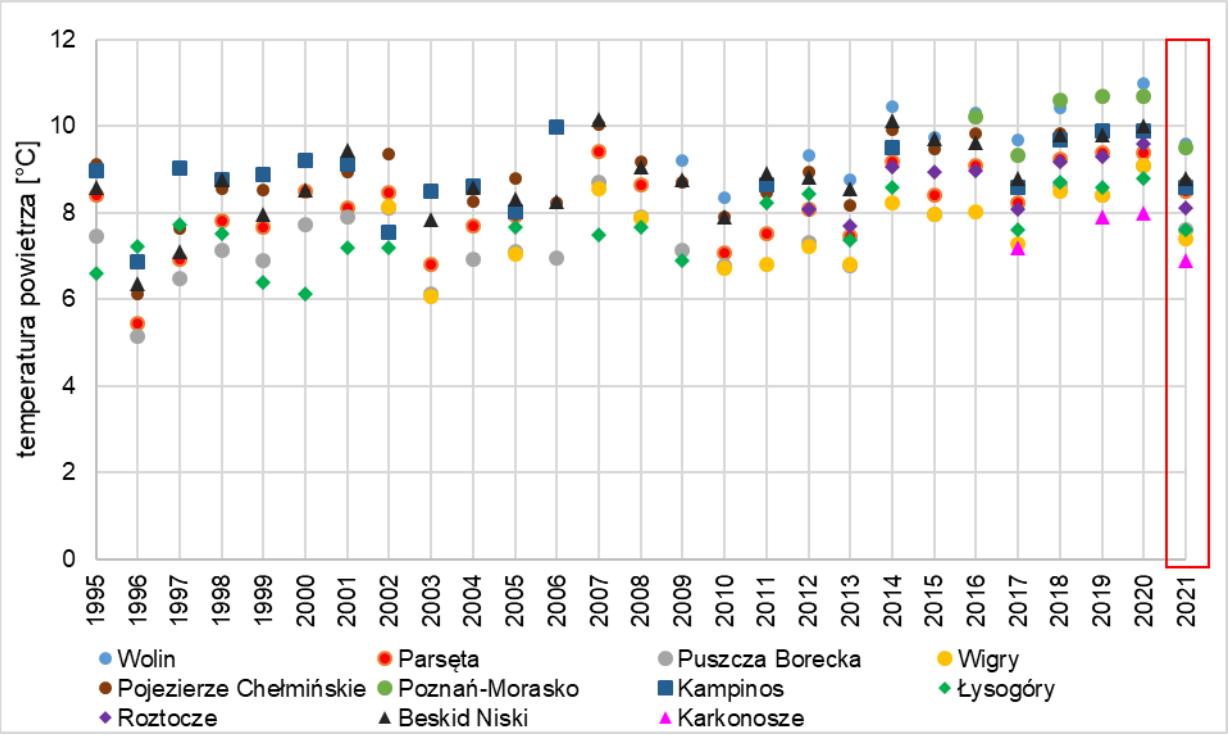
Tab. 7. Średnia temperatura powietrza i suma opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku

Stacja Bazowa ZMŚP (Okres pomiarowy – wielolecie)	Średnia temperatura powietrza [°C]		Suma opadów atmosferycznych [mm]	
	2021 r.	wielolecie	2021 r.	wielolecie
Wolin (2009-2020)	9,6	9,7	477,1	579,4
Parsęta (1987-2020)	8,5	8,0	443,5	701,3
Puszcza Borecka (1994-2020)	7,6	7,4	655,8	686,6
Wigry (2002-2020)	7,4	8,3	604,8	586,9
Pojezierze Chełmińskie (1994-2020)	8,7	8,8	539,4	544,6
Poznań-Morasko (2016-2020)	9,5	9,4	512,7	538,7
Kampinos (1994-2020)	8,6	8,7	585,0	575,3
Łysogóry (2005-2020)	7,6	7,4	825,8	754,0
Roztocze (2012-2020)	8,1	8,7	839,4	662,5
Beskid Niski (1994-2020)	8,8	8,8	860,6	867,2
Karkonosze (2016-2020)	6,9	7,7	1025,1	1028,2

W przeciwieństwie do lat poprzednich, rok 2021 był zróżnicowany pod względem termicznym. W trzech Stacjach Bazowych: Wigry, Roztocze i Karkonosze średnia roczna

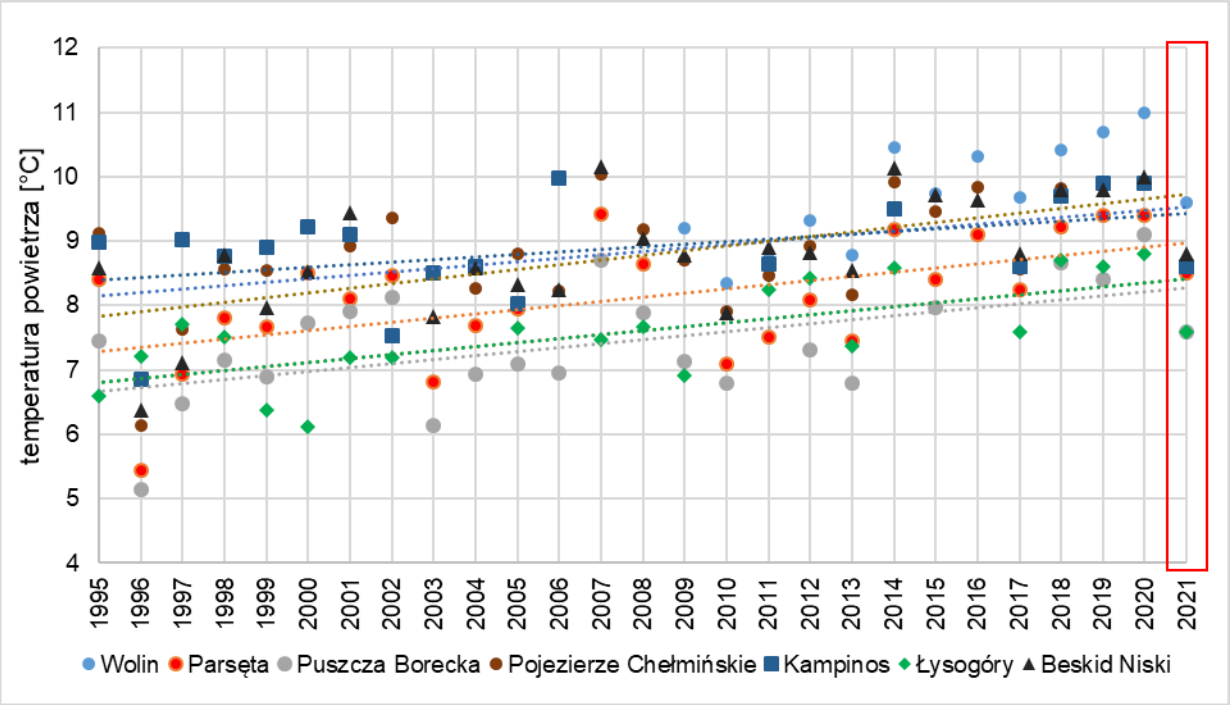
temperatura powietrza była niższa od średniej wieloletniej (przy różnicy >0,1°C). Rok 2021 był cieplejszy (przy różnicy >0,1°C) jedynie w Puszczy Boreckiej i Łysogórach. W pozostałych sześciu różnice między średnią roczną temperaturą w 2021 roku, a średnią roczną temperaturą z wielolecia nie przekraczały 0,1°C (Tab. 7).

Najwyższe średnie roczne temperatury powietrza, podobnie jak we wcześniejszych latach, wystąpiły w północno-zachodniej Polsce (9,6°C w Stacji Wolin i 9,5°C w Stacji Poznań-Morasko). Po raz pierwszy od 4 lat średnie roczne temperatury powietrza nie przekroczyły 10°C i były zbliżone do wartości z roku 2017 i najniższe od roku 2014, czyli od początku okresu o wyraźnie podwyższonej termice (Tab. 7, Tab. 12, Ryc. 6). W rozkładzie przestrzennym zaznaczył się wpływ uwarunkowań lokalnych związanych ze specyfiką położenia zlewni i ich użytkowania. Na wysoką wartość średniej temperatury powietrza w Stacji Poznań-Morasko wpłynęło bliskie sąsiedztwo aglomeracji miasta Poznania, gdzie występuje tzw. miejska wyspa ciepła. Natomiast na Wolinie o podwyższonej temperaturze powietrza zadecydowały przede wszystkim warunki pogodowe o znaczeniu ponadregionalnym – łagodzące kontrasty termiczne oddziaływanie Morza Bałtyckiego (zwłaszcza niska frekwencja dni mroźnych na Wolinie).



Ryc. 6. Średnie roczne temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia

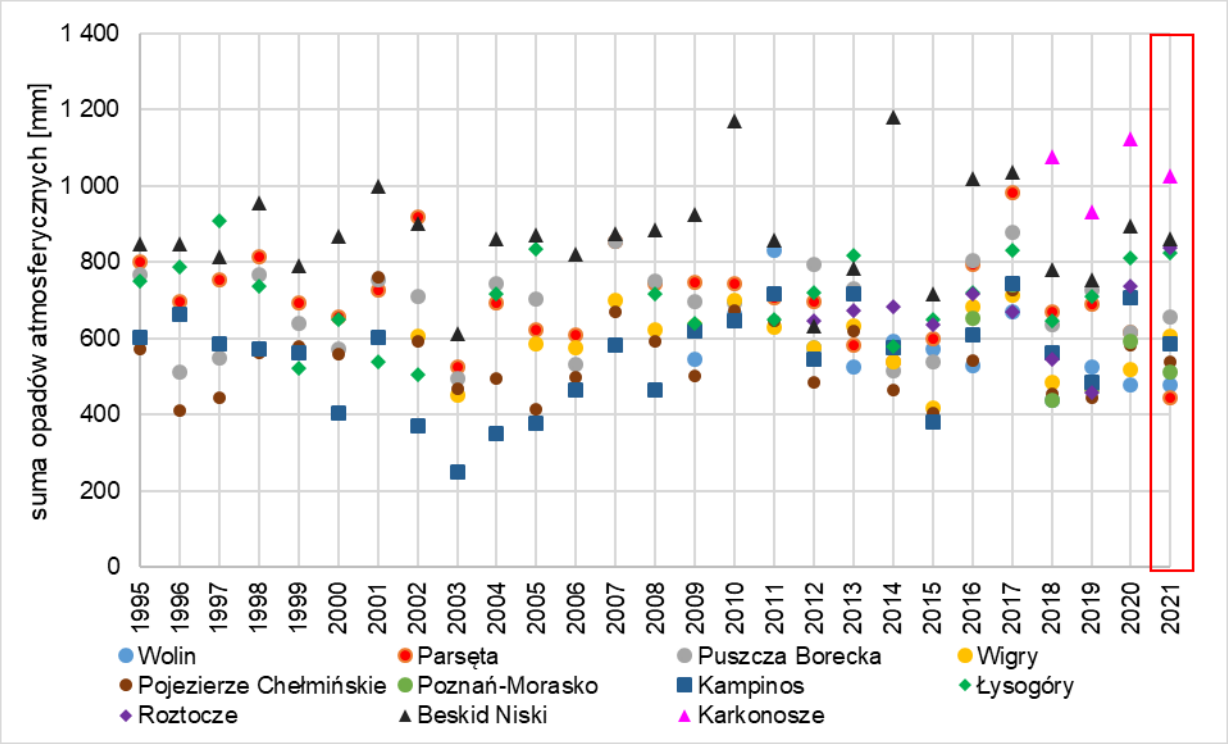
Pomimo niższych temperatur w roku 2021, wieloletnie pomiary temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP wskazują na niekorzystny trend podwyższania się średniej rocznej temperatury powietrza (Ryc. 6). Istotny statystycznie trend wzrostowy temperatury powietrza ($p<0,05$) stwierdzono dla 7 stacji posiadających przynajmniej 10-letnią serię pomiarową, tj. dla: Wolina, Parsęty, Puszczy Boreckiej, Pojezierza Chełmińskiego, Kampinosu, Łysogór i Beskidu Niskiego. Średni trend 10-letni wzrostu średniej temperatury powietrza wynosi 0,61°C/10 lat. Najwyższe trendy, przekraczające 0,7°C stwierdzono w Stacji Kampinos (0,80°C), a najniższe, mniejsze lub równe 0,5°C w Stacjach Wigry (0,50°C) i Pojezierze Chełmińskie (0,46°C) (Ryc. 7).



Ryc. 7. Istotne statystycznie trendy wzrostu temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP – Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry i Beskid Niski

W większości badanych zlewni, rok 2021 był bardziej suchy niż wartości średnie z wielolecia (Tab. 7). Wyższą sumę opadów niż we wcześniejszych latach zanotowano w Stacjach położonych w Polsce centralnej (Kampinos, Łysogóry i Roztocze) oraz na Wigrach. W pozostałych stacjach roczne sumy opadu w 2021 roku były niższe niż wartości wieloletnie. W Stacjach: Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko, Beskid Niski i Karkonosze różnice nie były znaczące i były niższe niż 31 mm (średnio 14,3 mm). Najmniej korzystna sytuacja, z opadem mniejszym o ponad 100 mm niż w wieloleciu wystąpiła w stacjach w Polsce północno-zachodniej: na Wolinie i w Parsęcie. Największe

różnice wystąpiły w Parsęcie (-257,8 mm), na Roztoczu (+176,9 mm), na Wolinie (-102,3 mm) i w Łysogórach (+71,8 mm). W większości monitorowanych zlewni warunki opadowe pozostały na podobnym poziomie jak w roku 2020 i były lepsze niż w suchych latach 2018-2019. Szczególną poprawę stwierdzono na Roztoczu, gdzie w stosunku do roku 2020, opad był wyższy o 102 mm, a w stosunku do lat 2018 i 2019 odpowiednio o 294,2 mm i 379,9 mm. Wyjątkowo niekorzystna sytuacja utrzymała się jedynie na Wolinie, gdzie po raz trzeci w ostatnich czterech latach roczna suma opadu była niższa niż 500 mm oraz w Parsęcie, gdzie zanotowano najniższą roczną sumę opadów od początku pomiarów. W przypadku rocznych sum opadów atmosferycznych w zlewniach badawczych ZMŚP nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów wzrostowych, ani spadkowych (Ryc. 8).

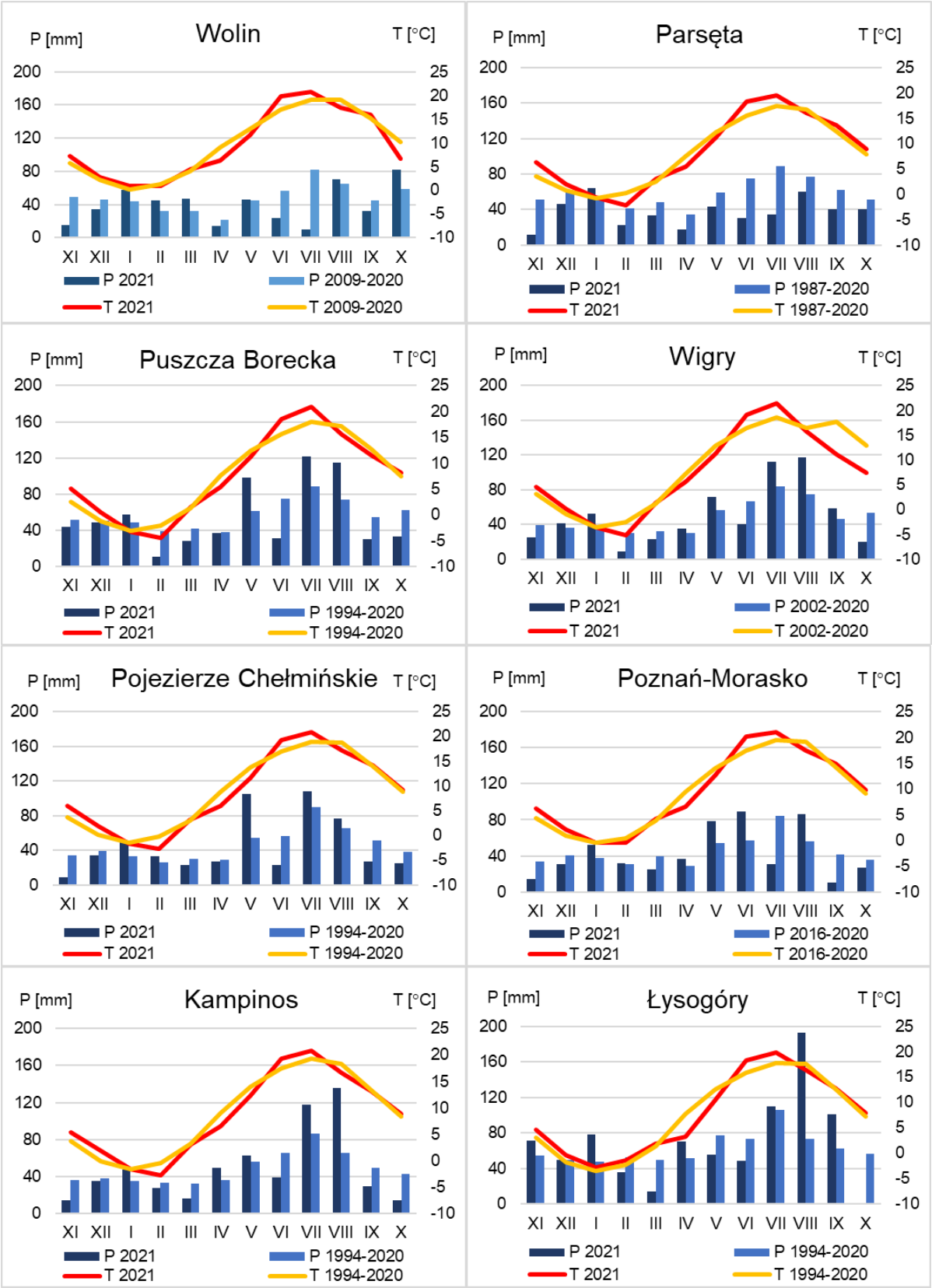


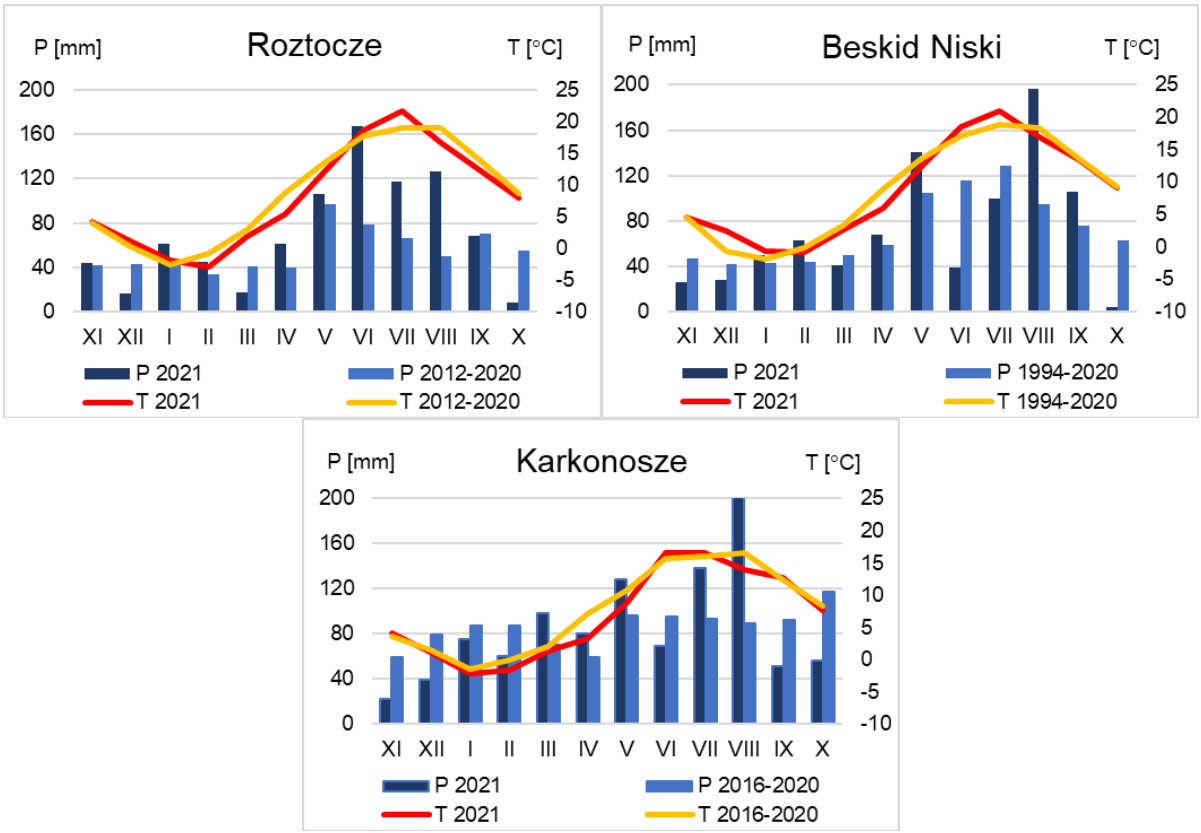
Ryc. 8. Sumy roczne opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia

W 2021 roku wysoką średnią roczną temperaturą powietrza (9,6°C) oraz niską sumą roczną opadów atmosferycznych (477,1 mm) wyróżniała się Stacja Wolin, jak również Stacja Parsęta (z rekordowo niską sumą opadów równą 443,5 mm oraz temperatura 8,5°C). Potencjalnie w Polsce północno-zachodniej, w nadmorskim pasie krajobrazowym warunki były najmniej korzystne dla odbudowy zasobów wodnych. Natomiast względnie najlepsze warunki termiczno-opadowe dla retencji wody były w zlewniach ZMŚP położonych w strefie

gór średnich, a w szczególności w Karkonoszach, gdzie średnia roczna temperatura powietrza wyniosła 6,9°C, przy rocznej sumie opadów ponad 1000 mm. Od dwóch lat poprawie ulega sytuacja w pasie wyżyn, gdzie utrzymały się wysokie sumy opadów, przy stosunkowo niskiej średniej rocznej temperaturze powietrza (Stacje Łysogóry i Roztocze).

Uwarunkowania termiczno-opadowe, decydujące o odbudowie zasobów wodnych oraz możliwości rozwoju roślinności, wykazują umiarkowanie niekorzystny rozkład miesięczny w 2021 roku (Ryc. 9). Przebieg miesięczny średniej temperatury powietrza był zróżnicowany. Na początku roku hydrologicznego: w listopadzie, grudniu oraz styczniu, jak również w okresie letnim: w czerwcu i lipcu temperatury były powyżej wartości normalnych. Najwyższe różnice zanotowano w czerwcu (średnio +2,1°C) i lipcu (średnio +2,0°C). W poszczególnych stacjach temperatury w tych miesiącach były niższe w stosunku do wartości z wielolecia od +0,8 w czerwcu na Roztoczu do +2,9°C w lipcu w Puszczy Boreckiej i Wigrach. Z kolei niższe temperatury niż w wieloleciu zarejestrowano na początku okresu wegetacyjnego: w kwietniu i maju oraz w sierpniu. Szczególnie zauważalnie niższe temperatury we wszystkich stacjach zanotowano w kwietniu (średnio 2,9°C) i sierpniu (średnio 1,6°C). W poszczególnych stacjach temperatury w tych miesiącach były niższe w stosunku do wartości z wielolecia od 0,6 w sierpniu w Wigrach do 4,5°C w kwietniu w Łysogórach. Miesięczny rozkład temperatury w 2021 roku przejawiał się występowaniem wszystkich termicznych pór roku. Sezon wegetacyjny rozpoczął się na przełomie marca i kwietnia i trwał do końca roku hydrologicznego. Niższe temperatury w kwietniu i maju nie sprzyjały wydłużeniu okresu wegetacji oraz rozwojowi, rozkwitania i dojrzewania roślin, szczególnie przy stosunkowo suchym kwietniu. Z kolei wysokie temperatury w czerwcu wzmagały ewapotranspirację i nie sprzyjały odbudowie zasobów wód powierzchniowych Pod względem opadowym dynamika miesięczna atmosferycznej dostawy wody w 2021 roku była również zróżnicowana. W większości miesięcy (listopad, grudzień, luty, marzec, czerwiec, wrzesień i październik) opady były niższe niż w wieloleciu, szczególnie niekorzystne pod względem opadowym były czerwiec i październik, w których sumy opadów były niższe od wartości z wielolecia średnio o 19,6 mm i 29,5 mm. Największe różnice w poszczególnych stacjach wyniosły: +120,2 mm w sierpniu w Łysogórach, +114,9 mm w sierpniu w Karkonoszach, +102,4 mm w sierpniu w Beskidzie Niskim, -76,3 mm w czerwcu Beskidzie Niskim oraz -72,9 mm w lipcu na Wolinie. Wysokie opady w maju mogły być korzystne zwłaszcza dla rozwoju roślinności, gdyż w tym czasie występuje ich najszybszy rozwój. W 2021 roku, podobnie jak w latach wcześniejszych nie wystąpiła wyraźna regionalizacja przestrzenna w Polsce dla miesięcznej atmosferycznej dostawy wody do zlewni.


Wolin
P [mm]
T [°C]
P 2021
P 2009-2020
T 2021
T 2009-2020
Parsęta
P 1987-2020
T 1987-2020
Puszcza Borecka
P 1994-2020
Wigry
P 2002-2020
Pojezierze Chełmińskie
Poznań-Morasko
P 2016-2020
Kampinos
Łysogóry
XI XII I II III IV V VI VII VIII IX X



Ryc. 9. Przebieg miesięczny temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku na tle wielolecia

Liczba dni charakterystycznych pod względem termiczno-wilgotnościowym

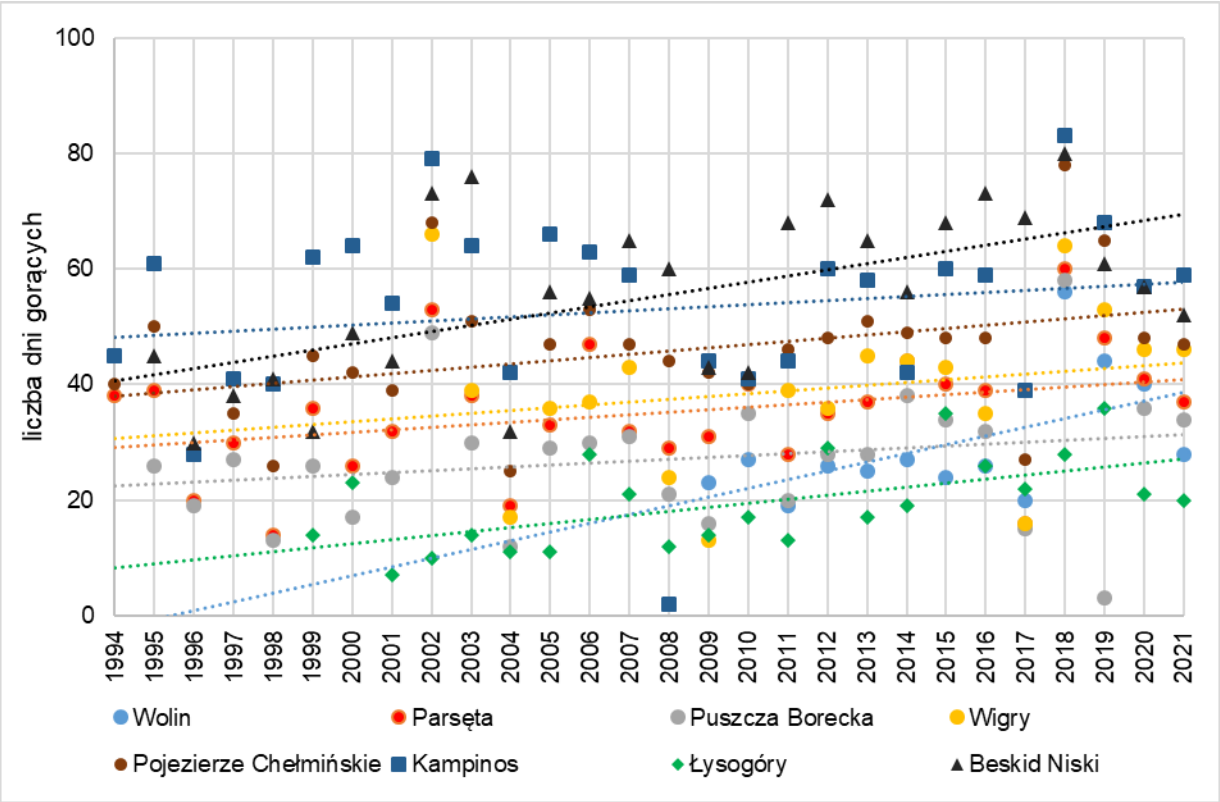
Na dynamikę obiegu wody w zlewniach ZMŚP w znacznym stopniu wpływają uwarunkowania meteorologiczne, ujęte m.in. w postaci liczby dni charakterystycznych pod względem termiczno-wilgotnościowym (Tab. 8).

W 2021 roku występowało zróżnicowanie liczby dni charakterystycznych pod względem termicznym. W badanych geoekosystemach stwierdzono znacznie więcej zdarzeń z pogodą mroźną, ze średnią dobową temperaturą poniżej 0°C (średnio 32 dni) niż upalną z maksymalną temperaturą dobową wyższą niż 30°C (średnio 8 dni), co jest sytuacją bardzo korzystną, gdyż spowolniony jest wtedy obieg wody, a ograniczona ewapotranspiracja generuje wzrost retencji wody. Najmniej dni ekstremalnych (łącznie upalnych i mroźnych), wystąpiło w Polsce północno-zachodniej (18 dni na Wolinie oraz 23 dni na Pojezierzu Drawskim w Stacji Parsęta). Z kolei najwięcej dni ekstremalnych wystąpiło w Polsce północno-wschodniej (61 dni w Puszczy Boreckiej i 59 dni w Wigrach), jak również w pasie wyżyn (65 dni w Górach Świętokrzyskich i 45 dni na Roztoczu). Podkreślić należy brak wystąpienia dni upalnych w 10 z 11 monitorowanych zlewni. Dni upalne wystąpiły tylko w miejskiej Stacji Poznań-Morasko, co można wiązać z miejską wyspą ciepła.

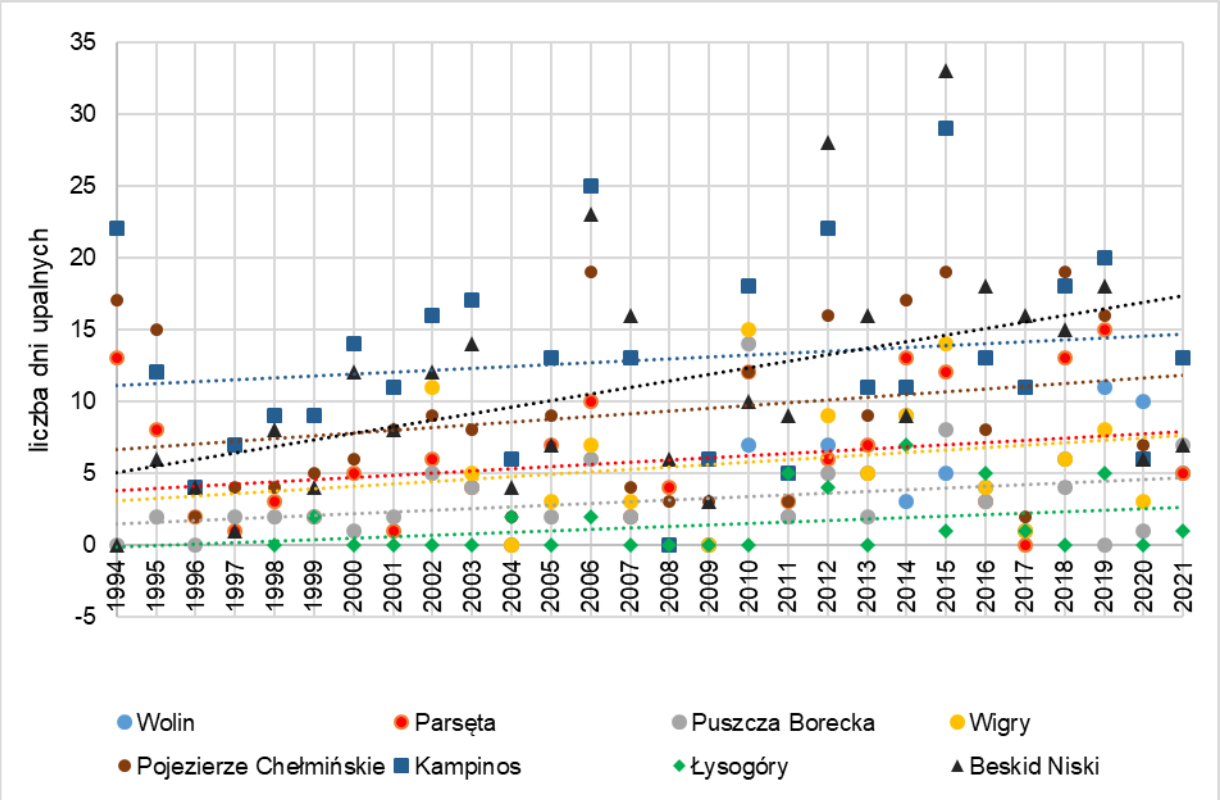
Na Niżu Polskim występowało średnio 38 dni ekstremalnych (łącznie upalnych i mroźnych), od 18 dni na Pobrzeżu Szczecińskim w Stacji Wolin do 61 dni w Puszczy Boreckiej. Wśród ekstremów termicznych na Niżu Polskim zdecydowanie więcej było dni mroźnych (średnio 28 dni) niż dni upalnych (średnio 10 dni). Najwięcej dni mroźnych na Niżu Polskim występowało w Polsce północno-wschodniej, na Stacjach Puszcza Borecka (54 dni) i Wigry (46 dni). Polska nizinna charakteryzowała się największą frekwencją występowania dni upalnych (do 13 dni w stacjach: Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko i Kampinos). Najwięcej dni mroźnych i upalnych występowało w strefie wyżynnej, średnio 55 dni, od 45 dni na Roztoczu do 65 dni w Górach Świętokrzyskich. W tej strefie notowano także zdecydowaną przewagę występowania dni mroźnych (34 dni Stacja Roztocze i 64 Stacja Łysogóry) nad dniami upalnymi (tylko 1 dzień w Stacji Łysogóry i 11 dni w Stacji Roztocze). Strefa górska charakteryzowała się najmniejszą liczbą dni upalnych i mroźnych (średnio 35 dni, od 29 dni w Beskidzie Niskim do 41 dni w Karkonoszach). W górach również notowano przewagę występowania dni mroźnych (22-40 dni) nad dniami upalnymi (tylko 1 dzień w Stacji Karkonosze i 7 dni w Stacji Beskid Niski). W 2021 roku występowanie ekstremów termicznych charakteryzowało się wyraźnym układem przestrzennym, gdzie najbardziej sprzyjające „łagodne" warunki występowały w strefie nizinnej, na około 2/3 powierzchni kraju, w jego części północnej i środkowej. Natomiast najbardziej „ostre" warunki termiczne występowały w strefie południowo-wschodniej, wyżynnej. Z kolei pośrednie warunki termiczne stwierdzono w południowej, górskiej części Polski.

Na podstawie wieloletnich pomiarów temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP, można zauważyć niekorzystną tendencję zwiększania częstości występowania dni gorących i upalnych (Ryc. 10, Ryc. 11). W przypadku dni gorących i upalnych, istotnie statystyczny trend wzrostowy ($p<0,05$) stwierdzono dla 4 Stacji Bazowych: Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Łysogóry oraz Beskid Niski (Ryc. 10, Ryc. 11).

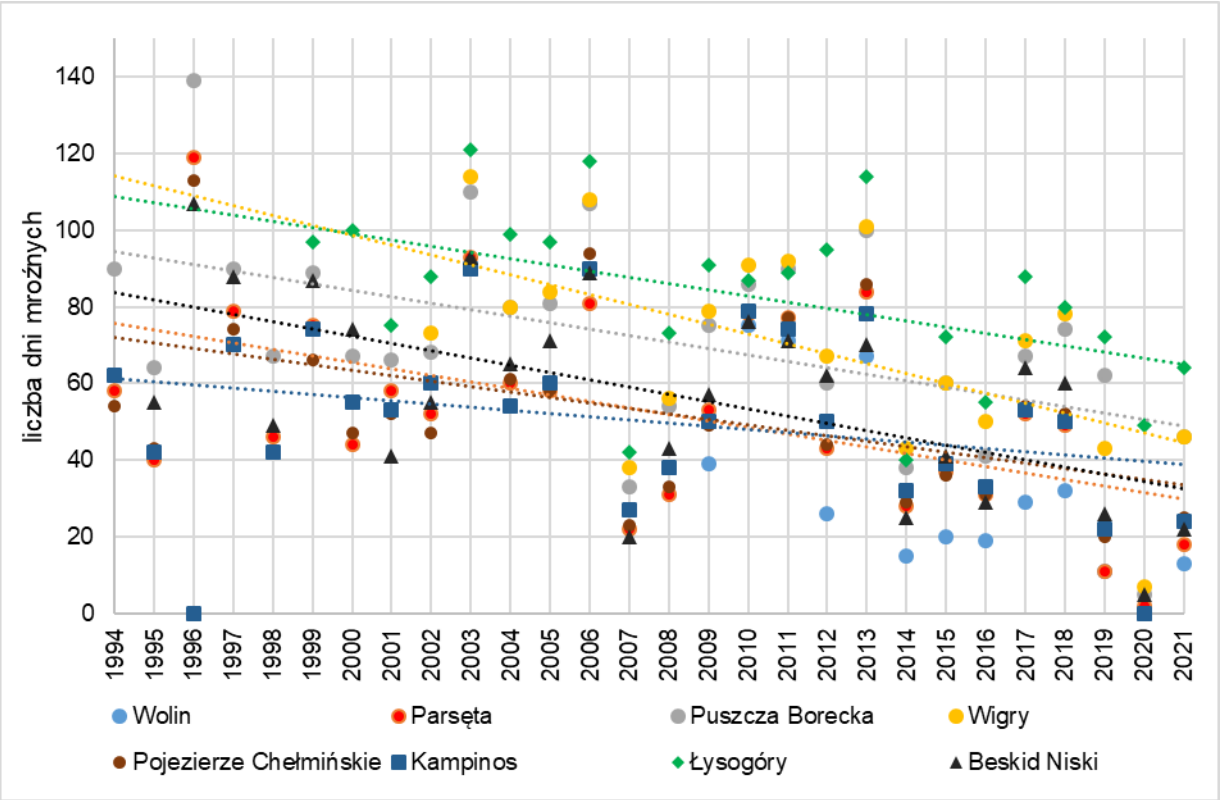
W przypadku dni mroźnych oraz bardzo mroźnych, można zauważyć tendencję zmniejszania częstości występowania tych dni. W przypadku dni mroźnych, istotnie statystyczny trend spadkowy ($p<0,05$) stwierdzono dla 7 Stacji Bazowych: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Łysogóry i Beskid Niski (Ryc. 12). Z kolei dla dni bardzo mroźnych istotny statystycznie trend spadkowy częstości ich występowania stwierdzono jedynie dla Stacji Wolin, dysponującej 12-letnim okresem pomiarowym (Ryc. 13).



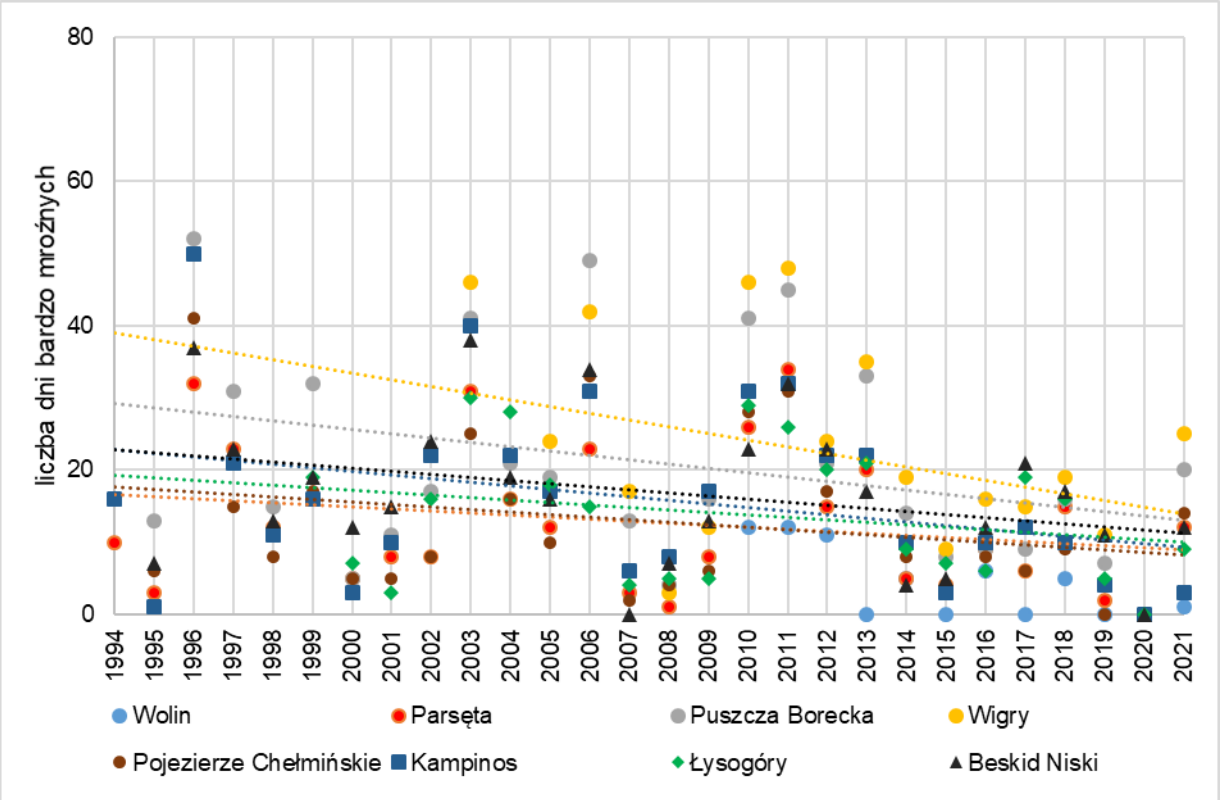
Ryc. 10. Przebieg zmian liczby dni gorących (T_{max}>25°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP



Ryc. 11. Przebieg zmian liczby dni upalnych (T_{max}>30°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP



Ryc. 12. Przebieg zmian liczby dni mroźnych ($T_{śr}$<0°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP



Ryc. 13. Przebieg zmian liczby dni bardzo mroźnych (T_{min}< -10°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP

Frekwencja dobowej wydajności opadów, podobnie jak w latach wcześniejszych, w 2021 roku wykazała zróżnicowanie przestrzenne, nawiązujące do struktury krajobrazowej Polski. Najwięcej dni z opadem (P≥0,1 mm) występowało w strefie górskiej (186 dni), mniej w strefie wyżynnej (167 dni), a najmniej w strefie nizinnej (166 dni). Na Niżu Polskim zakres zmienności liczby dni z opadem wynosił od 133 dni na Pojezierzu Chełmińskim do 196 dni w Kampinosie. W strefie wyżynnej, więcej dni z opadem wystąpiła na Roztoczu (186 dni) niż w Górach Świętokrzyskich (147 dni). Z kolei w górach zdecydowanie więcej dni opadowych występowało w Karkonoszach (215 dni) niż w Beskidzie Niskim (157 dni). Liczba dni z opadem w porównaniu do roku poprzedniego znacząco się nie zmieniła, jednak zanotowano nieznaczny wzrost frekwencji opadów w górach średnio o 12 dni.

Odnośnie opadów o dużej wydajności (P≥10 mm), różnice w liczbie takich zdarzeń pomiędzy strefami krajobrazowymi były bardziej zauważalne niż w przypadku liczby dni z opadem. Najwięcej takich zdarzeń odnotowano w górach (27 dni w Beskidzie Niskim i 25 dni w Karkonoszach) oraz na wyżynach (34 dni w Górach Świętokrzyskich i 21 dni na Roztoczu). Najmniej dni z opadem ≥10 mm wystąpiło na nizinach, a w szczególności na Wolinie (6 dni), w Poznaniu (8 dni) i w Parsęcie (9 dni). Najwięcej dni z opadem większym niż 10 mm w tej strefie krajobrazowej zarejestrowano w Stacjach Kampinos (17 dni) i Puszcza Borecka (16 dni).

Liczba dni z opadem powyżej 10 mm w 2021 roku podtrzymuje spadkowy trend frekwencji, co może świadczyć o względnie złych warunkach pluwiometrycznych. Sytuacja taka nie jest korzystna, ponieważ wyższa frekwencja wydajnych opadów atmosferycznych sprzyja odbudowie zasobów wodnych, gdyż znaczna ilość wody nie podlega ewapotranspiracji. Pewne zagrożenie może wynikać z przyspieszonego obiegu wody przy opadach o większym natężeniu lub opadach rozlewnych o znacznej wysokości (dominacja spływu powierzchniowego i odpływu fluwialnego nad infiltracją i retencją wody w zlewni). W przypadku maksymalnych opadów dobowych nie stwierdzono znaczących różnic między badanymi regionami (maks. od 20,4 mm w Stacji Łysogóry do 77,6 mm w Poznaniu). Maksymalny opad w Poznaniu można zaliczyć do katastrofalnych, ponieważ w Poznaniu i okolicach spowodował duże straty materialne w infrastrukturze miejskiej. Opad o rekordowej sumie 77,6 mm trwał zaledwie 2,5 godziny, przy czym 60 mm spadło w godzinę. Przy takim natężeniu opadu infiltracja jest mocno ograniczona, potęgując spływ powierzchniowy, w szczególności w miastach, gdzie udział powierzchni przepuszczalnych jest stosunkowo niewielki, a kanalizacja burzowa nie jest w stanie odprowadzić tak dużej ilości wody.

Tab. 8. Liczba dni charakterystycznych temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku

Element pogody	Stacja Bazowa ZMŚP										
	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Bardzo upalne T_{max}>35°C	0	0	0	0	·	3		0	0	0	0
Upalne T_{max}>30°C	5	5	7	13	13	13	13	1	11	7	1
Gorące T_{max}>25°C	28	37	34	46	47	48	59	20	43	52	13
Przymrozkowe T_{min}<0°C	48	123	127	132	102	98	89	97	110	113	128
Mroźne $T_{śr}$<0°C	13	18	54	46	25	14	24	64	34	22	40
Bardzo mroźne T_{min}<-10°C	1	12	26	25	14	9	17	9	16	12	11
Opad ≥0,1 mm	142	174	193	164	133	163	196	147	186	157	215
Opad ≥1,0 mm	98	118	113	110	88	91	92	105	111	121	142
Opad ≥10,0 mm	6	9	16	14	13	8	17	34	21	27	25
Max opad dobowy [mm]	28,1	20,6	44,7	21	52,2	77,6	28,9	20,4	51,3	47,4	59,1
Dni z pokrywą śnieżną	26	48	52	76	56	33	43	3	76	64	98

Utrzymująca się od paru lat marginalna rola pokrywy śnieżnej w retencji wody w badanych zlewniach została pogłębiona w roku 2021. Co prawda sytuacja była lepsza niż w ekstremalnie mało śnieżnym 2020 roku, jednak średni czas zalegania pokrywy śnieżnej wyniósł tylko 52 dni. Najwięcej dni z pokrywą śnieżną zarejestrowano w górach: 98 dni w Karkonoszach oraz 64 dni w Beskidzie Niskim.

Tendencje zmian warunków cieplnych wykazują trend wzrostu średniej rocznej temperatury powietrza (+) we wszystkich badanych zlewniach. Z kolei warunki wilgotnościowe w badanych zlewniach są nieistotne statystycznie, ale można zauważyć prawidłowość oraz nieregularność kierunkową zmian opadów atmosferycznych (+/-). W niektórych zlewniach opady wykazują trend rosnący, a w innych malejący, co potwierdza anizotropowość, nieciągłość przestrzenną opadów atmosferycznych (Stach 2009). Tendencje zmian warunków termicznych i opadowych w zlewniach ZMŚP są zbieżne z innymi opracowaniami zmian klimatu w Polsce (Kundzewicz 2011; Miętus, Wibig 2011).

Klasyfikacja termiczno-opadowa

Klasyfikacja termiczno-opadowa pozwala zaklasyfikować interwały czasowe (roczne i miesięczne) pod względem klimatycznych uwarunkowań dostawy i dalszego krążenia wody w zlewni (Szpikowski 2012, Tylkowski 2015a). Do ilościowego określenia rocznych warunków klimatycznych zastosowano powszechnie wykorzystywaną klasyfikację termiczną Lorenc (1998) oraz klasyfikację opadową Kaczorowskiej (1962). Klasyfikacja termiczno-opadowa określa warunki meteorologiczne w oparciu o relację stosunków opadowych do warunków termicznych. Podejście takie może być stosowane zarówno dla roku pomiarowego, jak i dla okresów krótszych, np. miesięcznych. W opracowaniu dokonano klasyfikacji termiczno-opadowej w odniesieniu do lat hydrologicznych.

Opadową klasyfikację określono w oparciu o roczną sumę opadów atmosferycznych (p), na podstawie metodyki opracowanej przez Kaczorowską (1962). Przedstawiona klasyfikacja w stosunku do opadów atmosferycznych zawiera podział na 3 klasy opadowe, wyróżnione na podstawie procentowego udziału rocznej sumy opadu (p) w odniesieniu do rocznej sumy opadu z wielolecia (p_{norm}) (Tab. 9).

Tab. 9. Klasyfikacja opadowa dla roku (Kaczorowska 1962, zmienione)

Nr klasy	Klasa termiczna roku	Kryteria delimitacji klasy
1	suchy	$p \leq 90\%\ p_{norm.}$
2	normalny	$90\%\ p_{norm} < p < 110\%\ p_{norm.}$
3	wilgotny	$p \geq 110\ p_{norm.}$

Klasyfikacja opadowa potwierdza dużą zmienność czasową i niejednorodność przestrzenną warunków opadowych w analizowanym okresie (Tab. 10). Bardziej suchy okres przypadł na lata 2003-2006 (poza Wigrami i Beskidem Niskim). Natomiast okres 2007-2012 charakteryzował się występowaniem rocznych opadów o sumie normalnej bądź wyższej od wartości normalnych, co sprzyjało odbudowie zasobów wodnych. Z kolei lata 2013-2014 pod względem opadowym cechowały się bardzo dużym zróżnicowaniem przestrzennym, co świadczy o dużej niejednorodności przestrzennej opadów, co jest typowe dla klimatu Polski. Wyjątkowo niekorzystny był 2015 rok, który poza Wolinem był rokiem suchym. Od roku 2016, a w szczególności w wyjątkowo wilgotnym 2017 roku, wystąpiła korzystna faza wzrostu atmosferycznej dostawy wody. W roku 2018 rozpoczął się okres zbliżony pod względem opadów do roku 2015 i trwał do roku 2019. Pozytywna zmiana zaszła w kolejnym, 2020 roku i została podtrzymana w roku 2021, który, pod względem opadowym, można uznać za korzystny dla odbudowy zasobów wodnych w większości zlewni. W 2 Stacjach

w pasie wyżyn (Łysogóry i Roztocze) rok 2021 sklasyfikowano jako wilgotny, w kolejnych 6 stacjach rok był normalny pod względem opadowym. Tylko w trzech Stacjach (Wolin, Parsęta i Karkonosze) rok 2021 był rokiem suchym. W porównaniu z rokiem 2020, w odniesieniu do klasyfikacji opadowej Kaczorowskiej (1962), tylko na Roztoczu warunki opadowe polepszyły się, w trzech zlewniach pogorszyły się, a w pozostałych 7 zlewniach utrzymały się na tym samym poziomie (Tab. 10).

Tab. 10. Roczna klasyfikacja opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP

Rok	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
1994											
1995											
1996											
1997											
1998											
1999											
2000											
2001											
2002											
2003											
2004											
2005											
2006											
2007											
2008											
2009											
2010											
2011											
2012											
2013											
2014											
2015											
2016											
2017											
2018											
2019											
2020											
2021											

poniżej 90% suchy | 90-110% normalny | powyżej 110% wilgotny

Termiczną klasyfikację wydzielono w oparciu o średnią roczną wartość temperatury powietrza (Lorenc 1998). Klasyfikując warunki termiczne poszczególnych lat porównywano średnią temperaturę danego roku z wartościami normy klimatycznej powiększonej lub pomniejszonej o odchylenie standardowe (σ). Klasyfikacja ta opiera się na obliczeniu odchylenia średniej rocznej temperatury powietrza w odniesieniu do wartości odchylenia standardowego średniej rocznej temperatury powietrza z wielolecia – wartości progowych.

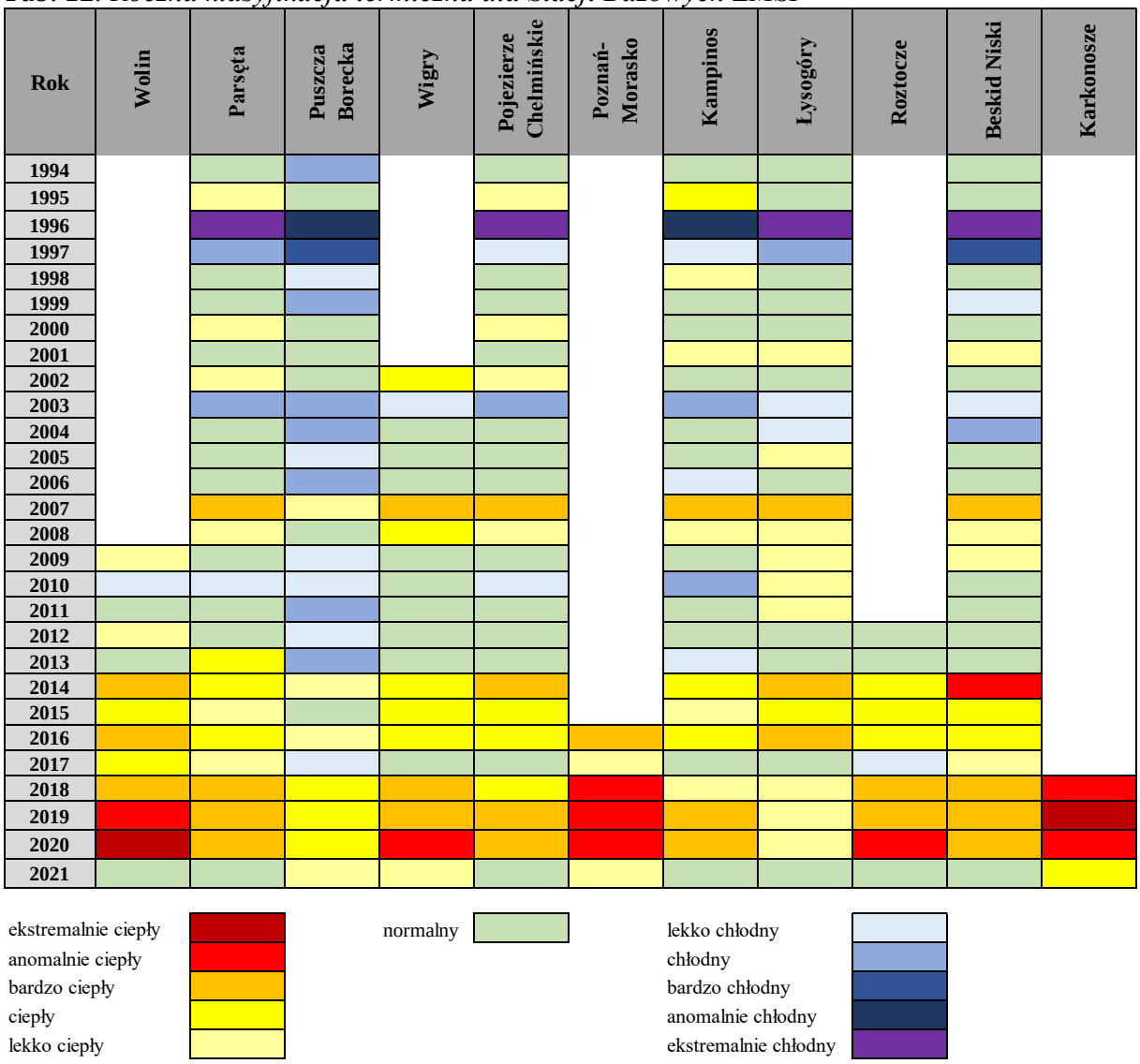
Dla temperatury powietrza zastosowano podział na 11 klas, który określa zmienność średniej rocznej temperatury powietrza (tz) w stosunku do wartości odchylenia standardowego dla średniej rocznej temperatury z wielolecia (T) (Tab. 11).

Tab. 11. Klasyfikacja termiczna roku wg Lorenc (1998)

Nr klasy	Klasa termiczna roku	Relacja średniej rocznej temperatury powietrza (tz) do wartości odchylenia standardowego średniej rocznej temperatury powietrza z wielolecia (T)
1	ekstremalnie ciepły	$tz > T + 2{,}5\sigma$
2	anomalnie ciepły	$T + 2{,}0\sigma < tz \leq T + 2{,}5\sigma$
3	bardzo ciepły	$T + 1{,}5\sigma < tz \leq T + 2{,}0\sigma$
4	ciepły	$T + 1{,}0\sigma < tz \leq T + 1{,}5\sigma$
5	lekko ciepły	$T + 0{,}5\sigma < tz \leq T + 1{,}0\sigma$
6	normalny	$T - 0{,}5\sigma \leq tz \leq T + 0{,}5\sigma$
7	lekko chłodny	$T - 1{,}0\sigma \leq tz < T - 0{,}5\sigma$
8	chłodny	$T - 1{,}5\sigma \leq tz < T - 1{,}0\sigma$
9	bardzo chłodny	$T - 2{,}0\sigma \leq tz < T - 1{,}5\sigma$
10	anomalnie chłodny	$T - 2{,}5\sigma \leq tz < T - 2{,}0\sigma$
11	ekstremalnie chłodny	$tz < T - 2{,}5\sigma$

Klasyfikacja termiczna przedstawia zmienność czasową i przestrzenną średniej rocznej temperatury powietrza (Tab. 12). Znaczne różnice termiczne w Stacjach ZMŚP w poszczególnych latach są typowe dla przejściowego klimatu Polski. Lata 1996-1997 we wszystkich Stacjach Bazowych zakwalifikowano jako chłodniejsze od normy. Z kolei skumulowanie lat ciepłych wystąpiło w okresie 2007-2008. W 2014 roku rozpoczął się kolejny, najdłuższy okres o podwyższonej termice, trwający do 2020 roku. W sześciu z siedmiu lat (poza chłodniejszym 2017) we wszystkich stacjach stwierdzono temperatury wyższe od wartości normalnej, występowały lata bardzo ciepłe, anomalnie ciepłe, a nawet ekstremalnie ciepłe. Taka sytuacja może świadczyć o dominacji cech kontynentalizmu nad oceanizmem. W analizowanych zlewniach w 2021 roku sytuacja była zbliżona do roku 2017. Co prawda w żadnej zlewni nie stwierdzono roku chłodnego, jednak w aż 7 zlewniach rok ten był rokiem normalnym pod względem termicznym, a w pozostałych 4 zlewniach rok był lekko ciepły i ciepły. W kolejnych latach będzie możliwe stwierdzenie czy taka sytuacja jest chwilowa (jak w roku 2017), czy też rozpoczyna kolejny okres o lekko obniżonej termice.

Tab. 12. Roczna klasyfikacja termiczna dla Stacji Bazowych ZMŚP



Na właściwości cieplne w 2021 roku w badanych zlewniach ZMŚP nie miały większego wpływu uwarunkowania lokalne, związane m.in. z wysokością położenia zlewni i jej odległością od dużych zbiorników wodnych. W kontekście obiegu wody w zlewniach ZMŚP w 2021 roku umiarkowanie niekorzystna sytuacja termiczna występowała w Puszczy Boreckiej, Wigrach, Poznaniu-Morasko oraz Karkonoszach, gdzie był to rok lekko ciepły i ciepły. Niższe temperatury powietrza niż w latach wcześniejszych mogą skutkować mniejszym parowaniem terenowym i potencjalnie sprzyjać retencji wód (Tab. 12).

Klasyfikacja termiczno-opadowa w 2021 roku dla większości Stacji Bazowych ZMŚP wskazuje na przeciętną sytuację do retencji wody w zlewniach ZMŚP, co przejawiało się brakiem zmian ilościowych, a w najlepszej sytuacji zahamowaniem spadku zasobów wód powierzchniowych i podziemnych. Korzystna sytuacja do odnowy zasobów wodnych

wystąpiła jedynie w pasie wyżyn: w Górach Świętokrzyskich i w szczególności na Roztoczu, gdzie rok 2021 był wilgotny i normalny pod względem termicznym (Tab. 13).

Tab. 13. Klasyfikacja termiczno-opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2021 roku

Rok 2021	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Klasyfikacja termiczna	normalny	normalny	lekko ciepły	lekko ciepły	normalny	lekko ciepły	normalny	normalny	normalny	normalny	ciepły
Klasyfikacja opadowa	suchy	suchy	normalny	normalny	normalny	normalny	normalny	wilgotny	wilgotny	normalny	suchy
Sytuacja dla ochrony i odnowy zasobów wodnych	przeciętna	przeciętna	przeciętna	przeciętna	przeciętna	przeciętna	przeciętna	korzystna	korzystna	przeciętna	przeciętna

Zdarzenia ekstremalne

Zróżnicowanie przestrzenne wskaźnika oceanizmu i kontynentalizmu klimatu Polski oraz wyniesienie nad poziomem morza znajdują swoje odzwierciedlenie w mniejszych kontrastach termicznych w regionach północno-zachodnich, aniżeli w południowo-wschodnich. Jednak w 2021 roku amplitudy roczne temperatur powietrza były bardzo zbliżone we wszystkich monitorowanych zlewniach. Najwyższe wystąpiły na Wigrach (59,8°C) i w Puszczy Boreckiej (57,2°C) z kolei najniższe amplitudy zanotowano w Stacjach Karkonosze (43,8°C) i Wolin (45,2°C) (Tab. 14). Warto zwrócić uwagę, że amplitudy są wyższe niż w latach poprzednich, na co w głównej mierze wpłynęły minimalne temperatury powietrza, które spadły poniżej -20°C w pięciu zlewniach (Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos i Roztocze). Maksymalne temperatury wyższe niż 35°C wystąpiły tylko w Poznaniu.

Tab. 14. Wartości maksymalne i minimalne temperatur w roku hydrologicznym 2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP

Element pogody	Stacja Bazowa ZMŚP										
	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
T_{max} [°C]	34,8	34,0	32,1	33,2	33,0	35,3	33,6	30,2	34,0	33,6	30,2
T_{min} [°C]	-10,4	-16,9	-25,1	-26,6	-21,0	-17,1	-22,0	-16,7	-20,3	-18,1	-13,6
Amplituda [°C]	45,2	50,9	57,2	59,8	54,0	52,4	55,6	46,9	54,3	51,7	43,8

Według klasyfikacji termicznej Lorenc (1998), w czterech zlewniach położonych w Polsce północnej (Wolin, Puszcza Borecka, Wigry i Poznań Morasko), jak również w Karkonoszach, czerwiec 2021 roku był miesiącem ekstremalnie ciepłym w odniesieniu do wartości wieloletnich, co było szczególnie niekorzystne dla rozwoju roślinności, gdyż w tym czasie występuje jej najszybszy rozwój. Ponadto w siedmiu Stacjach: Wolin (ośmiokrotnie), Puszcza Borecka (jednokrotnie), Wigry (jednokrotnie), Poznań-Morasko (jednokrotnie), Łysogóry (trzykrotnie), Roztocze (jednokrotnie) i Beskid Niski (dwukrotnie) zarejestrowano noc tropikalną, z temperaturą minimalną wyższą niż 20°C. Tylko w wysoko położonych zlewniach w Łysogórach i w Karkonoszach nie wystąpiły też fale upałów, czyli ciągi przynajmniej 3 dni z temperaturą maksymalną powyżej 30ºC. Pomimo wyższych średnich rocznych temperatur powietrza, kwiecień i maj były miesiącami stosunkowo chłodnymi, co skutkowało wystąpieniem późnych (w maju) przymrozków w 7 monitorowanych zlewniach (Stacje: Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Beskid Niski i Karkonosze).

W większości zlewni, w 2021 roku nie stwierdzono występowania wyjątkowych zdarzeń ekstremalnych, zaburzających obieg wody w badanych zlewniach. W żadnej zlewni nie wystąpiły długotrwałe opady rozlewne o sumie ≥200 mm/3 doby. Dobowe sumy opadów atmosferycznych, przekraczające 50 mm wystąpiły na Pojezierzu Chełmińskim, w Poznaniu-Morasko, na Roztoczu oraz w Karkonoszach. Wyjątkowy był opad z 22 czerwca 2021 roku w Poznaniu, kiedy to w ciągu 150 minut spadło 77,6 mm. W związku z ekstremalną intensywnością opadu, wysoka jego suma nie skutkowała poprawie zasobów wód powierzchniowych i podziemnych. Większość wody w postaci powodzi błyskawicznej została szybko odprowadzona ze zlewni. Z kolei istotnym zdarzeniem meteorologicznym ograniczającym obieg wody i powodującym obniżanie poziomu wód powierzchniowych były susze meteorologiczne, czyli okresy kiedy opady nie występują przez co najmniej 15 dni. Takie zdarzenia wystąpiły na Wolinie, w Parsęcie, w Łysogórach i w Beskidzie Niskim.

W 2021 roku w sieci Stacji Bazowych ZMŚP nie stwierdzono szczególnie częstego występowania następujących zdarzeń ekstremalnych: silnych mrozów; wczesnego występowania przymrozków; długiego zalegania, gwałtownego przyrostu bądź wytapiania pokrywy śnieżnej; gwałtownych, niszczących burz i gradobicia; trąb powietrznych; długotrwałego utrzymywania się mgły.

Można uznać, że w 2021 roku hydrologicznym do najbardziej uciążliwych zjawisk ekstremalnych należały głównie fale upałów i susze meteorologiczne. Niewystarczająca wydajność opadów atmosferycznych, średniej wysokości temperatury powietrza i parowanie

terenowe były przyczyną utrzymania się suszy glebowej i suszy hydrologicznej, odznaczającej się np. okresowym wyschnięciem cieków w pięciu monitorowanych zlewniach.

5.2. Wody podziemne

Dynamikę zasobów pierwszego poziomu wód podziemnych prezentują dwa wskaźniki: miesięcznych zmian retencji R_M i zagrożenia niżówką hydrogeologiczną k_n. Wskaźniki te dobrze prezentują dynamikę zmian zasobów wód podziemnych mających swobodny kontakt z infiltrującymi wodami opadowymi. Miesięczne wartości tych wskaźników są zależne od zasilania opadowego, ale nie zawsze wykazują identyczne miesięczne zależności. W przypadku wód podziemnych duże znaczenie posiada litologia utworów strefy aeracji, która decyduje o prędkości infiltracji wody. Ponadto duże znaczenie posiadają formy rzeźby terenu, typ użytkowania terenu oraz rozległość strefy alimentacji wód podziemnych. Do analizy wskaźników hydrogeologicznych wykorzystano dane stanu wód podziemnych mających największy wpływ na zmienność poziomu wód powierzchniowych. Należy podkreślić, że warunki hydrogeologiczne w badanych zlewniach mają wybitnie lokalne właściwości, o małym zasięgu przestrzennym, które warunkowane są m.in. budową geologiczną, zasilaniem opadowym, użytkowaniem terenu oraz specyfiką lokalnego systemu drenażu.

Wskaźnik miesięcznych zmian retencji R_M

Wskaźnik miesięcznych zmian retencji R_M określono w oparciu o zależność:

$R_M = [(G_{ppm} – G_{opm})\cdot\mu]$ – dla warstwy wodonośnej ze zwierciadłem swobodnym;

gdzie:

G_{ppm} – ostatni pomiar głębokości położenia zwierciadła w miesiącu poprzednim;

G_{opm} – ostatni pomiar głębokości położenia zwierciadła w miesiącu bieżącym;

μ – współczynnik odsączalności.

Wartości wskaźnika $R_M \leq -0{,}02$ oznaczają spadek retencji, wartości $-0{,}01 \leq R_M \leq 0{,}01$ to retencja bez zmian, a wartości $R_M \geq 0{,}02$ oznaczają wzrost retencji.

W 2021 roku hydrologicznym wartości wskaźnika miesięcznych zmian retencji wykazywały duże zróżnicowanie czasowe i przestrzenne. Najmniejszą dynamikę miesięcznych zmian retencji stwierdzono w Polsce północnej, gdzie prawie przez cały rok hydrologiczny wartość wskaźnika R_M ukazywała retencję bez zmian (Stacje Parsęta i Wigry). Podobną stabilizacją charakteryzowała się zlewnia Różanego Strumienia w Poznaniu. Z kolei największe zróżnicowanie zmian retencji występowało w Polsce południowej i południowo-wschodniej (Stacje: Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze). W Stacji Bazowej Wolin najdłużej utrzymywał się spadek retencji (przez 7 miesięcy), o którym decydowały bardzo niskie opady

atmosferyczne i stosunkowo wysokie temperatury powietrza oraz wzmożona ewapotranspiracja. W układzie miesięcznym relatywnie najlepsze warunki do retencji wody były w pierwszych miesiącach roku hydrologicznego (od grudnia do marca). W tym okresie w stacjach notowano wzrost retencji albo retencję bez zmian (poza Stacją Beskid Niski, gdzie w styczniu wystąpił spadek retencji). Zdecydowanie gorsze warunki dla retencji wody wystąpiły w listopadzie oraz od kwietnia do października (tylko w Parsęcie, Wigrach i Poznaniu nie wystąpiły miesiące z wartością wskaźnika R_M mieszczącego się w przedziale spadku retencji) (Tab. 15).

Tab. 15. Wskaźnik miesięcznych zmian retencji R_M dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym

Stacja ZMŚP	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Wolin												
Parsęta												
Puszcza Borecka												
Wigry												
Pojezierze Chełmińskie												
Poznań-Morasko												
Kampinos												
Łysogóry												
Roztocze												
Beskid Niski												
Karkonosze												

spadek retencji; retencja bez zmian; wzrost retencji

analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)

Pogorszenie retencji wód podziemnych w listopadzie było konsekwencją warunków termiczno-opadowych w roku 2020, które nie sprzyjały odbudowie zasobów wodnych. Z kolei spadki retencji w półroczu letnim wynikały z dużej frekwencji dni gorących, w tym fal upałów, wzmagających ewapotranspirację oraz występowania susz meteorologicznych w okresie letnim. W konsekwencji infiltracja wody do warstw podziemnych była ograniczona. Podobnie jak w latach 2018-2020 nie stwierdzono wyraźnej regionalizacji przestrzennej w zakresie możliwości retencji wody, czego przykładem może być zdecydowanie odmienna sytuacja w położonych blisko siebie Stacjach Wigry i Puszcza Borecka. Generalnie przebieg wskaźnika retencji wód podziemnych potwierdza utrzymujący

się słaby stan ilościowy wód podziemnych w badanych zlewniach (Tab. 15), co w konsekwencji prowadziło do możliwości wystąpienia zagrożenia niżówki hydrogeologicznej w większości badanych geoekosystemów (Tab. 16).

Wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną k_n

Wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną, obliczany jest wyłącznie dla poziomu wodonośnego o zwierciadle swobodnym. Formuła miesięcznego wskaźnika zagrożenia niżówką hydrogeologiczną k_n jest następująca:

$k_n = 1–G/SNGw_{(1994-2020)}$

gdzie:

G – stan aktualny, określany jako głębokość położenia zwierciadła wody, przyjmowany umownie jako pierwszy pomiar w rozpatrywanym miesiącu;

$SNGw_{(1994-2020)}$ – średni niski stan (zwierciadła) wody z okresu wielolecia, określany jako średni z minimalnych rocznych stanów wód podziemnych.

Zasady interpretacji:

$k_n>0,1$ – brak zagrożenia niżówką hydrogeologiczną;

$-0,1\leq k_n\leq 0,1$ – zagrożenie pojawienia się niżówki;

$-0,3\leq k_n\leq -0,2$ – wystąpienie płytkiej niżówki;

$k_n<-0,3$ – wystąpienie głębokiej niżówki.

W 2021 roku hydrologicznym uśrednione wartości wskaźnika zagrożenia niżówką hydrogeologiczną wykazują mniejsze zróżnicowanie czasowo-przestrzenne niż wskaźnik miesięcznych zmian retencji. Największe zagrożenie występowania niżówki w ujęciu regionalnym wystąpiło w Polsce południowo-wschodniej (Roztocze i Beskid Niski). W obu stacjach wystąpiła płytka niżówka. Płytką niżówkę stwierdzono również w grudniu w Puszczy Boreckiej. Płytką niżówkę w pierwszych pięciu miesiącach na Roztoczu wiązać można z powolną odbudową zasobów wodnych po wyjątkowo suchych latach 2018 i 2019. Korzystne warunki opadowe w 2021 roku pozwoliły odbudować zasoby wód podziemnych, a w konsekwencji do braku zagrożenia niżówką pod koniec roku hydrologicznego. Zagrożenie wystąpienia płytkiej niżówki występowało w większości pozostałych monitorowanych zlewni, poza Kampinosem, gdzie utrzymywał się przez cały rok brak zagrożenia wystąpienia niżówki hydrogeologicznej. Ekstremalnie niskie opady atmosferyczne w Stacji Parsęta nie przełożyły się na znaczące pogorszenie stanu ilościowego wód podziemnych. Poziom zwierciadła wód podziemnych się obniżył, jednak nie stwierdzono wystąpienia niżówki hydrogeologicznej. Należy podkreślić nieznaczną poprawę stanu wód

podziemnych w porównaniu do wcześniejszych lat 2018-2020, co przejawia się mniejszą liczbą miesięcy z wystąpieniem płytkiej i brakiem miesięcy z wystąpieniem głębokiej niżówki. Należy to wiązać z wyższymi, jednak wciąż niewystarczającymi opadami atmosferycznymi (Tab. 16).

Tab. 16. Wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną k_n dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym

Stacja ZMŚP	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Wolin												
Parsęta												
Puszcza Borecka												
Wigry												
Pojezierze Chełmińskie												
Poznań-Morasko												
Kampinos												
Łysogóry												
Roztocze												
Beskid Niski												
Karkonosze												

wystąpienie głębokiej niżówki

wystąpienie płytkiej niżówki

zagrożenie pojawienia się niżówki

brak zagrożenia niżówką

analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)

Pewne różnice stanu zasobów wód podziemnych określone za pomocą wskaźników R_M i k_n wynikają z przyjętej metody obliczeniowej. Wynikają one z faktu, że wskaźnik zmian retencji R_M przedstawia krótkookresowe zmiany poziomu wód podziemnych, z miesiąca na miesiąc. Natomiast wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną k_n przedstawia stan wód podziemnych w danym miesiącu na tle wielolecia. Wahania poziomu wód podziemnych są procesem długotrwałym, dlatego negatywne, bądź pozytywne uwarunkowania termiczno-opadowe w danym roku hydrologicznym mogą spowodować zmianę poziomu wód podziemnych dopiero w kolejnych latach.

5.3. Wody powierzchniowe

W 2021 roku monitoring wód płynących 10 ciekach wodnych. Jedynie dla odpływu z jeziora Łękuk (Puszcza Borecka) niemożliwe było prowadzenie pomiarów ze względu na zakłócenia odpływu wody w cieku spowodowane działalnością bobrów.

Reakcja badanych geoekosystemów w postaci zasilania opadowego i podziemnego widoczna była w 2021 roku w wodach powierzchniowych, zwłaszcza w wodach rzecznych, które stanowią strefę odprowadzania wody z badanych zlewni. Miarą reakcji zlewni na dynamikę obiegu wody mogą być geoindykatory hydrologiczne w postaci współczynnika odpływu i wskaźnika odpływu jednostkowego (Tab. 17) oraz współczynnika miesięcznego przepływu (Ryc. 14).

Tab. 17. Miesięczne średnie wartości współczynnika odpływu [-] i odpływu jednostkowego oraz ekstremalne dobowe odpływy jednostkowe [$dm^{-3} \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$] w 2021 roku hydrologicznym w Stacjach Bazowych ZMŚP

Stacja (Rzeka)	Współczynnik odpływu	Średni miesięczny odpływ jednostkowy	Maksymalny dobowy odpływ jednostkowy	Minimalny dobowy odpływ jednostkowy
	[-]	[$dm^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$]		
Wolin (Lewińska Struga)	0,12	2,10	4,90	0,00
Parsęta (Parsęta)	0,36	3,86	13,43	1,51
Wigry (Czarna Hańcza)	0,28	5,39	11,37	2,88
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	0,31	5,57	19,08	0,00
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	0,05	0,80	5,60	0,00
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	0,08	1,56	9,25	0,00
Łysogóry (Wieniec)	0,04	0,05	13,22	0,00
Roztocze (Świerszcz)	0,05	1,53	8,24	0,30
Beskid Niski (Bystrzanka)	0,25	7,78	119,62	0,46
Karkonosze (Wrzosówka)	0,72	23,40	483,00	8,90

Współczynnik odpływu

Współczynnik odpływu (α) jest ilorazem warstwy odpływu (O) do warstwy opadu (P). Wyrażany jest w procentach lub jako wartość niemianowana. Wartość współczynnika odpływu informuje, jaka część opadu odpłynęła ciekiem ze zlewni. Współczynnik odpływu

w zadanym przedziale czasu (miesiąc, rok) jako wartość niemianowaną oblicza się następująco:

$\propto = O/P$ [-]

gdzie:

O – warstwa odpływu ze zlewni w zadanym przedziale czasu [mm];

P – warstwa opadu w zlewni w zadanym przedziale czasu [mm].

W większości badanych zlewni ZMŚP średni współczynnik odpływu w 2021 roku był na podobnym poziomie jak w latach poprzednich. Przyjmował on wartości od 0,04 w Wieńcu w Górach Świętokrzyskich oraz 0,05 w Świerszczu na Roztoczu i Różanym Strumieniu w Poznaniu do wartości najwyższych: 0,36 w górnej Parsęcie i 0,72 we Wrzosówce w Karkonoszach. Zlewnie Niżu Polskiego charakteryzują się spowolnionym obiegiem wody i długim krążeniem wody od strefy alimentacji do strefy drenażu. W tych zlewniach zaledwie kilka-kilkanaście procent (Lewińska Struga, Różany Strumień, Kanał Olszowiecki), a maksymalnie 28-36% (Parsęta, Czarna Hańcza, Struga Toruńska) wody opadowej odpłynęło systemem fluwialnym poza zlewnię. W ciekach o mniejszym współczynniku odpływu, jakość wód opadowych odgrywa mniejsze znaczenie w kształtowaniu jakości wód rzecznych. Długi czas krążenia wody nie powoduje szybkiej dostawy zanieczyszczeń powierzchniowych ze zlewni do wód rzecznych, jednakże może występować ich kumulacja w glebie czy wodach podziemnych (np. biogenów). Równie wysoką wartość współczynnik odpływu osiągnął w ciekach górskich (Bystrzanka i Wrzosówka), gdzie udział wód opadowych w wodach rzecznych wyniósł 25-72%. W tych zlewniach migracja wody opadowej do koryta rzecznego jest szybka i krótka. Jakość wód opadowych w zlewniach górskich może znacząco wpływać na jakość wody w rzekach. W zlewniach górskich reakcja odpływu rzecznego na opad atmosferyczny jest szybsza i bardziej wyraźna niż w zlewniach nizinnych, czy wyżynnych. W zlewniach górskich nie następuje tak znaczna kumulacja zanieczyszczeń jak w zlewniach nizinnych, ale następuje ich szybkie odprowadzanie systemem fluwialnym.

Zlewnie przekształcone antropogenicznie, o małym udziale lasów (Struga Toruńska, Różany Strumień) cechują się szybkim obiegiem wód powierzchniowych i podziemnych, a migrująca w zlewni woda wykorzystywana jest na cele związane nie tylko z odpływem rzecznym, ale także m.in. dla potrzeb melioracji czy nawadniania.

W roku 2021 zauważalny jest ścisły związek pomiędzy wielkością opadów atmosferycznych w okresach poprzedzających, a aktualnym odpływem ze zlewni. Porównywalne wartości współczynnika odpływu z dwoma latami poprzedzającymi o różnych

warunkach hydrometeorologicznych (niekorzystny rok 2019 i umiarkowanie korzystny rok 2020) można tłumaczyć mniejszą retencją i znaczącym obniżeniem stanu wód powierzchniowych i podziemnych w bardzo suchych i bardzo ciepłych latach 2018 i 2019. Wyższe opady w 2020 roku przyczyniły się do stopniowego uzupełniania zasobów wód podziemnych (retencji), jednak opady nie były wystarczające, czego efektem są zbliżone współczynniki odpływu w roku 2021. Stosunkowo niskie wartości współczynnika odpływu w latach 2020-2021 mogą świadczyć, że wody opadowe zostały wykorzystane do uzupełnienia deficytu opadów z lat poprzednich.

Wskaźnik odpływu jednostkowego

Odpływ jednostkowy (q) jest miarą odpływu ze zlewni, opisującą odpływ wody w jednostce czasu z jednostki powierzchni zlewni i wyrażaną w $dm^{-3} \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. Obliczenia odpływu jednostkowego dokonuje się z uwzględnieniem średniego przepływu w danym okresie (doba, miesiąc, rok) na podstawie formuły:

$q=1000Q/A$ $[dm^{-3} \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}]$,

gdzie:

Q – średni przepływ w zadanym przedziale czasu (np. doba, miesiąc, rok) $[dm^{-3} \cdot s^{-1}]$;

A – powierzchnia zlewni $[km^2]$.

W badanych zlewniach ZMŚP w 2021 roku średni miesięczny wskaźnik odpływu jednostkowego (Tab. 17) przyjmował niskie wartości, poniżej 5 $dm^{-3} \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ prawie we wszystkich zlewniach nizinnych i wyżynnych (oprócz Czarnej Hańczy i Strugi Toruńskiej). Wyjątkowo niska roczna suma opadów atmosferycznych w zlewni górnej Parsęty spowodowała znaczące obniżenie się odpływu ze zlewni, a w konsekwencji na najniższe wartości średniego miesięcznego wskaźnika odpływu jednostkowego. Z kolei równie wysoki odpływ jednostkowy, powyżej 7,5 $dm^{-3} \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, który występował w zlewniach górskich (Bystrzanka i Wrzosówka) wynikał z małej powierzchniowo strefy alimentacji i szybkiego obiegu wody, dużych spadków terenu generujących spływ powierzchniowy i szybszą dostawę wody z systemu stokowego do korytowego.

O względnie niskim odpływie jednostkowym w 2021 roku w zlewniach nizinnych i górskich, poza warunkami hydrometeorologicznymi, decydowały zarówno inne czynniki przyrodnicze (np. wielkość strefy alimentacji, litologia oraz użytkowanie strefy zasilania), jak i antropogeniczne (np. nawadnianie i melioracje). Przykładowo, o niskim odpływie jednostkowym ze zlewni Lewińskiej Strugi (Wyspa Wolin) decyduje bardzo rozległa strefa alimentacji i leśne użytkowanie terenu oraz związana z tymi uwarunkowaniami powolna

dostawa wody do koryta rzecznego. Ponadto Lewińska Struga w profilu badawczym ma długość 3 km, z czego jedynie 0,6 km cieku przebiega poza jeziorami. Zatem ten system rzeczno-jeziorny charakteryzuje się dużą bezwładnością hydrologiczną, która przejawia się słabą reakcją na ekstremalne zasilanie opadowe lub roztopowe. Z kolei na bardzo niską dynamikę odpływu wód oraz okresowy jej zanik w Wieńcu (Góry Świętokrzyskie) wpłynęły zarówno czynniki naturalne (budowa geologiczna zlewni, znaczne uszczelinienie utworów powierzchniowych ograniczające spływ powierzchniowy – większość wód opadowych perkoluje (przepływa przez stałe podłoże) do głębszych warstw wodonośnych nie mających kontaktu hydraulicznego z ciekiem), jak i spowodowane działalnością człowieka (np. przekierowywanie wody z cieku przez gospodarzy do przydomowych zbiorników). Antropopresja w zlewni Strugi Toruńskiej (Pojezierze Chełmińskie) przejawia się zaburzeniem odpływu rzecznego wskutek działalności rolniczej, gdzie wody rzeczne wykorzystywane są do nawadniania pól uprawnych.

Współczynnik miesięcznego przepływu

Podstawą oceny ustroju rzecznego w zlewni jest analiza zmienności przepływu w cyklu rocznym z uwzględnieniem danych z wielolecia. Wykorzystuje się w tym celu średnie miesięczne wartości przepływu z wielolecia oraz średnie roczne wartości odpływu z wielolecia. Wartości miesięcznych współczynników przepływu obliczane są w sytuacji dysponowania przynajmniej pięcioletnim ciągiem obserwacji hydrologicznych. W związku z powyższym, w przeprowadzonej analizie nie uwzględniono Stacji Karkonosze, która dysponuje krótszą serią pomiarową. Wartości współczynnika mogą być wyrażane jako liczba niemianowana lub w procentach. W przypadku każdego miesiąca roku hydrologicznego współczynnik oblicza się według formuły (łącznie 12 wartości):

$k=SQ_{mi}/SQ_r$,

gdzie:

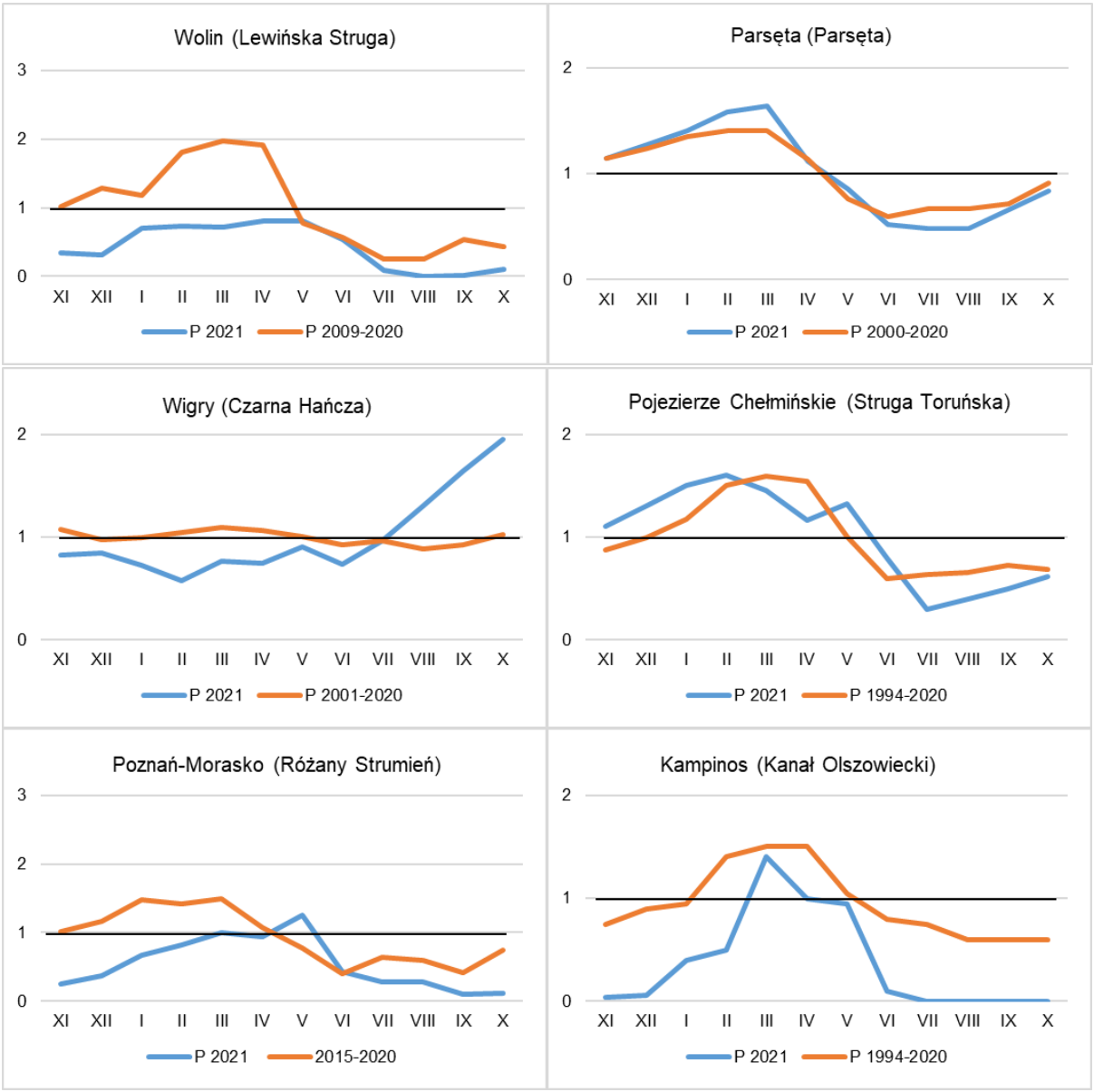
SQ_{mi} – średni przepływ j-tego miesiąca w wieloleciu;

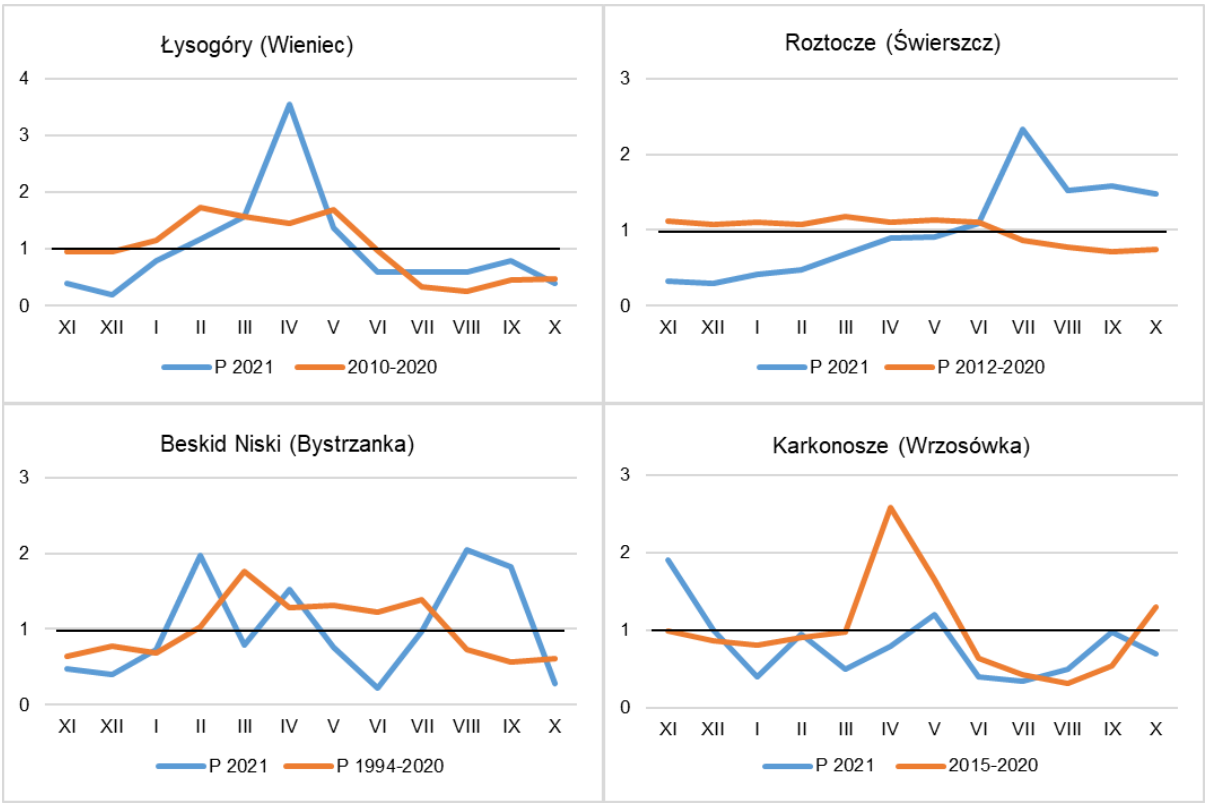
SQ_r – średni przepływ roczny w wieloleciu.

Wartość współczynnika przekraczająca 1 oznacza miesiąc z występującymi wezbraniami i przepływami powyżej wartości średniej rocznej. Wartość poniżej 1 oznacza miesiąc występowania przepływów niższych od średniej rocznej.

Współczynnik miesięcznych przepływów w 2021 roku hydrologicznym odbiegał od współczynnika przepływów dla wartości średnich z wielolecia i był zróżnicowany w poszczególnych zlewniach (Ryc. 14). Najbardziej typowy był przepływ Parsęty i Strugi

Toruńskiej. W zlewniach w Polsce północno-zachodniej i centralnej (Lewińska Struga, Parsęta, Struga Toruńska, Różany Strumień i Kanał Olszowiecki) zaznaczyły się wyższe przepływy w półroczu zimowym, co wynikało z większych sum opadów atmosferycznych przy mniejszej ewapotranspiracji w tym okresie. Z kolei w zlewniach Czarnej Hańczy i Świerszcza wyraźnie zaznaczają się większe przepływy pod koniec roku hydrologicznego, od czerwca do października. Zlewnie górskie (Bystrzanka i Wrzosówka) charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem współczynników przepływu w poszczególnych miesiącach. Na przepływy w tych zlewniach w znacznym stopniu wpływają wysokie opady w okresie poprzedzającym. Generalnie najmniejsze przepływy występowały głównie od czerwca do września, kiedy to pięć monitorowanych cieków okresowo (lub stale) nie prowadziło wody (Lewińska Struga, Struga Toruńska, Różany Strumień, Kanał Olszowiecki, Wieniec).





Ryc. 14. Zmienność czasowa współczynników miesięcznych przepływu w roku hydrologicznym 2021 na tle zmienności czasowej wartości współczynników miesięcznych przepływu z wielolecia

5.4. Skrócony bilans wodny

Jednym ze sposobów określenia bilansu wodnego w danym przedziale czasu (np. miesiącu, roku, wieloleciu) jest porównanie ilości wody jaka dostaje się do zlewni z opadami atmosferycznymi oraz ilości wody jaka z niej odpływa korytem rzecznym. Dla długich okresów i dużych powierzchniowo obszarów wprowadza się uogólnienia pozwalające na uzyskanie skróconego bilansu wodnego, polegającym na zestawieniu opadu atmosferycznego i odpływu powierzchniowego. Skrócony bilans wodny lepiej oddaje mechanizm i specyfikę obiegu w zlewniach niż klimatyczny bilans wodny, który jest wskaźnikiem umożliwiającym określenie stanu uwilgotnienia środowiska (oceny aktualnych zasobów wodnych) i jest określany jako różnica pomiędzy przychodami wody (w postaci opadów), a stratami w procesie parowania (ewapotranspiracji).

W niniejszym opracowaniu skrócony bilans wodny stanowi różnicę między roczną sumą opadów atmosferycznych P [mm], a roczną wysokością warstwy odpływu H_{pow} [mm]. Uzyskane wartości uproszczonego bilansu wodnego P=H+S, stanowią wówczas ilość wody uczestniczącą w obiegu wody w geoekosystemach S, którą stanowią zarówno straty

wynikające m.in. z parowania E i odpływu podziemnego H_{pod}, jak i zysk wody w zlewni związany ze zmianami jej retencji ΔR.

Określając uproszczony roczny bilans wodny w zlewniach ZMŚP dla 2021 roku wykorzystano parametry: P – średnią roczną sumę opadu obszarowego [mm], H – średnią roczną wielkość odpływu powierzchniowego roku [mm], S – średnią roczną wysokość strat bilansowych (parowanie, odpływ podziemny i zmiany retencji), tzw. deficyt odpływu [mm].

Analiza uproszczonego bilansu wodnego dla 2021 roku wykazała wyraźną zmienność przestrzenną oraz względnie korzystną sytuację hydrometeorologiczną do retencji wody w całej Polsce. Największy deficyt odpływu wody występował w wyżynnej strefie krajobrazowej, w Stacjach Roztocze (874,5 mm) i Łysogóry (787,9 mm). Zdecydowanie najniższy deficyt odpływu obliczono dla Parsęty i dla Karkonoszy. W przypadku zlewni Wrzosówki wpłynęły na to wysokie przepływy, a w konsekwencji wysoka warstwa odpływu, charakterystyczna dla zlewni górskiej. Z kolei w przypadku Parsęty, na niski deficyt odpływu (322,1 mm) wpłynęły ekstremalnie niskie opady atmosferyczne. W pozostałych zlewniach nizinnych deficyt odpływu mieścił się w zakresie od 369,9 mm (Struga Toruńska) do 535,7 mm (Kanał Olszowiecki) (Tab. 18). W porównaniu z rokiem 2020, w 3 Stacjach (Wigry, Roztocze i Beskid Niski) deficyt odpływu był wyższy w 2021 roku. Uproszczony bilans wodny w 2021 roku (średnio 517 mm) był zbliżony do ciepłych i normalnych pod względem opadów lat 2016 (529 mm) i 2020 (549 mm), a niższy niż w wilgotnym roku 2017 (625 mm). Z kolei porównując z suchymi i ciepłymi latami 2015, 2018 i 2019 (średni deficyt odpływu wody odpowiednio 440, 439 i 475 mm), wartość z roku 2021 jest wyższa.

Reasumując, znaczna ilość dostarczanej wraz z opadami wody, która w 2021 roku była wyższa od średniej wieloletniej, tracona była na parowanie terenowe. Straty na parowanie terenowe wskutek przeciętnego pod względem temperatury 2021 roku mogły wynosić około 300-350 mm rocznie (Awłasiewicz 1953). Większy deficyt wodny w większości zlewni może świadczyć o potencjalnej odbudowie zasobów wodnych po suchych latach 2018 i 2019.

Generalnie we wszystkich badanych zlewniach w 2021 roku, warunki do odbudowy zasobów wodnych były umiarkowane. W odróżnieniu do suchych lat 2018 i 2019, a podobnie jak w roku 2020 wystąpiła korzystna sytuacja do retencji wodnej w badanych geoekosystemach, co miało swoje odzwierciedlenie w dobrej jakości wód krążących w zlewniach i względnie sprzyjających warunków życiowych dla roślin i zwierząt (które byłyby znacznie lepsze przy niższych temperaturach powietrza).

Tab. 18. Miesięczne wysokości warstwy opadu i odpływu [mm] oraz skróconego bilansu wodnego [mm] w 2021 roku hydrologicznym w zlewniach ZMŚP

Stacja (zlewnia)	P Opad atmosferyczny	H_{pow} Odpływ powierzchniowy	S Deficyt odpływu $P-H_{pow}$
	[mm]		
Wolin (Lewińska Struga)	477,1	56,0	421,1
Parsęta (Parsęta)	443,5	121,4	322,1
Wigry (Czarna Hańcza)	604,8	170,0	434,8
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	539,4	169,5	369,9
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	512,7	23,9	488,8
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	585,0	49,3	535,7
Łysogóry (Wieniec)	825,8	37,9	787,9
Roztocze (Świerszcz)	923,0	48,4	874,6
Beskid Niski (Bystrzanka)	860,6	214,0	646,6
Karkonosze (Wrzosówka)	1025,1	740,7	284,4

6. GEOINDYKATORY JAKOŚCI WODY W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP

Przedstawione poniżej geowskaźniki zostały zaproponowane przez Szpikowskiego (2012) oraz zostały uwzględnione m.in. w ostatnich opracowaniach stanu geoekosystemów Polski w latach 2016-2019 (Tylkowski, Kostrzewski 2017, 2018; Majewski, Kostrzewski 2019, 2020, 2021).

W określeniu prawidłowości funkcjonowania badanych geoekosystemów ZMŚP istotne jest określenie stanu jakościowego wody, zwłaszcza na tych etapach jej obiegu, które związane są z dostawą i odprowadzaniem wody ze zlewni, czyli w opadach atmosferycznych i odpływie rzecznym. Charakterystyka jakości opadów pozwala na określenie roli czynników allochtonicznych, które wpływają na dynamikę dostawy substancji rozpuszczonych do zlewni badawczych ZMŚP. Z kolei analiza stężeń, a zwłaszcza ładunków substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych będąca funkcją krążenia wody w zlewniach ZMŚP umożliwia określenie ich roli i wpływu na geoekosystemy zewnętrzne – poza zlewniami ZMŚP. Analiza atmosferycznej dostawy ładunków substancji rozpuszczonych i ich odprowadzania rzecznego pozwala na określenie właściwości obiegu materii w zlewniach ZMŚP – za pomocą bilansu denudacyjnego.

W opracowaniu opisano geowskaźniki charakteryzujące jakościowe właściwości wód krążących w badanych zlewniach:

- klasyfikacja jakości pH/SEC opadów atmosferycznych,
- wskaźnik udziału czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów,
- wskaźnik chlorkowo-sodowy i stężenie substancji rozpuszczonych w opadach atmosferycznych,
- stan chemiczny wód podziemnych,
- stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych i klasyfikacja elementów fizyko-chemicznych wód powierzchniowych,
- zagrożenie eutrofizacją wód powierzchniowych,
- bilans jonów denudacyjnych i biogennych.

6.1. Opady atmosferyczne

Opady atmosferyczne cechują się przeważnie niskim stężeniem substancji rozpuszczonych i obniżonym odczynem. W zlewniach badawczych ZMŚP obserwowane jest wyraźne zróżnicowanie fizykochemicznych właściwości opadów atmosferycznych, które

związane jest ze zróżnicowanym czasowo-przestrzennie oddziaływaniem czynników naturalnych oraz zanieczyszczeń antropogenicznych.

Klasyfikacja pH/SEC opadów atmosferycznych

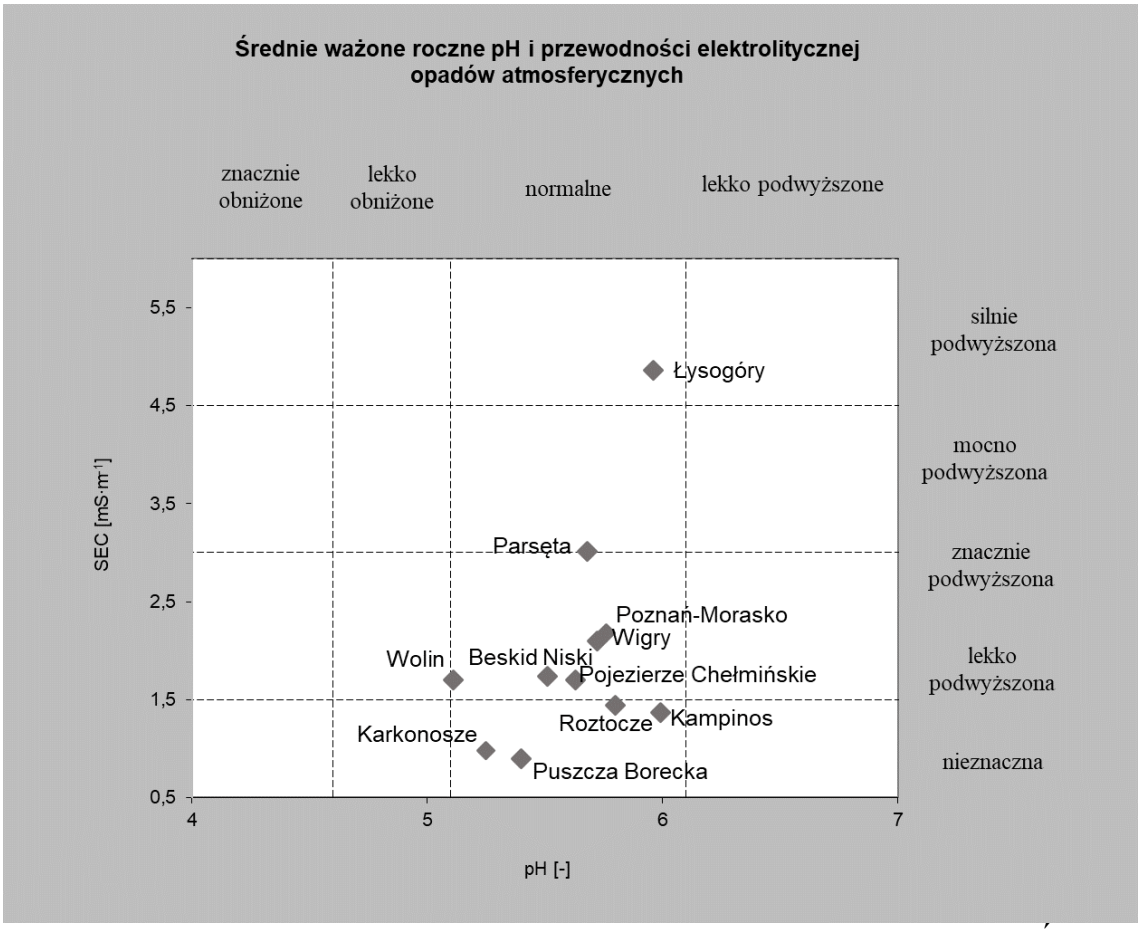
Wskaźnik ten został określony na podstawie tzw. klasyfikacji austriackiej jakości opadów atmosferycznych (Jansen i in. 1988). Ze względu na jego dużą przydatność do oceny odczynu i przewodności elektrolitycznej opadów atmosferycznych został wprowadzony do obligatoryjnego stosowania w sprawozdaniach Stacji Bazowych ZMŚP. Klasyfikacja pH/SEC ukazuje czasowe zróżnicowanie jakości wód opadowych (trendy i tendencje) w zróżnicowanych geoekosystemach Polski. W zakresie przewodności elektrolitycznej wskaźnik jest podzielony na 6 klas jakościowych (Tab. 19). W odniesieniu do odczynu wody opadowej klasyfikacja pH/SEC opadów atmosferycznych zawiera 5 klas jakościowych (Tab. 20) (Szpikowski 2012). Wskaźnik klasyfikacji pH/SEC opadów atmosferycznych w 2021 roku przedstawiono na rycinie 12.

Tab. 19. Klasyfikacja przewodności elektrolitycznej wód opadowych (wg Jansena i in. 1988)

średnia roczna ważona przewodność elektrolityczna SEC [$mS \cdot m^{-1}$]	klasa przewodności wód opadowych
SEC <= 1,5	nieznaczna
1,5 < SEC <=3,0	lekko podwyższona
3,0 < SEC <= 4,5	znacznie podwyższona
4,5 < SEC <=6,0	mocno podwyższona
6,0 < SEC <= 10,0	silnie podwyższona
SEC > 10,0	bardzo silnie podwyższona

Tab. 20. Klasyfikacja odczynu wód opadowych (wg Jansena i in. 1988)

średnia roczna ważona wartość odczynu wody pH [-]	klasa odczynu wód opadowych
pH <=4,1	silnie obniżony
4,1 < pH <= 4,6	znacznie obniżony
4,6 < pH <= 5,1	lekko obniżony
5,1 < pH <= 6,1	normalny
6,1 < pH <= 6,5	lekko podwyższony
pH > 6,5	znacznie podwyższony



Ryc. 15. Klasyfikacja pH i SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku (dla opadu całkowitego)

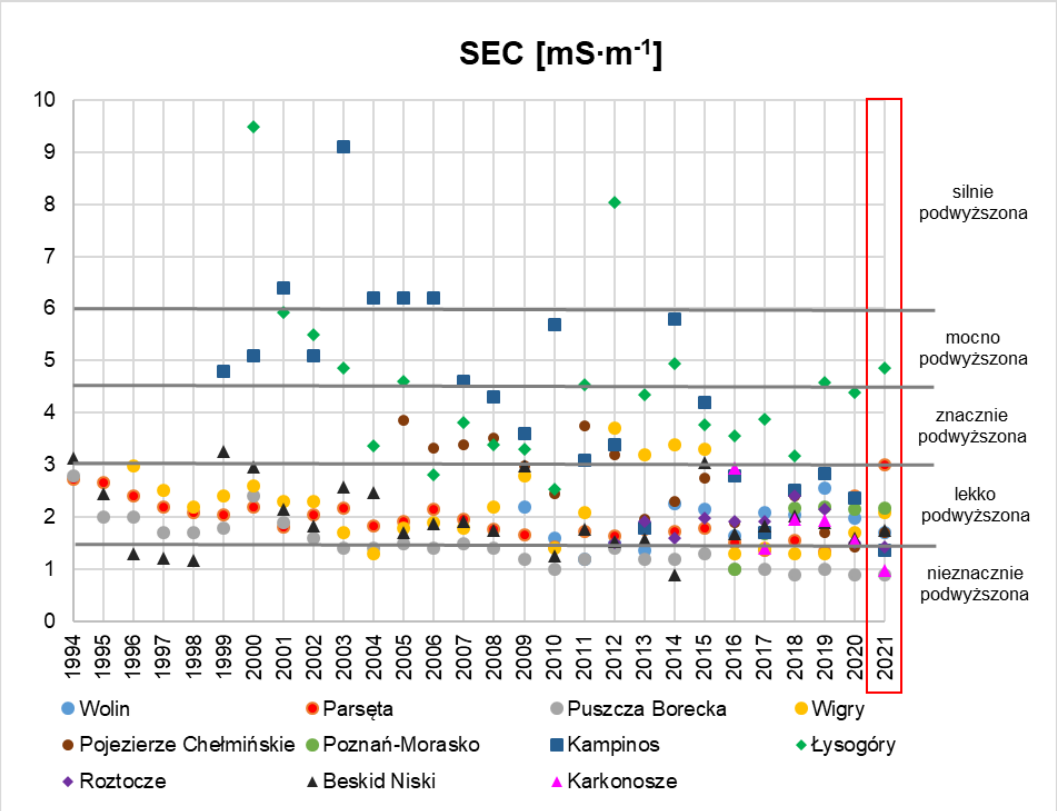
Wskaźnik klasyfikacji SEC opadów atmosferycznych w 2021 roku hydrologicznym w zakresie średniej ważonej przewodności elektrolitycznej (Ryc. 15) charakteryzował się następującymi właściwościami:

- przewodność nieznaczną stwierdzono w 4 Stacjach: Puszcza Borecka, Kampinos, Roztocze i Karkonosze;
- przewodność lekko podwyższoną stwierdzono w 5 Stacjach: Wolin, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko i Beskid Niski;
- przewodność znacznie podwyższoną stwierdzono w Stacji Parsęta;
- przewodność silnie podwyższoną stwierdzono w Stacji Łysogóry.

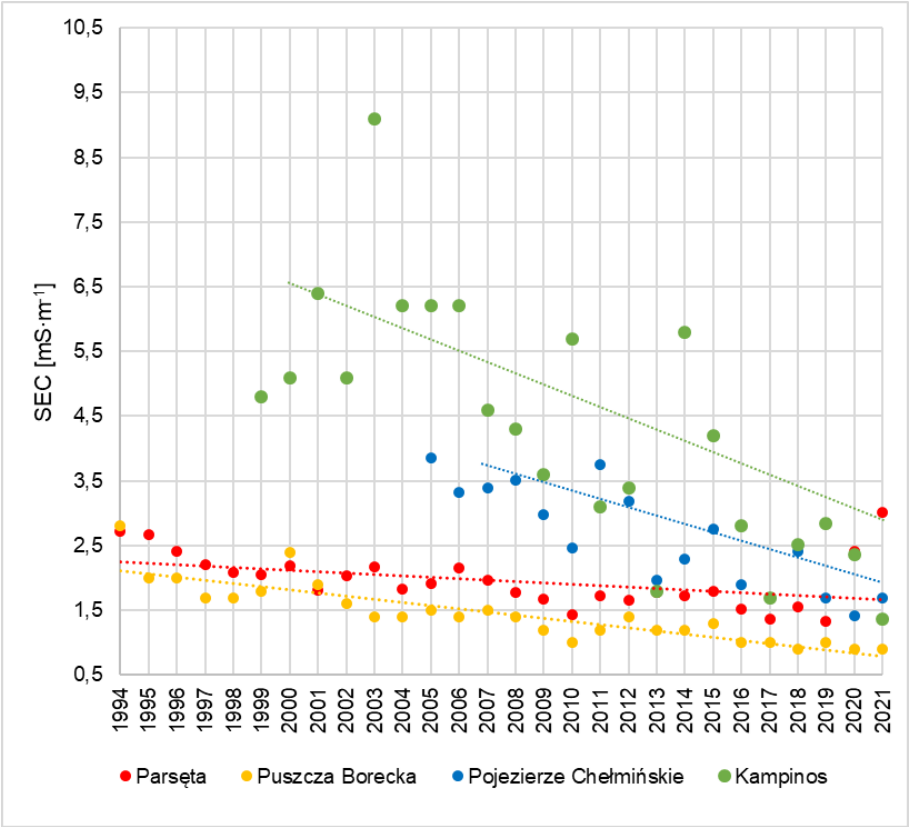
Jakość opadów atmosferycznych w 2021 roku pod względem wskaźnika SEC w porównaniu z ubiegłym rokiem w większości stacji pozostała na podobnym poziomie. Poprawie uległa jakość opadów w Stacjach Kampinos, Roztocze i Karkonosze (zakwalifikowane do klasy nieznacznie podwyższonej przewodności), a pogorszeniu uległa jakość opadów w Parsęcie (zakwalifikowana do klasy znacznie podwyższonej przewodności), na Pojezierzu Chełmińskim (zakwalifikowana do klasy lekko podwyższonej przewodności).

Jakość opadów atmosferycznych nieznacznie pogorszyła się również w Stacji Łysogóry, która została zakwalifikowana do klasy mocno podwyższonej (podobnie jak w roku 2019). Gorszą, w porównaniu z innymi stacjami, jakość opadów atmosferycznych w Górach Świętokrzyskich można tłumaczyć wyniesieniem obszaru zlewni Wieńca w stosunku do otoczenia od 100 do 300 m, co powoduje istotny wpływ zarówno lokalnych, jak i odległych emisji przemysłowych i transportowych. Z kolei na zakwalifikowanie przewodności w Stacji Parsęta do klasy silnie podwyższonej wpłynęło nieznaczne (o 0,01 $mS \cdot m^{-1}$) przekroczenie wartości progowej (3 $mS \cdot m^{-1}$), które wynika z pomiarów przewodności dla opadu całkowitego – w przypadku opadu mokrego przewodność w tej Stacji była nieznacznie podwyższona. W pozostałych stacjach mineralizacja opadów była lekko podwyższona lub nieznaczna (Ryc. 16).

Wieloletni przebieg zmienności przewodności elektrolitycznej dla większości Stacji Bazowych wskazuje na korzystny trend obniżania się stężenia substancji rozpuszczonych w wodach opadowych. Istotny statystycznie trend spadkowy mineralizacji opadów ($p<0,05$) odnotowano dla 4 stacji posiadających długie serie pomiarowe, tj. dla Parsęty, Puszczy Boreckiej, Pojezierza Chełmińskiego i Kampinosu. Trend 10. letni spadku SEC wynosi od 0,19 $mS \cdot m^{-1}$ na Pojezierzu Drawskim (Parsęta) do 1,51 $mS \cdot m^{-1}$ w Kampinosie (Ryc. 17).



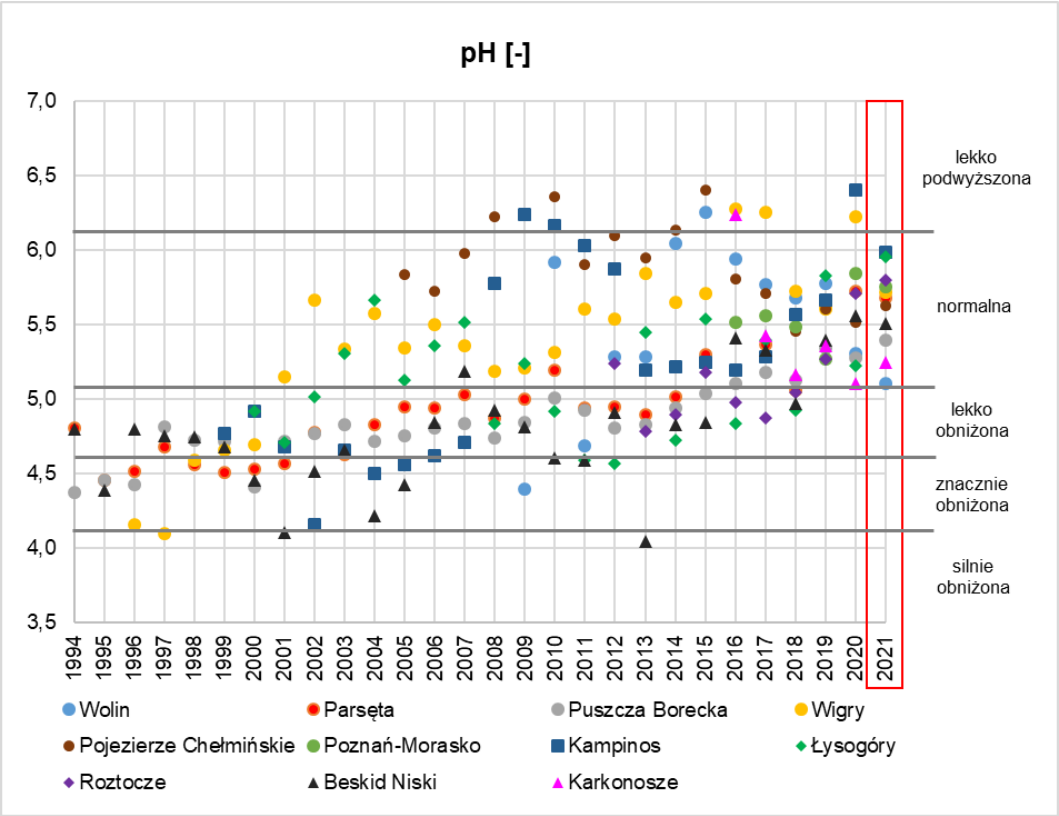
Ryc. 16. Zmienność czasowa SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia



Ryc. 17. Istotne statystycznie trendy spadku SEC w opadach atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP – Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos

W 2021 roku hydrologicznym w klasyfikacji odczynu opadów atmosferycznych we wszystkich Stacjach ZMŚP stwierdzono pH normalne (Ryc. 15). Odczyn opadów atmosferycznych w porównaniu do roku 2020 uległ poprawie (w roku ubiegłym w dwóch Stacjach: Wigry i Kampinos stwierdzono pH lekko podwyższone). Od początku pomiarów w roku 1994 normalny odczyn opadów atmosferycznych we wszystkich monitorowanych zlewniach stwierdzono jedynie w 2019 roku (Ryc. 18).

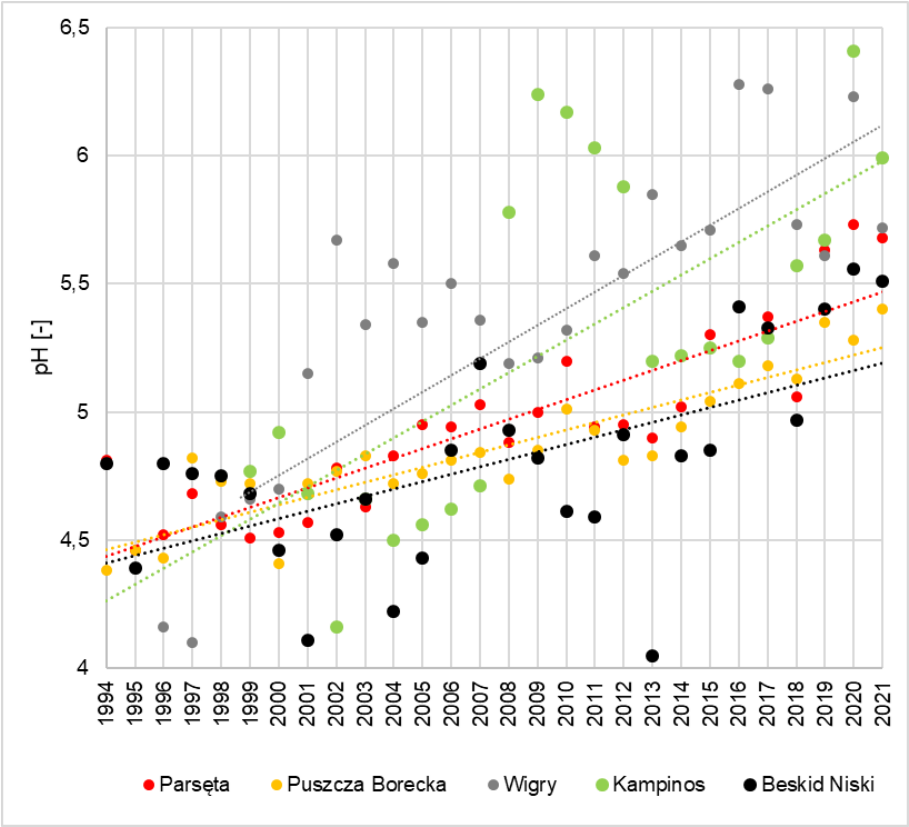
Zmienność czasowa odczynu wód opadowych wykazuje korzystną tendencję do zmniejszania zakwaszenia opadów – wzrostu wartości pH w Stacjach Bazowych ZMŚP. Istotny statystycznie trend wzrostu pH opadów ($p<0,05$) odnotowano dla 5 Stacji Bazowych: Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Kampinos i Beskid Niski. Trend 10. letni spadku kwasowości wynosi od 0,24 pH w Beskidzie Niskim do 0,59 pH w Kampinosie (Ryc. 19).



Ryc. 18. Zmienność czasowa kwasowości opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia

Cechą charakterystyczną zmienności odczynu opadów w Polsce w ostatnich dwóch dekadach był znaczny spadek kwasowości opadów atmosferycznych, np. w Stacjach: Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry odczyn opadów na poziomie charakterystycznym dla wód znacznie zakwaszonych utrzymywał się do lat dziewięćdziesiątych XX wieku (Ryc. 18). W XXI wieku odczyn wzrósł do lekko obniżonego lub normalnego. Pod względem czasowo-przestrzennym największy progres odczynu opadów odnotowano w Stacji Kampinos, na co wpłynęła m.in. poprawa jakości powietrza atmosferycznego w aglomeracji warszawskiej. Dla stacji położonych w wyżynnej strefie krajobrazowej (Łysogóry i Roztocze) oraz dla Wolina i Pojezierza Chełmińskiego nie można stwierdzić istotnej statystycznie tendencji zmiany odczynu opadów (Ryc. 18, Ryc. 19).

Należy podkreślić, że w 2021 roku jakość atmosferycznej dostawy wody do badanych zlewni była dobra. W 2021 roku opady miały raczej niską mineralizację i normalny odczyn. Mała koncentracja substancji rozpuszczonych i niska kwasowość opadów w 2021 roku w większości geoekosystemów (poza zlewnią Wieńca w Górach Świętokrzyskich) mogą świadczyć o względnie niskiej antropopresji i małej dostawie zanieczyszczeń do atmosfery.



Ryc. 19. Istotne statystycznie trendy wzrostu odczynu (spadku zakwaszenia) opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP – Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Kampinos i Beskid Niski

Wskaźnik udziału czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów atmosferycznych

Wskaźnik ten jest zdefiniowany jako stosunek średnich ważonych stężeń jonów NO_3^- i SO_4^{2-} wyrażonych w mikroekwiwalentach na dm^{-3} (Kostrzewski i in. 2007). Jeśli wskaźnik przyjmuje wartość poniżej 1 – w zakwaszaniu większy udział ma SO_4^{2-}, wartości powyżej 1 wskazują na dominację NO_3^- w zakwaszaniu, natomiast wartość 1 dotyczy równoważnego udziału SO_4^{2-} i NO_3^- w zakwaszaniu wód opadowych (Szpikowska 2011). Wskaźnik oblicza się za pomocą formuły:

$WCK = SJ\ NO_3^-/SJ\ SO_4^{2-}$ [-]

gdzie:

WCK – wskaźnik czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów;

$SJ\ NO_3^-$ – stężenie jonów NO_3^- [$meq \cdot dm^{-3}$];

$SJ\ SO_4^{2-}$ – stężenie jonów SO_4^{2-} [$meq \cdot dm^{-3}$].

Zmiany zachodzące w chemizmie wód opadowych, podziemnych i powierzchniowych upoważniają do wykorzystywania tego wskaźnika kwasogennego ujmującego relację stężenia jonów azotanowych do jonów siarczanowych. Obecność tych jonów może wskazywać na zmiany zachodzące m.in. w jakości powietrza oraz opadów atmosferycznych, co wywiera

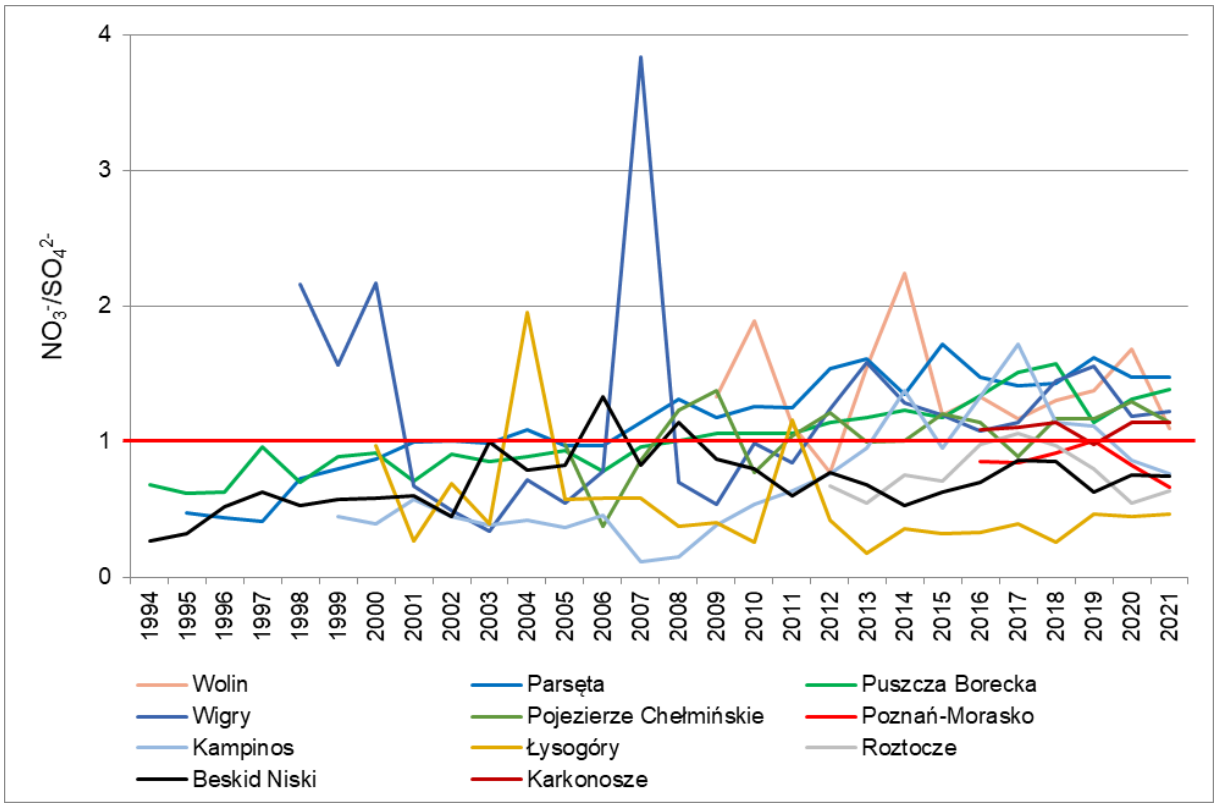
wpływ na jakość wody w kolejnych etapach jej obiegu – wód podziemnych i powierzchniowych.

Za kwasowość opadów atmosferycznych w około 60-70% odpowiada dwutlenek siarki, zaś tlenki azotu za pozostałe 30-40% (Isidorow, Jaroszyńska 1998).

Zmienność czasowa wskaźnika udziału czynników kwasogennych dla Stacji Bazowych ZMŚP wykazuje w badanym wieloleciu 1994-2021 (Ryc. 20) następujące tendencje:

- utrzymującą się przewagę roli NO_3^- nad SO_4^{2-} od drugiej dekady XXI wieku w większości monitorowanych zlewni, co świadczy o aktualnie większym wpływie zanieczyszczeń komunikacyjnych w zakwaszaniu opadów;
- do pierwszej dekady XXI wieku na zakwaszenie opadów większy wpływ wywierały zanieczyszczenia ze spalania paliw kopalnych (m.in. wskutek ogrzewania obiektów w sezonie zimowym);
- większy w 2021 roku udział NO_3^- w zakwaszaniu opadów stwierdzono w 6 stacjach położonych w północnej i zachodniej Polsce: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie i Karkonosze;
- większy w 2021 roku udział SO_4^{2-} w zakwaszaniu opadów stwierdzono w 5 stacjach położonych w Polsce południowej i południowo-wschodniej: Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski oraz w pobliżu dużych aglomeracji miejskich: Poznań-Morasko i Kampinos.

Na podstawie wieloletniej serii pomiarowej, zaobserwowano zależność przestrzenną większego udziału NO_3^- w zakwaszaniu opadów w Polsce północnej i zachodniej, z kolei większego udziału SO_4^{2-} w Polsce południowo-wschodniej. W porównaniu z rokiem 2020 nie nastąpiły większe zmiany w zakresie wskaźnika czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów. Tendencja czasowa wskaźnika udziału czynników kwasogennych ukazuje większą presję w zakwaszaniu opadów czynnika związanego z zanieczyszczeniami komunikacyjnymi (azotany) niż z zanieczyszczeniami pochodzącymi ze spalania paliw kopalnych (siarczany).



Ryc. 20. Zmiany wskaźnika czynników kwasogennych w zakwaszaniu wód opadowych w Stacjach Bazowych ZMŚP w wieloleciu 1994-2021

Wskaźnik chlorkowo-sodowy i stężenie substancji rozpuszczonych w opadach atmosferycznych

O regionalnym zróżnicowaniu antropogenicznego zanieczyszczenia opadów atmosferycznych w strefach krajobrazowych Polski można wnioskować na podstawie wartości stężenia jonów chlorkowych i sodowych. Zawartość sodu oraz chlorków w opadzie atmosferycznym zależy głównie od napływu mas powietrza polarnomorskiego, zasobnego w aerozole pochodzenia morskiego (Cl^- i Na^+). W niezanieczyszczonej wodzie opadowej stężenie jonów Cl^- i Na^+ jest stosunkowo małe (poniżej 5 $mg \cdot dm^{-3}$). Opad atmosferyczny jest stałym rozproszonym źródłem chlorków i sodu występującym na obszarze całego kraju, a ich naturalna koncentracja powinna zmniejszać się w miarę oddalania się od morza. Dlatego najwyższe „naturalne" stężenia jonów Cl^- i Na^+ powinny występować w nadmorskiej strefie nizinnej, na pobrzeżu Bałtyku (Stacja Bazowa Wolin). Niższe stężenia jonów Na^+ i Cl^- w opadach powinny cechować strefę pojezierną Niżu Polskiego (np. Stacje Bazowe Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie). Z kolei najniższe stężenia jonów Cl^- i Na^+ powinny być w opadach w stacjach położonych najdalej od strefy nadmorskiej (strefa wyżyn polskich – Stacje Roztocze i Łysogóry oraz strefa gór średnich – Stacje Beskid Niski i Karkonosze).

Przestrzenne zróżnicowanie stężenia jonów Cl^- i Na^+ w wodach opadowych w 2021 roku można rozpatrywać dla 3 transektów południkowych:

- transekt zachodni obejmuje strefy: nadmorską (Wolin) → pojezierzy (Parsęta, Poznań-Morasko) → gór średnich (Karkonosze);
- transekt środkowy obejmuje strefy: pojezierzy (Pojezierze Chełmińskie) → nizin (Kampinos) → wyżyn (Łysogóry) → gór średnich (Beskid Niski);
- transekt wschodni obejmuje strefy: pojezierzy (Puszcza Borecka, Wigry) → wyżyn (Roztocze).

Gradient stężenia jonów Cl^- i Na^+ wyznaczono także w transekcie równoleżnikowym, w strefie młodoglacjalnej Niżu Polskiego (Stacje ZMŚP: Wolin → Parsęta → Puszcza Borecka → Wigry). W transektach południkowych i równoleżnikowym stężenie jonów chlorkowych i sodowych powinno ulegać redukcji w miarę oddalania się od wybrzeża Bałtyku (Tab. 21).

W 2021 roku, podobnie jak w latach wcześniejszych, rozkład przestrzenny stężenia jonów pochodzenia morskiego w Polsce nizinnej wykazywał pozytywną prawidłowość spadku koncentracji jonów Cl^- i Na^+ wraz z oddalaniem się od wybrzeża Bałtyku. W strefie nadmorskiej (Wolin) średnie ważone stężenie jonów chlorkowych i sodowych było najwyższe (odpowiednio 1,42 i 0,89 $mg \cdot dm^{-3}$). W miarę oddalania się od strefy nadmorskiej stężenie tych jonów malało i wynosiło: w strefie pojezierzy (Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie i Poznań-Morasko) Cl^- 0,57 i Na^+ 0,40 $mg \cdot dm^{-3}$ i w strefie nizin (Kampinos) Cl^- 0,36 i Na^+ 0,14 $mg \cdot dm^{-3}$. W transekcie równoleżnikowym strefy młodoglacjalnej Niżu Polskiego występował spadek stężenia zarówno chlorków, jak i sodu w opadach – odpowiednio od 1,42 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ i 0,89 mg $Na \cdot dm^{-3}$ w Wolinie, poprzez 0,76 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ i 0,50 mg $Na \cdot dm^{-3}$ w zlewni górnej Parsęty oraz 0,37 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ i 0,14 mg $Na \cdot dm^{-3}$ w Puszczy Boreckiej do 0,28 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ i 0,12 mg $Na \cdot dm^{-3}$ w Wigrach.

Średnie stężenia jonów chlorkowych i sodowych w strefie wyżynnej (2,90 mg Cl dm^{-3} i 0,61 mg Na dm^{-3}) były wyższe od występujących w strefie nizinnej i pojeziernej. Stężenie jonów chlorkowych były nawet wyższe niż w regionie nadmorskim, dotyczy to charakterystyki opadów w Górach Świętokrzyskich, na Roztoczu stężenia są na podobnym poziomie jak w Kampinosie. Taka sytuacja może świadczyć o antropogenicznym zanieczyszczeniu opadów atmosferycznych, którego źródłem są pobliskie elektrownie, ciepłownie, zakłady przemysłowe, gospodarstwa domowe, jak również komunikacja. Stacja Łysogóry jest podatna na napływ zanieczyszczeń pochodzenia lokalnego, jak również bardziej odległego (głównie z kierunków: zachodniego oraz północno-zachodniego

i południowo-zachodniego), poprzez położenie na wyniesieniu (100-300 m ponad otaczające tereny).

Tab. 21. Średnie stężenie substancji rozpuszczonych w wodach opadowych w zlewniach ZMŚP w 2021 roku

Stacja ZMŚP	Strefa krajobrazowa	S-SO_0	N-NO_3	N-NH_4	Cl	Na	K	Mg	Ca
		[mg·dm^{-3}]							
Wolin	nadmorska	0,49	0,47	0,12	1,42	0,89	0,38	0,15	0,51
Parsęta	pojezierzy	0,28	0,36	0,57	0,76	0,50	0,13	0,18	3,38
Puszcza Borecka		0,24	0,29	0,51	0,37	0,14	0,06	0,04	0,17
Wigry		0,29	0,31	0,53	0,28	0,12	0,16	0,05	0,30
Pojezierze Chełmińskie		0,36	0,36	0,69	0,40	0,54	0,23	0,73	0,31
Poznań-Morasko		0,60	0,35	0,53	1,03	0,69	0,30	0,15	1,07
Kampinos	nizin	0,48	0,32	0,52	0,36	0,14	0,07	0,11	0,69
Łysogóry	wyżyn	3,62	1,47	1,90	5,44	1,12	1,54	1,58	3,75
Roztocze		0,52	0,29	0,24	0,36	0,09	0,14	0,09	1,80
Beskid Niski	gór średnich	1,05	0,68	0,18	0,61	0,45	0,23	0,27	1,43
Karkonosze		0,28	0,28	0,46	0,25	0,11	0,03	0,02	0,12

W zachodnim transekcie południkowym, podobnie jak w latach poprzednich, stwierdzono wyraźny spadek stężenia jonów sodowych i chlorkowych, od pasa nadmorskiego (Wolin 1,42 mg Cl·dm^{-3} i 0,89 mg Na·dm^{-3}), poprzez pas pojezierzy (Parsęta 0,76 mg Cl·dm^{-3} i 0,50 mg Na·dm^{-3}, Poznań-Morasko 1,03 mg Cl·dm^{-3} i 0,69 mg Na·dm^{-3}) do pasa gór średnich (Karkonosze 0,25 mg Cl·dm^{-3} i 0,11 mg Na·dm^{-3}). Normalna tendencja spadku stężenia jonów chlorkowych i sodowych w kierunku południowym została zakłócona w miejskiej Stacji Poznań-Morasko, gdzie opady atmosferyczne miały wyższe stężenia chlorków i sodu niż w Stacji Parsęta, położonej ok. 150 km na północ. Przyczyną takiej sytuacji było zanieczyszczenie opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia wskutek negatywnego oddziaływania aglomeracji Poznania.

W środkowym transekcie południkowym tendencja spadku stężenia jonów chlorkowych i sodowych została całkowicie zaburzona. Największe stężenia wystąpiły w pasie wyżyn (Łysogóry 5,44 mg Cl·dm^{-3} i 1,12 mg Na·dm^{-3}) i gór średnich (Beskid Niski 0,61 mg Cl·dm^{-3} i 0,45 mg Na·dm^{-3}), a niższe w strefie pojezierzy (Pojezierze Chełmińskie 0,40 mg Cl·dm^{-3} i 0,54 mg Na·dm^{-3}) i nizin (Kampinos 0,36 mg Cl·dm^{-3} i 0,14 mg Na·dm^{-3}).

We wschodnim transekcie południkowym, nie stwierdzono istotnych różnic stężeń jonów chlorkowych i sodowych w pasie pojezierzy i wyżyn. Na wyżynnym Roztoczu wyniosły one 0,36 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ i 0,09 mg $Na \cdot dm^{-3}$, a w strefie pojezierzy: w Wigrach: 0,28 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ 0,12 mg $Na \cdot dm^{-3}$ i w Puszczy Boreckiej: 0,37 mg $Cl \cdot dm^{-3}$ 0,14 mg $Na \cdot dm^{-3}$). Wyższe stężenia jonów chlorkowo-sodowych w Polsce południowo-wschodniej mogą być przejawem zanieczyszczenia opadów atmosferycznych, wskutek dominacji napływu mas powietrza z kierunku zachodniego, z uprzemysłowionej i zurbanizowanej części Polski, np. pochodzących z unoszenia pyłów, a także z emisji kwasu solnego i chlorku amonu z zakładów przemysłowych (Sapek 2009). Taka sytuacja świadczyć może o antropogenicznej dostawie zanieczyszczeń (głównie przemysłowych) wraz z opadami, które napływają zwłaszcza z kierunku zachodniego, z przemysłowego regionu Górnego Śląska, z Ostrawsko-Karwińskiego Okręgu Przemysłowego w Czechach oraz z obszaru aglomeracji Krakowa. Należy jednakże podkreślić, że stężenia chlorków i sodu w całej Polsce były dość niskie, jedynie stężenia chlorków w Stacji Łysogóry nieznacznie przekroczyły wartość 5 $mg \cdot dm^{-3}$.

Analiza średniego stężenia substancji rozpuszczonych w wodach opadowych w 2021 roku wykazała pewne różnice przestrzenne (Tab. 21). Na jakość opadów atmosferycznych większy wpływ wywierały czynniki lokalne (np. użytkowanie terenu) i regionalne (np. oddziaływanie Bałtyku, źródła zanieczyszczeń), a nie kontynentalne (np. cyrkulacja atmosferyczna i napływ mas powietrza).

6.2. Wody podziemne

Stan chemiczny wód podziemnych

Dla oceny stanu chemicznego wód podziemnych wykorzystano zasady określone w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz. U. 2019, poz. 2148). W przypadku, gdy dysponowano tylko jednym punktem monitoringu wód podziemnych, stan chemiczny określony w punkcie badawczym przyjęto za stan chemiczny całej zlewni. Za stan chemiczny całej zlewni, w której znajduje się kilka punktów badawczych, przyjęto stan najniższy nawet w przypadku gdy określono go tylko w jednym z punktów badawczych.

Zlewnie ZMŚP położone są w następujących jednolitych częściach wód podziemnych (JCWPd): Wolin (5), Parsęta (9), Puszcza Borecka (21), Wigry (23), Pojezierze Chełmińskie (40), Poznań-Morasko (62), Kampinos (65), Łysogóry (103), Roztocze (127), Beskid Niski (157), Karkonosze (90).

W opracowaniu określono klasy jakości wód podziemnych w zlewniach ZMŚP jedynie dla wybranych (nie wszystkich) elementów fizykochemicznych zawartych w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej (2019a):

- elementy ogólne (odczyn, przewodność elektrolityczna);
- elementy nieorganiczne (azotany, jon amonowy, chlorki, fosforany, magnez, potas, siarczany, sód, wapń, wodorowęglany).

W 2021 roku wody podziemne we wszystkich jednolitych częściach wód występujących w zlewniach podziemnych ZMŚP posiadały dobry stan chemiczny (Tab. 22). Klasy jakości wody w żadnej zlewni podziemnej nie były gorsze od klasy zadowalającej, dla której wartości elementów fizykochemicznych są podwyższone w wyniku naturalnych procesów zachodzących w wodach podziemnych lub słabego wpływu działalności człowieka. Odczyn wody zakwalifikowany do klasy IV występował w zlewniach położonych w strefie wyżynnej (Łysogóry i Roztocze) oraz w zlewni górskiej (Karkonosze). Należy zaznaczyć, że niski odczyn wód wynikał z czynników naturalnych i nie wpływał na obniżenie zarówno klasy jakości wody, jak i stanu chemicznego. Obniżony odczyn wody w Karkonoszach wynikał ze specyficznej budowy geologicznej, gdzie infiltrująca woda opadowa zwiększała zakwaszenie w kontakcie ze skałami kwaśnymi, np. granitami.

Tab. 22. Klasy jakości wody i stan chemiczny wód podziemnych w zlewniach ZMŚP w 2021 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych

Stacja ZMŚP	Odczyn	PEW	Ca	Na	Mg	K	PO_4	HCO_3	Cl	SO_4	NO_3	NH_4	Klasa jakości wody	Stan chemiczny
	[-]	[mS·m^{-1}]	[mg·dm^{-3}]											
Wolin	I	I	II	I	I	I	I	II	I	I	I	I	dobra	dobry
Parsęta	I	I	II	I	I	I	I	I	I	I	III	I	zadowalająca	dobry
Puszcza Borecka	I	II	III	III	I	I	I	I	I	I	I	I	zadowalająca	dobry
Wigry	I	I	III	I	I	I	I	II	I	II	II	I	zadowalająca	dobry
Pojezierze Chełmińskie	I	I	I	I	I	I	I	III	I	I	I	I	zadowalająca	dobry
Poznań-Morasko	I	II	III	I	I	I	I	III	II	II	I	I	zadowalająca	dobry
Kampinos	I	II	III	I	I	I	I	II	I	II	I	I	zadowalająca	dobry
Łysogóry	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	zadowalająca	dobry
Roztocze	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	zadowalająca	dobry
Beskid Niski	I	I	II	I	I	I	I	II	I	I	II	I	dobra	dobry
Karkonosze	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	zadowalająca	dobry

Klasy jakości: I bardzo dobra, II dobra, III zadowalająca, IV niezadowalająca, V zła

Zlewnie nizinne w większości posiadały zadowalającą klasę jakości wód podziemnych (Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko i Kampinos). Jedynie nadmorska zlewnia Lewińskiej Strugi (Stacja Wolin) miała dobrą klasę. W głównej mierze wpłynęły na to wyższe stężenia jonów wapnia i wodorowęglanowych. Z kolei na klasę jakości wód podziemnych w zlewniach wyżynnych oraz górskich w głównej mierze wpłynął odczyn. Do dobrej klasy zakwalifikowano tylko Beskid Niski, a do zadowalającej pozostałe trzy zlewnie (Łysogóry, Roztocze i Karkonosze). W porównaniu z poprzednim rokiem klasy jakości wody pozostały na tym samym poziomie. Jednak zwiększyła się frekwencja elementów fizykochemicznych zakwalifikowanych do II i III klasy. Spadek klasy zanotowano dla jonów wapnia w zlewni górnej Parsęty, jonów sodu w Puszczy Boreckiej, dla jonów wodorowęglanowych w Poznaniu oraz dla jonów siarczanowych w Kampinosie. Poprawie uległy tylko jony wodorowęglanowe w Puszczy Boreckiej. Powyższe zmiany nie wpłynęły jednak na klasyfikację wód w tych zlewniach.

6.3. Wody powierzchniowe

Stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych i klasyfikacja elementów fizyko-chemicznych wód powierzchniowych

W 2021 roku monitoring fluwialnego odpływu wody i substancji rozpuszczonych prowadzono w 10 ciekach wodnych. Jedynie dla odpływu z jeziora Łękuk (Puszcza Borecka) niemożliwe było prowadzenie tego zadania ze względu na zakłócenia odpływu wody w cieku spowodowane działalnością bobrów.

Odpływ fluwialny stanowi podstawową drogę odprowadzania substancji rozpuszczonych. W odpływie rzecznym najważniejszym źródłem dostawy substancji rozpuszczonych jest dostawa atmosferyczna i zasilanie z drenażu wód podziemnych. Badania ZMŚP wykazują, że w znacznym stopniu na skład chemiczny wód rzecznych wpływa działalność człowieka, szczególnie na obszarach zurbanizowanych oraz intensywnie wykorzystywanych rolniczo (Szpikowski 2012).

Analiza składu chemicznego wód rzecznych w 2021 roku podobnie jak w poprzednich latach pozwoliła zakwalifikować je wg klasyfikacji Altowskiego i Szwieca (Macioszczyk 1987) do wód prostych o następujących typach hydrochemicznych:

- wapniowo-wodorowęglanowych (Struga Toruńska, Świerszcz);
- wodorowęglanowo-siarczanowo-wapniowych (Bystrzanka);
- wodorowęglanowo-wapniowych (Lewińska Struga, Parsęta);
- wodorowęglanowo-wapniowo-sodowych (Czarna Hańcza);
- wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowych (Różany Strumień);

- wapniowo-wodorowęglanowo-siarczanowych (Kanał Olszowiecki);
- siarczanowo-wapniowo-wodorowęglanowo-sodowych (Wieniec);
- siarczanowo-wodorowęglanowo-wapniowo-sodowych (Wrzosówka).

Mineralizacja wód rzecznych i transport ładunku substancji rozpuszczonych determinowane są przepływem wody. Dynamika przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC – wskaźnik mineralizacji wód rzecznych) zależy od wielkości przepływu i wykazuje zależność odwrotnie proporcjonalną. Najwyższe wartości SEC występują podczas niskich stanów wód, kiedy w wodach rzecznych jest znaczący udział wysoko zmineralizowanych wód podziemnych. Natomiast najniższe wartości SEC występują podczas wysokiego przepływu wody, zwłaszcza w trakcie wezbrań roztopowych i opadowych, kiedy wody rzeczne ulegają rozcieńczaniu w wyniku znacznej dostawy niskozmineralizowanego deszczu i śniegu. Przewodność elektrolityczna właściwa (SEC) w 2021 roku cechowała się dużym zróżnicowaniem przestrzennym (Tab. 23). Mineralizacja wody w 2021 roku była zbliżona z zawartością substancji rozpuszczonych w latach poprzednich (lat suchych i wilgotnych, z różnymi przepływami), co może świadczyć o ograniczonym wpływie warunków meteorologicznych na mineralizację wód rzecznych w badanych geoekosystemach. Najwyższa przewodność elektrolityczna właściwa występowała w Strudze Toruńskiej 86,90 $mS \cdot m^{-1}$ i Różanym Strumieniu 83,83 $mS \cdot m^{-1}$, co związane było m.in. ze znacznymi przekształceniami antropogenicznymi zlewni (zmiany użytkowania terenu, deforestacja zlewni dla potrzeb urbanizacji i rolnictwa) oraz dostawą zanieczyszczonych wód do cieków – mocno zmineralizowanych wód ze spływu powierzchniowego i podziemnego z obszarów rolniczych (nawozy) i miejskich (ścieki). Z kolei najniższa wartość przewodności elektrycznej występowała w górskim cieku – Wrzosówce w Karkonoszach 2,51 $mS \cdot m^{-1}$. W strefie wyżynnej (średnia mineralizacja 26,89 $mS \cdot m^{-1}$) i górskiej (średnia mineralizacja 17,21 $mS \cdot m^{-1}$) odpływ wody ze zlewni jest szybszy i udział nisko zmineralizowanych wód opadowych w systemie rzecznym jest największy. W pozostałych monitorowanych ciekach nizinnych (Lewińska Struga, Parsęta, Czarna Hańcza i Kanał Olszowiecki) wartość SEC wynosiła od 35,88 do 60,67 $mS \cdot m^{-1}$ (Tab. 23). Zmienność przestrzenna wartości SEC w 2021 roku była zależna od litologii utworów przypowierzchniowych zlewni i związanej z nią jakości drenowanych wód podziemnych, typu zasilania wód rzecznych, reżimu odpływu wody oraz w mniejszym stopniu od uwarunkowań pogodowych. Prawidłowością odpływu materii rozpuszczonej w systemie fluwialnym jest większy jej ładunek w strefie nizinnej niż wyżynnej, a zwłaszcza niż w strefie górskiej. W regionach nizinnych przeważają procesy

denudacji chemicznej (materia rozpuszczona w ciekach), a w regionach górskich dominują procesy denudacji mechanicznej (materia zawieszona i wleczona w ciekach).

Odczyn wód rzecznych w 2021 roku również był zbliżony do wartości z lat wcześniejszych, jednak cechował się mniejszym zróżnicowaniem przestrzennym niż mineralizacja wody. Zdecydowana większość cieków miała odczyn obojętny ~8 pH. Jedynie Wrzosówka w Karkonoszach posiadała odczyn bardziej kwaśny, poniżej 6 pH. Kwaśny odczyn w tym cieku nie był jednak wynikiem zanieczyszczenia antropogenicznego, ale był efektem budowy geologicznej i rozpuszczania kwaśnych skał magmowych. Monitorowane cieki odznaczały się dominacją w miarę stabilnego w ciągu roku zasilania podziemnego. Na jakość wód rzecznych (m.in. mineralizacji i odczynu wody) nie wpłynęły nawet ekstremalne zdarzenia hydrologiczne (Tab. 17) związane z ograniczonym odpływem wody w niektórych zlewniach (np. Lewińska Struga, Wieniec).

Tab. 23. Średnie stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych w zlewniach ZMŚP w 2021 roku

Stacja (zlewnia)	Strefa krajobrazowa	$S\text{-}SO_4$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	Cl	Na	K	Mg	Ca	HCO_3	SEC	pH
		[$mg \cdot dm^{-3}$]									[$mS \cdot m^{-1}$]	[-]
Wolin (Lewińska Struga)	nadmorska	11,77	0,45	0,69	18,25	12,29	2,65	6,45	57,44	166,04	35,88	7,75
Parsęta (Parsęta)	pojezierzy	9,42	1,23	0,20	7,08	6,35	2,10	6,17	79,10	233,26	41,40	8,02
Wigry (Czarna Hańcza)		8,99	1,48	0,05	28,09	23,89	7,37	14,41	76,63	282,72	60,67	8,20
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)		37,90	3,21	0,13	64,10	24,30	10,06	19,50	143,00	349,00	86,90	7,80
Poznań-Morasko (Różany Strumień)		25,62	1,40	0,04	84,02	44,66	4,47	12,79	136,28	359,26	83,83	7,90
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	nizin	32,99	0,62	0,08	16,22	8,67	1,25	10,54	95,71	182,01	50,59	7,16
Łysogóry (Wieniec)	wyżyn	17,06	1,62	1,10	14,33	7,62	7,19	1,91	17,38	8,06	28,96	6,30
Roztocze (Świerszcz)		4,35	0,25	0,05	2,48	2,04	1,06	1,41	47,81	135,90	24,81	7,30
Beskid Niski (Bystrzanka)	gór średnich	11,80	1,19	0,01	10,30	14,50	3,66	6,28	51,30	163,30	31,90	7,55
Karkonosze (Wrzosówka)		2,14	0,18	0,05	0,82	1,69	0,31	0,45	1,70	3,15	2,51	5,67

Realizowany monitoring wód powierzchniowych pozwala na dokonanie oceny jakości wody w zakresie wybranych parametrów fizykochemicznych – zgodnie z wytycznymi zawartymi w Ramowej Dyrektywie Wodnej. Monitoring fizykochemiczny wód krążących w zlewniach ZMŚP pozwala na ocenę jakości wybranych wskaźników (nie wszystkich), które

są pomocne do oceny stanu ekologicznego jednolitych części wód powierzchniowych, zgodnie z Rozporządzeniami Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej (2019b).

Zlewnie rzeczne ZMŚP występują w następujących jednolitych częściach wód powierzchniowych (JCWP):

- Wolin (Lewińska Struga z jez. Czajcze i Koprowo PLRW60001735569),
- Parsęta (Parsęta od źródeł do Gęsiej PLRW6000174417),
- Puszcza Borecka (Gołdapiwo PLLW30552),
- Wigry (Czarna Hańcza od wypływu z jeziora Hańcza do jeziora Wigry PLRW8000186419),
- Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska od Zgnijki do ujścia PLRW 20001928989),
- Poznań-Morasko (Warta od Różanego Potoku do Dopływu z Uchorowa PLRW600021185991),
- Kampinos (Kanał Olszowiecki PL RW2000232729689),
- Łysogóry (Słupianka PLRW20001727369),
- Roztocze (Świerszcz PLRW200062414),
- Beskid Niski (Skawa do Bystrzanki PLRW2000122134299),
- Karkonosze (Wrzosówka od źródła do Podgórnej PLRW60003162889).

Realizacja programu ZMŚP wody powierzchniowe – rzeki umożliwia dokonanie oceny wybranych elementów fizykochemicznych wody. Wartości graniczne fizykochemicznych elementów jakości wód odnoszą się do Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 roku 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. W zlewniach ZMŚP w 2021 roku monitoring jakości wód płynących dotyczył następującego zakresu (Tab. 24):

- grupa wskaźników charakteryzujących stan fizyczny, w tym warunki termiczne: temperatura wody;
- grupa wskaźników charakteryzujących warunki tlenowe (warunki natlenienia) i zanieczyszczenia organiczne: tlen rozpuszczony;
- wskaźniki charakteryzujące zasolenie (przewodność, siarczany, wapń, magnez, chlorki);
- wskaźniki charakteryzujące zakwaszenie (odczyn);

– wskaźniki charakteryzujące warunki biogenne (azot amonowy, azot azotanowy, fosfor ogólny).

W oparciu o powyższe wskaźniki fizykochemiczne można stwierdzić, że jakość wód rzecznych pozostaje na podobnym poziomie od roku 2016, chociaż w 2021 roku zanotowano nieznaczny spadek jakości tych wód. W 2021 roku tylko dla dwóch nizinnych cieków – Lewińskiej Strugi i Parsęty stwierdzono bardzo dobrą jakość wody (I klasa). Dobrą jakością (II klasa) charakteryzowały się cieki położone w strefie wyżyn i gór: Wieniec w Górach Świętokrzyskich, Świerszcz na Roztoczu, Bystrzanka w Beskidzie Niskim i Wrzosówka w Karkonoszach. Pozostałe cztery cieki (Czarna Hańcza, Struga Toruńska, Różany Strumień i Kanał Olszowiecki) zaklasyfikowano do najgorszej klasy jakości wody (Tab. 24). O obniżeniu jakości wody do klasy poniżej dobrego stanu zadecydowały głównie podwyższone stężenia przewodności wody, stężenia chlorków, wapnia i magnezu. Zły stan chemiczny niektórych cieków może wynikać z poddawania zlewni i strefy przykorytowej względnie silnej antropopresji, związanej m.in. z urbanizacją (np. Różany Strumień) lub rolnictwem (np. Struga Toruńska). Niekorzystny stan chemiczny wód Czarnej Hańczy potencjalnie może być spowodowany położeniem miasta Suwałki powyżej profilu pomiarowego w Sobolewie (Krzysztofiak i in. 2022). Z kolei przyczyn stanu chemicznego Kanału Olszowieckiego należy upatrywać w warunkach naturalnych panujących w zlewni, a nie w zanieczyszczeniach antropogenicznych. Podwyższone stężenia jonów wapnia i magnezu mogą wynikać z dopływu wód ze skarpy Równiny Łowicko-Błońskiej, która zbudowana jest z iłów warwowych i pyłów o wysokiej zawartości wapnia, a wysokie stężenia siarczanów mogą być związane z rozkładem zmurszałej materii organicznej (Olszewski i in. 2022).

Ocenę jakości wód jeziornych zlewni ZMŚP dokonano w oparciu o wybrane (nie wszystkie) wskaźniki fizykochemiczne zawarte w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej (2019b):

– wskaźniki charakteryzujące warunki tlenowe i zanieczyszczenia organiczne (tlen rozpuszczony);
– wskaźniki charakteryzujące zasolenie (przewodność);
– grupa wskaźników charakteryzujących warunki biogenne (fosfor ogólny).

Analiza powyższych 3 wskaźników fizykochemicznych w 2021 roku pozwoliła na zakwalifikowanie jezior: Gardno (Stacja Wolin), Czarnego (Stacja Parsęta), Łękuk (Stacja Puszcza Borecka) oraz Kamionkowskiego (Stacja Pojezierze Chełmińskie) do bardzo dobrej klasy jakości wody (Tab. 25).

Tab. 24. Jakość wód płynących w 2021 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b)

Stacja ZMŚP (zlewnia)	Temperatura	O_2	BZT_5	Odczyn	PEW	Ca	Mg	PO_4	Cl	SO_0	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	Klasyfikacja elementów fizykochemicznych	Stan chemiczny
	[°C]	[mg·dm^{-3}]		[-]	[mS·m^{-1}]	[mg·dm^{-3}]								
Wolin (Lewińska Struga)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1 bardzo dobra	dobry
Parsęta (Parsęta)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1 bardzo dobra	dobry
Wigry (Czarna Hańcza)	1	1	1	PSP/PPD	PSP/PPD	PSP/PPD	PSP/PPD	2	PSP/PPD	I	2	1	PSP/PPD	poniżej dobrego
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	1	1	1	1	PSP/PPD	PSP/PPD	PSP/PPD	1	PSP/PPD	PSP/PPD	PSP/PPD	1	PSP/PPD	poniżej dobrego
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	1	1	1	1	PSP/PPD	PSP/PPD	1	1	PSP/PPD	1	1	1	PSP/PPD	poniżej dobrego
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	1	1	1	1	2	PSP/PPD	PSP/PPD	1	2	PSP/PPD	1	1	PSP/PPD	poniżej dobrego
Łysogóry (Wieniec)	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2 dobra	dobry
Roztocze (Świerszcz)	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2 dobra	dobry
Beskid Niski (Bystrzanka)	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2 dobra	dobry
Karkonosze (Wrzosówka)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2 dobra	dobry

Tab. 25. Jakość wód stojących w 2021 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b)

Stacja Bazowa ZMŚP Jezioro	Wolin Gardno	Parsęta Czarne	Poj. Chełmińskie Kamionkowskie	Puszcza Borecka Łękuk
Tlen rozpuszczony [mg O_2/l]	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra
Przewodność [mS·cm^{-1}]	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra
Fosfor ogólny [mg·dm^{-3}]	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra	1 bardzo dobra

Zagrożenie eutrofizacją wód powierzchniowych

Eutrofizacja jest naturalnym procesem przyrodniczym, który w przypadku oligotroficznych jezior polodowcowych oznacza proces stopniowego, wieloletniego użyźniania i wypełniania zbiornika jeziornego materiałem pochodzenia autochtonicznego i allochtonicznego. Końcowym etapem naturalnej eutrofizacji jest przekształcanie jezior w bagna i torfowiska oraz późniejsza ich przemiana w ekosystemy lądowe. W ostatnim czasie można obserwować przyspieszoną eutrofizację w wyniku antropogenicznych zmian

użytkowania terenu w zlewniach, m.in. poprzez wylesienia, rozwój rolnictwa i urbanizację. Aktualne przyspieszenie eutrofizacji jest wynikiem zwiększonej dostawy zanieczyszczeń, głównie biogenów pochodzących ze ścieków bytowo gospodarczych i przemysłowych oraz w wyniku stosowania nawozów w rolnictwie (Withers i in. 2014). Również antropogeniczne zmiany użytkowania terenu (np. z leśnych na rolne) generują przyspieszenie eutrofizacji wód powierzchniowych, w wyniku szybszego krążenia wody w przekształconych geoekosystemach i dostawy nutrientów. Pierwiastkami sprzyjającymi rozwojowi glonów i makrofitów wodnych są węgiel, azot i fosfor. Nadmierne stężenie związków azotu, a zwłaszcza fosforu powoduje eutrofizację i nadmierny wzrost niepożądanych organizmów żywych, zarówno w wodach jeziornych jak i rzecznych. „W środowisku wodnym najczęściej spotykana jest sytuacja, gdy występuje nadmiar węgla i azotu, tzn. ograniczanie wielkości produkcji pierwotnej powodowane jest niedoborem fosforu, z czego wynika zagrożenie szybkiego przyrostu biomasy roślin, ze wszystkimi negatywnymi konsekwencjami, w wyniku zwiększonego zasilania wód tym pierwiastkiem" (Rynkiewicz 2007). W związku z powyższym największe zagrożenie eutrofizacją dla wód powierzchniowych występuje w przypadku przekroczenia norm stężenia fosforu.

Eutrofizacja jest jednym z największych zagrożeń dla jakości wód powierzchniowych, dlatego określenie stopnia eutrofizacji wód jest niezbędne dla wypełnienia dyrektyw Unii Europejskiej, m.in. ściekowej 91/271/EWG, azotanowej 91/676/EWG i wodnej 2000/60/WE.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z 23 grudnia 2002 roku, w sprawie kryteriów wyznaczania wód wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu ze źródeł rolniczych, określa wartości graniczne podstawowych wskaźników eutrofizacji dla różnych typów wód.

W 2021 roku w żadnym z monitorowanych cieków nie stwierdzono przekroczenia progowej wartości stężenia fosforu ogólnego $P_{og.}$ 0,25 mg·dm^{-3} (Tab. 26). W przypadku azotu azotanowego N-NO_3 stężenia dopuszczalne (2,2 mg·dm^{-3}), po dwuletniej przerwie w 2019 i 2020 roku, zostały ponownie przekroczone w Strudze Toruńskiej w profilu Koniczynka (Pojezierze Chełmińskie) 3,21 mg·dm^{-3}. Przekroczenie wartości progowych stężenia związków azotu w Strudze Toruńskiej wynika z rolniczego użytkowania zlewni i stosowania nawozów azotowych. W pozostałych ciekach zagrożenia eutrofizacji wód płynących nie stwierdzono.

W Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód

powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych za wartość progową eutrofizacji wód jeziornych niestratyfikowanych uznano stężenie fosforu ogólnego $P_{og.}$ powyżej 0,1 $mg \cdot dm^{-3}$. Powyższa wartość progowa, podobnie jak w latach wcześniejszych, w 2021 roku nie została przekroczona w żadnym z badanych jezior (Tab. 27), a zatem nie stwierdzono zagrożenia eutrofizacją badanych jezior.

Tab. 26. Wskaźniki eutrofizacji rzek w Stacjach ZMŚP w 2021 roku

Stacja – *ciek*	$P_{og.}$ [$mg \cdot dm^{-3}$]	$N\text{-}NO_3^-$ [$mg \cdot dm^{-3}$]	NO_3^- [$mg \cdot dm^{-3}$]
Wolin – *Lewińska Struga*	0,008	0,45	1,98
Parsęta – *Parsęta*	0,052	1,23	5,41
Wigry – *Czarna Hańcza Ujście*	0,149	1,48	6,51
Poj. Chełmińskie – *Struga Toruńska*	0,096	3,21	14,23
Poznań-Morasko – *Różany Strumień*	0,025	1,40	6,17
Kampinos – *Kanał Olszowiecki*	0,019	0,62	2,72
Łysogóry – *Wieniec*	0,002	1,62	7,10
Roztocze – *Świerszcz Malowany Most*	0,047	0,25	1,10
Beskid Niski – *Bystrzanka*	0,010	1,19	5,23
Karkonosze – *Wrzosówka*	0,017	0,18	0,79

Tab. 27. Wskaźniki eutrofizacji jezior w Stacjach ZMŚP w 2021 roku

Stacja – *jezioro*	$P_{og.}$ [$mg \cdot dm^{-3}$]
Wolin – *Jezioro Gardno*	0,008
Parsęta – *Jezioro Czarne*	0,018
Puszcza Borecka – *Jezioro Łękuk*	0,033
Pojezierze Chełmińskie – *Jezioro Kamionkowskie*	0,021

6.4. Bilans jonów denudacyjnych i biogennych

Obieg materii rozpuszczonej w zlewni jest odzwierciedleniem naturalnych procesów hydrometeorologicznych (m.in. zasilania opadowego, migracji w postaci spływu powierzchniowego i wodami podziemnymi, odpływu fluwialnego) i hydrochemicznych (m.in. wietrzenia i denudacji chemicznej głównie „jonów denudacyjnych", np. siarczany, chlorki,

sód, magnez, wapń) oraz działalności antropogenicznej (m.in. dostawy zanieczyszczeń np. „jonów biogennych": azotanów, fosforanów, potasu).

Dla określenia bilansu denudacyjnego substancji rozpuszczonych konieczne jest rozpoznanie warunków wodnych, ponieważ obieg wody w zlewni odgrywa podstawową rolę w przepływie materii (Kostrzewski, Pulina 1992; Kostrzewski i in. 1995; Grodzińska, Laskowski 1996; Mazurek 2000). Przy określaniu bilansu denudacyjnego zlewni niezbędne jest określenie dopływu i odpływu ładunku substancji rozpuszczonych, będących funkcją ilości wody i stężenia substancji chemicznych (Michalska, Szpikowski 2000). Dopływ materii rozpuszczonej mierzony jest za pomocą ładunku substancji chemicznych wnoszonego poprzez wody opadowe (Szpikowska 2004). Natomiast odpływ analizowany jest za pomocą pomiarów ładunku substancji rozpuszczonych w cieku odwadniającym obszar zlewni. Ilość materii odpływającej w korycie rzecznym jest przybliżonym odbiciem aktualnych procesów geochemicznych zachodzących na obszarze zlewni (Froehlich 1982; Kostrzewski, Pulina 1992; Kostrzewski i in. 1995; Tylkowski 2005; Szpikowska, Tylkowski 2006).

Bilans denudacyjny uwzgledniający bilans wodny i materii rozpuszczonej stanowi syntetyczne odbicie zarówno ilościowych jak i jakościowych cech obiegu wody w badanych zlewniach ZMŚP. W opracowaniu przedstawiono bilans jonowy zlewni rzecznych ZMŚP dla 2021 roku, który stanowi różnicę ładunku substancji rozpuszczonych wnoszonego z wodami opadowymi i odpływającego w wodach rzecznych (Tab. 28). W bilansie denudacyjnym uwzględniono tylko jony mierzone zarówno w wodach opadowych, jak i rzecznych. Uwzględniono jony, których głównym źródłem jest denudacja chemiczna (SO_4, Cl, Na, Mg, Ca) oraz dostawa biogeniczna (NO_3, NH_4, K). Analiza bilansu denudacyjnego została przeprowadzona dla zlewni eksperymentalnych od źródła cieku do profilu zamykającego zlewnię. Nie analizowano bilansu denudacyjnego dla zlewni różnicowych Czarnej Hańczy (Stacja Wigry) i Strugi Toruńskiej (Stacja Pojezierze Chełmińskie).

Analiza bilansu jonowego dla zlewni ZMŚP w ostatnich latach wykazała dodatni budżet dla jonów pochodzenia biogenicznego i dostarczanych przez działalność człowieka (np. poprzez nawożenie) – NO_3, NH_4 i K. Pozostałe składniki chemiczne (jony denudacyjne) występujące w wodach krążących w zlewni cechują się ujemnym bilansem. Ujemny bilans jonów denudacyjnych jest efektem przewagi ługowania gleb, wietrzenia chemicznego i dalszego ich odprowadzania fluwialnego nad ich dostawą wraz z opadami atmosferycznymi.

We wszystkich poprzednich latach w zlewniach o największej antropopresji zauważyć można było ekstremalnie ujemny bilans jonów denudacyjnych. Zwiększony odpływ materii rozpuszczonej w tych zlewniach, związany był ze znacznym udziałem powierzchni

o rolniczym użytkowaniu, które wpływają na szybsze odprowadzanie substancji rozpuszczonych ze zlewni, np. Beskid Niski oraz Parsęta. W zlewniach o dużym udziale lasów (np. Wolin, Roztocze, Karkonosze) znaczna ilość wody i ładunku substancji rozpuszczonych była przechwytywana przez roślinność. Obieg wody w tych zlewniach był spowolniony, co spowodowało że bilans jonów denudacji chemicznej był względnie najniższy. Specyficzna sytuacja występowała w zlewniach o ograniczonym odpływie wody w rzekach, np. Kampinos i Łysogóry. W tych zlewniach sezonowo dochodziło do zaniku odpływu fluwialnego, dlatego bilans jonów denudacyjnych cechował się bilansem dodatnim, co było sytuacją anormalną.

Dla jonów biogennych we wszystkich poprzednich latach ujemny bilans stwierdzono w zlewniach o znacznym udziale gruntów rolnych (Parsęta, Różany Strumień, Beskid Niski). Na ujemny bilans jonów potasowych w tych zlewniach wpływało przede wszystkim nadmierne wprowadzanie związków potasu i azotu wraz z nawozami rolniczymi oraz w mniejszym stopniu dopływ ścieków gospodarczych. Dodatni bilans biogenów występował zwłaszcza w zlewniach o znacznym udziale obszarów leśnych (np. Wolin, Roztocze, Karkonosze). W tych zlewniach dostarczane z opadami atmosferycznymi nutrienty wykorzystywane były w procesach związanych z rozwojem roślin i w niewielkim stopniu dostarczane były do wód gruntowych i dalej do cieków wodnych.

W 2021 roku sytuacja hydrometeorologiczna kształtująca bilans wodny i warunki obiegu wody, a także krążenia materii rozpuszczonej w zlewniach ZMŚP nawiązywała do prawidłowości wieloletniej. Bardzo niskie odpływy rzeczne w zlewniach w strefie wyżynnej (Wieńca w Górach Świętokrzyskich i Świerszcza na Roztoczu) utrzymały sytuację z roku poprzedniego z dodatnim bilansem jonów denudacyjnych. Dodatni bilans jonów biogennych wystąpił w większości zlewni (np. Różany Strumień 9,3 $kg \cdot ha^{-1}$, Świerszcz 17,5 $kg \cdot ha^{-1}$, Wrzosówka 10,6 $kg \cdot ha^{-1}$), poza zlewnią górnej Parsęty, w której dostawa biogenów z opadami atmosferycznymi była nieznacznie niższa niż ich odpływ systemem rzecznym (bilans -0,5 $kg \cdot ha^{-1}$). Wysoki dodatni bilans jonów biogennych występował w zlewniach najbardziej zalesionych, natomiast ujemny, bądź niski dodatni bilans nutrientów związany był z wprowadzaniem nutrientów w związku z nawożeniem gruntów ornych.

Najniższe wartości całkowitego bilansu materii rozpuszczonej w 2021 r. (Tab. 28) stwierdzono w zlewniach podlegających największej dynamice energii (woda) i materii (substancje rozpuszczone): Parsęta -162,8 $kg \cdot ha^{-1}$ i Beskid Niski -188,8 $kg \cdot ha^{-1}$. W tych zlewniach obieg energii (wody) i materii (substancji rozpuszczonych) w 2021 roku był najmniej zaburzony w odniesieniu do prawidłowości wieloletniej. Odmienna, anormalna

sytuacja wystąpiła w Łysogórach (12,8 kg·ha^{-1}) i na Roztoczu (27,4 kg·ha^{-1}), gdzie całkowity bilans obiegu materii był dodatni. Dodatni bilans materii rozpuszczonej w tych zlewniach był skutkiem niskiego odpływu rzecznego, gdzie większość wody opadowej nie uczestniczyła w odpływie rzecznym. Infiltrująca woda do wód podziemnych nie była później drenowana przez system korytowy, gdyż uzupełniała zasoby wód podziemnych. W przypadku Świerszcza istotny wpływ miał duży udział lasów w zlewni. Ponadto, w Wieńcu, znaczna ilość wody została wykorzystana do celów gospodarczych, co skutkowało brakiem odpływu rzecznego w okresie letnim. Niektóre zlewnie (np. Lewińska Struga, Różany Strumień), pomimo okresowego braku odpływu fluwialnego w półroczu letnim, posiadały ujemny bilans denudacyjny.

Tab. 28. Bilans jonów denudacyjnych i biogenicznych w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku

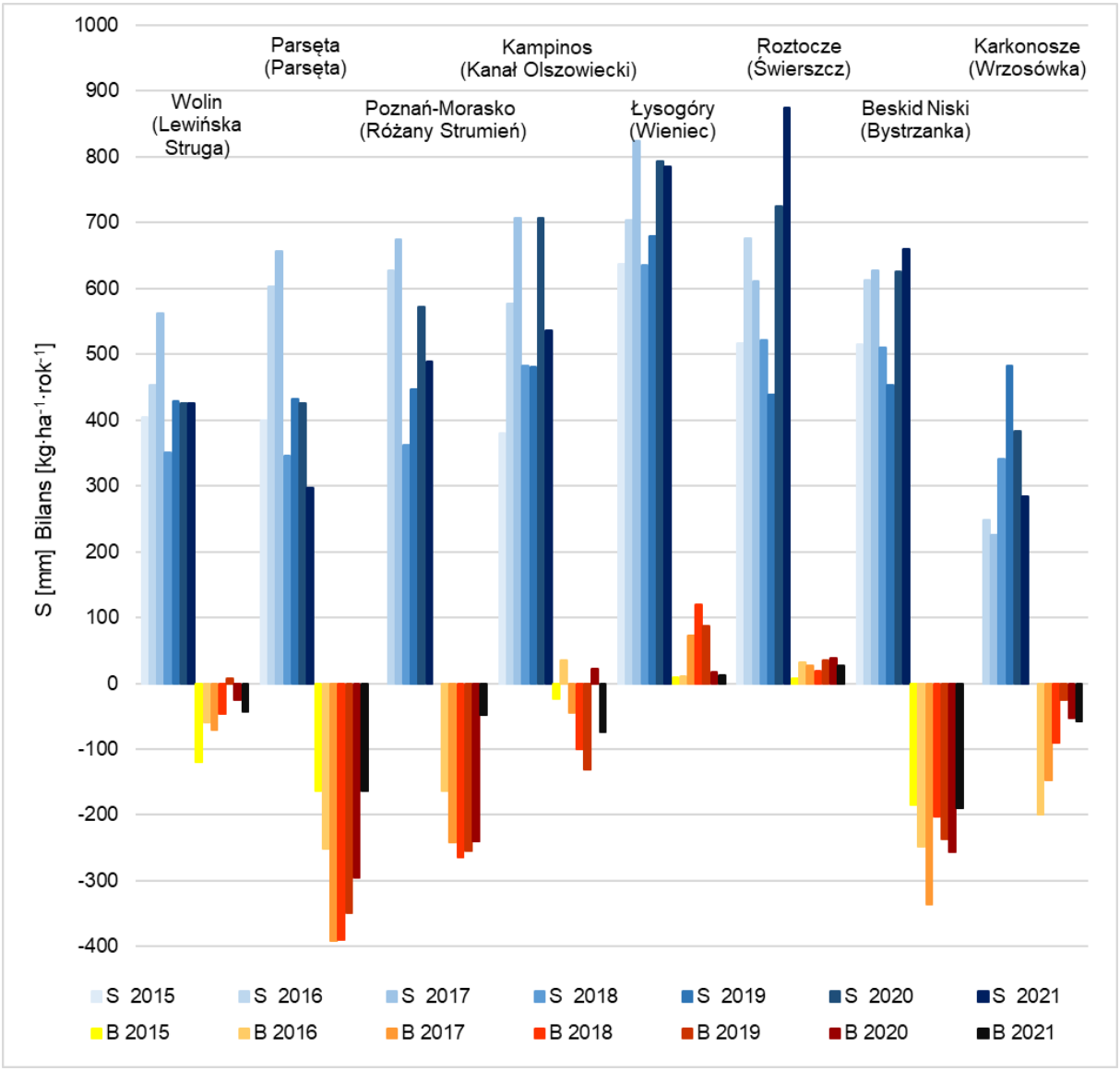
Stacja (zlewnia)	Wolin (Lewińska Struga)	Parsęta (Parsęta)	Poznań-Morasko (Różany Strumień)	Kampinos (Kanał Olszowiecki)	Łysogóry (Wieniec)	Roztocze (Świerszcz)	Beskid Niski (Bystrzanka)	Karkonosze (Wrzosówka)
Składowe obiegu wody [mm]								
P – Opad atmosferyczny	477,1	443,5	512,7	585,0	825,8	923,0	873,1	1025,1
Hpow – Odpływ powierzchniowy	56,0	147,3	23,9	49,3	40,2	48,4	214,0	740,7
S – Deficyt odpływu	**424,8**	**296,2**	**488,8**	**535,7**	**785,6**	**874,6**	**659,1**	**284,4**
Bilans jonów denudacyjnych [kg·ha^{-1}]								
SO_4^{2-}	-1,7	-37,8	-9,1	-26,9	1,6	10,6	-48,1	-38,7
Cl^-	-4,5	-7,1	-13,8	-5,9	3,5	2,7	-16,6	-3,6
Ca^{2+}	-32,6	-101,9	-26,2	-43,1	4,1	-3,7	-97,4	-11,3
Mg^{2+}	-3,1	-8,3	-2,1	-4,6	0,2	0,3	-11,1	-3,1
Na^+	-2,3	-7,2	-6,5	-3,4	1,7	0,0	-27,0	-11,4
Bilans JD	**-44,3**	**-162,3**	**-57,7**	**-83,8**	**11,1**	**9,8**	**-200,2**	**-67,9**
Bilans jonów biogennych [kg·ha^{-1}]								
NO_3^-	0,4	-0,9	6,5	7,0	0,1	13,3	15,2	7,0
NH_4^+	-0,1	2,9	3,5	3,9	0,0	3,3	2,0	5,5
K^+	0,1	-2,5	-0,7	-0,2	1,6	1,0	-5,8	-2,0
Bilans JB	**0,5**	**-0,5**	**9,3**	**10,6**	**1,7**	**17,5**	**11,4**	**10,6**
Bilans materii rozpuszczonej [kg·ha^{-1}]								
Bilans JD+JB	**-43,9**	**-162,8**	**-48,4**	**-73,2**	**12,8**	**27,4**	**-188,8**	**-57,4**

Analiza deficytu odpływu i dodatnia lub ujemna wartość bilansu denudacyjnego z lat 2015-2021 ukazuje geoekosystemy „stabilne" i „niestabilne" w zakresie obiegu energii (woda) i materii (substancje rozpuszczone) (Ryc. 21).

Za stabilne geoekosystemy uznano zlewnie o ujemnym kierunku bilansu denudacyjnego: Parsęta, Różany Strumień, Bystrzanka i Wrzosówka. W tych geoekosystemach pomimo różnych uwarunkowań meteorologicznych (lata 2015, 2018, 2019 suche, rok 2016 normalny lub wilgotny, rok 2017 wilgotny i lata 2020-2021 ponownie normalne lub wilgotne) ujemny kierunek bilansu denudacyjnego był zachowany. Z kolei za niestabilne uznano zlewnie o dodatnim bądź zmiennym kierunku bilansu denudacyjnego: Lewińska Struga, Kanał Olszowiecki, Wieniec i Świerszcz. W geoekosystemach Wieńca i Świerszcza o niestabilności świadczy utrzymujący się dodatni bilans, który jest przejawem pewnych zaburzeń w obiegu wody, zwłaszcza w postaci bardzo niskiego odpływu fluwialnego. W przypadku Wieńca o niskim odpływie decyduje głównie antropogeniczny pobór wody z cieku. Natomiast w przypadku Świerszcza o relatywnie niskim odpływie wody decydowała duża „chłonność" zlewni (znaczną powierzchnię zajmują torfowiska) oraz działalność bobrów i obecność wielu zbiorników przepływowych (stawów) na cieku. W pozostałych geoekosystemach uznanych za niestabilne kierunek bilansu denudacyjnego w latach 2015-2021 był zmienny (dodatni lub ujemny). W przypadku Lewińskiej Strugi dodatni bilans denudacyjny wystąpił tylko w 2019 roku. Z kolei w zlewni Kanału Olszowieckiego dodatni bilans miał miejsce w 2016 i 2020 roku.

Wśród badanych geoekosystemów można dokonać pewnej waloryzacji względnej, gdzie za wysokoenergetyczne można uznać zlewnie o średnim bilansie denudacyjnym $\geq\pm100$ $kg \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Do tych geoekosystemów można zakwalifikować zlewnie: Parsęty, Bystrzanki i Różanego Strumienia. Zlewnię Wrzosówki można zaliczyć do typu umiarkowanego $\geq\pm50$ $kg \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$, a zlewnie Świerszcza i Wieńca można zaliczyć do geoekosystemów niskoenergetycznych $\leq\pm50$ $kg \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Z kolei zlewnie Lewińskiej Strugi i Kanału Olszowieckiego, ze względu na znaczną dynamikę rocznego bilansu materii rozpuszczonej, balansują na granicy geoekosystemu umiarkowanego (±50-100 $kg \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) i niskoenergetycznego (Ryc. 21).

Analiza bilansu denudacyjnego badanych zlewni rzecznych jest dobrym wskaźnikiem presji antropogenicznej w zlewniach, zwłaszcza jako indykator nadmiernego wprowadzania biogenów (z nawozami i ściekami bytowymi) do środowiska przyrodniczego.



Ryc. 21. Deficyt odpływu wody i bilans substancji rozpuszczonych w zlewniach ZMŚP w latach 2015-2021. S – deficyt odpływu, B – bilans substancji rozpuszczonych

7. WPŁYW UWARUNKOWAŃ ABIOTYCZNYCH NA PRZYRODĘ OŻYWIONĄ W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP

Wpływ uwarunkowań abiotycznych (związanych ze zmiennością warunków pogodowych oraz właściwościami fizycznogeograficznymi badanych geoekosystemów) na potencjalny stan przyrody ożywionej obejmuje charakterystykę m.in. występowania w 2021 roku termicznych pór roku i sezonu wegetacyjnego. Przedstawiono także syntetyczne wyniki realizacji programów ZMŚP w 2021 roku dotyczące:

- zanieczyszczenia powietrza,
- uszkodzeń drzew i drzewostanów,
- roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia,
- hydrobiologii rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych.

7.1. Termiczne pory roku

Warunki cieplne w 2021 roku znalazły odzwierciedlenie w długości trwania poszczególnych termicznych pór roku. Obniżona, w stosunku do lat poprzednich, termika pozwoliła wrócić do normalnego stanu, w którym we wszystkich monitorowanych geoekosystemach stwierdzono występowanie wszystkich sześciu termicznych pór roku. W przypadku Wolina i Parsęty termiczna zima wystąpiła po dwuletniej przerwie. (Ryc. 22). Najdłużej trwającą porą roku było lato (93 dni), jednak warto zwrócić uwagę, że było ono krótsze niż w latach: 2020 (102 dni), 2019 (113 dni) i 2018 (135 dni). Niewiele krócej od lata (76 dni) trwała jesień. Z kolei najkrócej trwającymi termicznymi porami roku były przedwiośnie (39 dni) i przedzimie (45 dni).

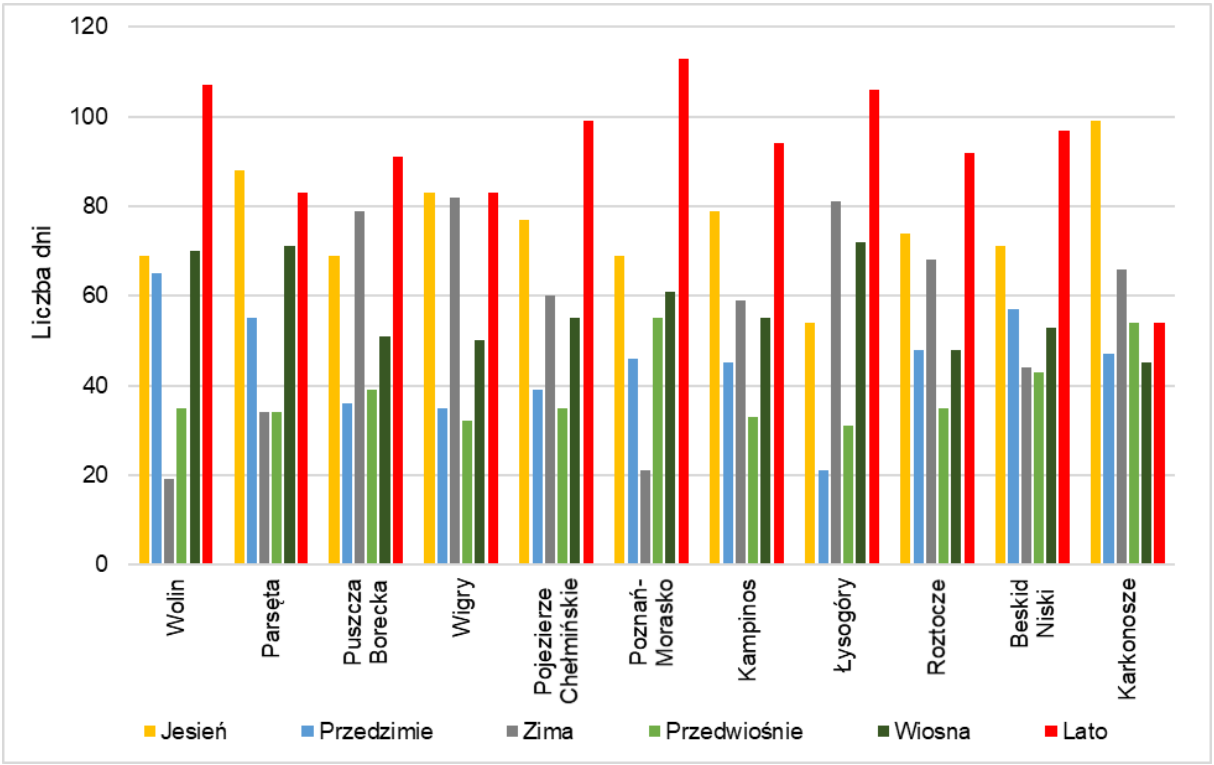
W 2021 roku nie występowała wyraźna zmienność regionalna występowania termicznych pór roku. Taka sytuacja świadczy o ponadregionalnych czynnikach meteorologicznych warunkujących występowanie termicznych pór roku. Pewne oddziaływanie czynników lokalnych można zauważyć w zlewniach położonych w Polsce północno-wschodniej – w Puszczy Boreckiej i w Wigrach oraz w zlewniach położonych wysoko nad poziomem morza – w Górach Świętokrzyskich i w Karkonoszach. Czynniki lokalne związane z wyniesieniem nad poziom morza decydowały o pewnej specyfice długości termicznych pór roku i terminach ich występowania. W Karkonoszach było najkrótsze lato (54 dni). Z kolei zima najdłużej trwała w Wigrach (82 dni), Łysogórach (81 dni) i Puszczy Boreckiej (79 dni) (Ryc. 23).

Jesień
1 lis
21 gru
9 lut
30 mar
19 maj
8 lip
27 sie
16 paź
Wolin
Parsęta
Puszcza Borecka
Wigry
Pojezierze Chełmińskie
Poznań-Morasko
Kampinos
Łysogóry
Roztocze
Beskid Niski
Karkonosze
Przedzimie
1 lis
21 gru
9 lut
30 mar
19 maj
8 lip
27 sie
16 paź
Wolin
Parsęta
Puszcza Borecka
Wigry
Pojezierze Chełmińskie
Poznań-Morasko
Kampinos
Łysogóry
Roztocze
Beskid Niski
Karkonosze
Zima
1 lis
21 gru
9 lut
30 mar
19 maj
8 lip
27 sie
16 paź
Wolin
Parsęta
Puszcza Borecka
Wigry
Pojezierze Chełmińskie
Poznań-Morasko
Kampinos
Łysogóry
Roztocze
Beskid Niski
Karkonosze

Ryc. 22. Przebieg termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku

Czas trwania termicznych pór roku generalnie nawiązywał do prawidłowości wieloletniej. Korzystne warunki termiczne dla rozwoju roślinności występowały od początku termicznej wiosny do końca termicznej jesieni. W czterech zlewniach (Wolin, Parsęta, Poznań-Morasko i Łysogóry) termiczna wiosna rozpoczęła się w marcu, z czego najwcześniej w zlewni górnej Parsęty – 23 marca. W pozostałych zlewniach termiczna wiosna rozpoczęła się w kwietniu, najpóźniej w Puszczy Boreckiej i Wigrach – 11 kwietnia. We wszystkich badanych geoekosystemach termiczna jesień trwała do końca roku hydrologicznego. W rozkładzie czasowym termicznych pór roku podtrzymał się stosunek czasu trwania skrajnych termicznych pór roku z niewielką zmianą na korzyść długości trwania zimy. W poprzednich latach stwierdzono ponad dwukrotnie dłuższy średni czas trwania termicznego lata niż średni czas trwania zimy, a w roku 2021 lato (93 dni) trwało o 66% dłużej niż zima (56 dni).

Reasumując, można stwierdzić, że występowanie termicznych pór roku (czas trwania, daty początku wiosny i końca jesieni) były sprzyjające dla przyrody ożywionej oraz przełożyły się na dogodne warunki występowania sezonu wegetacyjnego i okresu dojrzewania roślin.



Ryc. 23. Czas trwania termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku

7.2. Sezon wegetacyjny

Rok 2021 był normalny pod względem temperatury, co skutkowało krótszym niż w latach poprzednich czasem trwania sezonu wegetacyjnego (Tab. 29). Okres wegetacyjny trwał średnio 221 dni, od 191 dni w Karkonoszach do 246 dni na Wolinie. Czas trwania sezonu intensywnej wegetacji o średniej dobowej temperaturze powietrza ≥10°C był najkrótszy w Wigrach (139 dni), a najdłuższy również na Wolinie (177 dni). Podobnie jak w roku 2020, różnica pomiędzy czasem trwania okresu wegetacyjnego i okresu intensywnej wegetacji w Karkonoszach była niewielka i wyniosła tylko 41 dni (przy średniej ze wszystkich zlewni równej 65 dni).

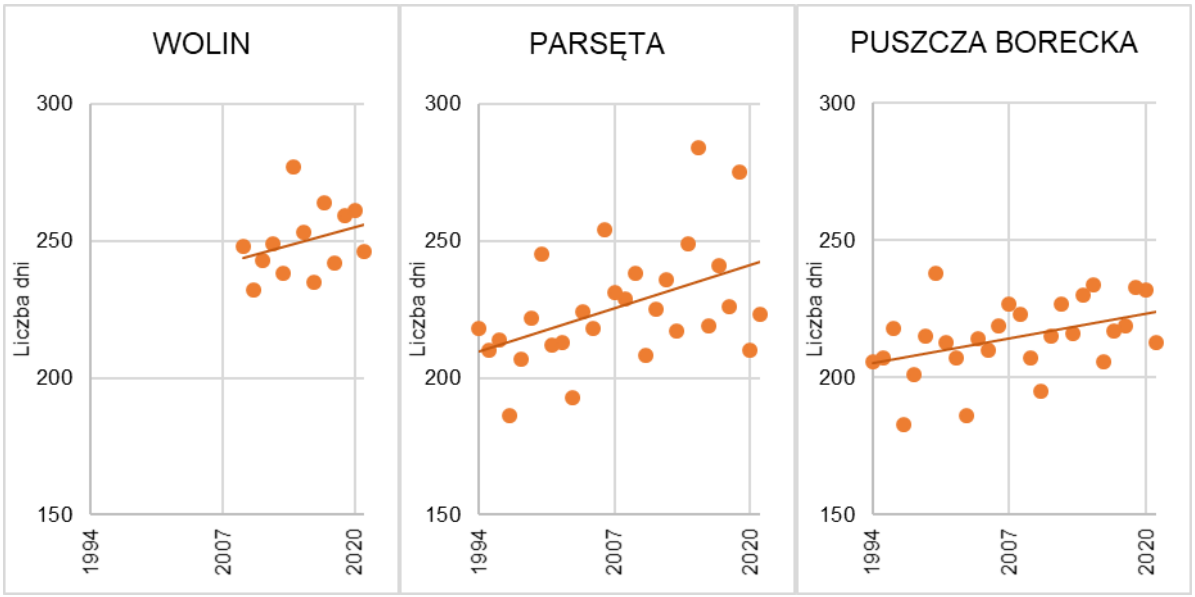
W 2021 roku czas trwania sezonu wegetacyjnego malał wraz z oddalaniem się od Morza Bałtyckiego. Najdłużej trwał w strefie nadmorskiej (Wolin) – 246 dni, następnie w strefie nizin – 222 dni, w strefie wyżyn – 219 dni i w górach – 208 dni. Rok 2021 był normalny i lekko ciepły pod względem termicznym, co przy porównaniu z bardzo ciepłymi, a nawet anomalnie ciepłymi latami wcześniejszymi, wskazuje na skrócenie okresu wegetacyjnego, co miało swoje odzwierciedlenie w długości trwania okresu wegetacyjnego. W większość monitorowanych zlewni czas trwania okresu wegetacyjnego w 2021 roku był krótszy od średniej z wielolecia średnio o 7 dni. Dłuższy niż średni czas trwania (o 6 dni) stwierdzono jedynie w Górach Świętokrzyskich. Okres intensywnej wegetacji również trwał zdecydowanie krócej niż w latach poprzednich.

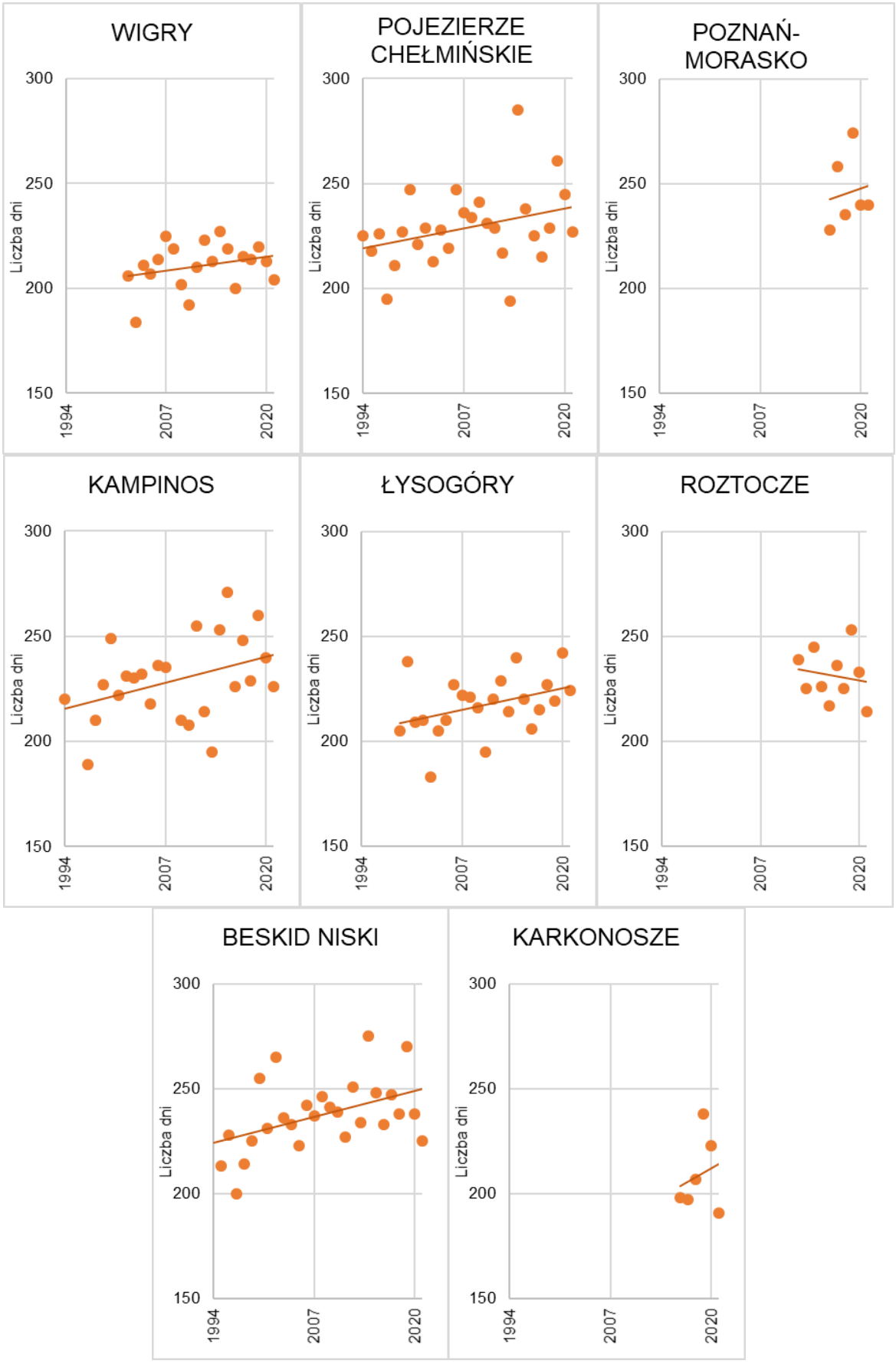
Tab. 29. Sezon wegetacyjny w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku

Stacja	Strefa krajobrazowa	Okres wegetacyjny	Okres intensywnej wegetacji
Wolin	nadmorska	246	177
Parsęta	pojezierzy	223	152
Puszcza Borecka		213	156
Wigry		204	139
Pojezierze Chełmińskie		227	158
Poznań-Morasko		240	166
Kampinos	nizin	226	158
Łysogóry	wyżyn	224	143
Roztocze		214	150
Beskid Niski	gór średnich	225	173
Karkonosze		191	150

Wieloletnie obserwacje sezonu wegetacyjnego w Stacjach Bazowych ZMŚP wskazują na wyraźne wydłużanie się czasu jego trwania. Istotny statystycznie trend wydłużania się okresu wegetacyjnego ($p<0,05$) stwierdzono dla 3 Stacji: Parsęty, Puszczy Boreckiej i Beskidu Niskiego. Średni trend 20-letni wydłużenia trwania okresu wegetacyjnego w wymienionych zlewniach wynosi od: 20 dni w Puszczy Boreckiej, przez 31 dni w Beskidzie Niskim, do 35 dni w zlewni górnej Parsęty (Ryc. 24). Wydłużający się okres wegetacji świadczy o coraz korzystniejszych warunkach termicznych dla rozwoju roślinności, co jednak przy zwiększającej się liczbie dni gorących i upalnych, w tym fal upałów, prowadzi również do wzmożonej ewapotranspiracji, ograniczającej dostępność wody dla roślinności (por. rozdział 5.1.).

Warunki termiczne w 2021 roku (podobnie jak sumy roczne opadów atmosferycznych) były umiarkowanie korzystne dla rozwoju roślinności. Jednak należy zwrócić uwagę na zarejestrowanie w większości monitorowanych zlewni przynajmniej jednej suszy meteorologicznej (okresu bezdeszczowego trwającego przynajmniej 15 dni) oraz fal upałów, które występując w czasie okresu wegetacyjnego negatywnie wpływają na rozwój roślinności.





Ryc. 24. Zmienność czasu trwania okresu wegetacyjnego w Stacjach Bazowych ZMŚP dysponujących ponad 5-letnim okresem pomiarowym

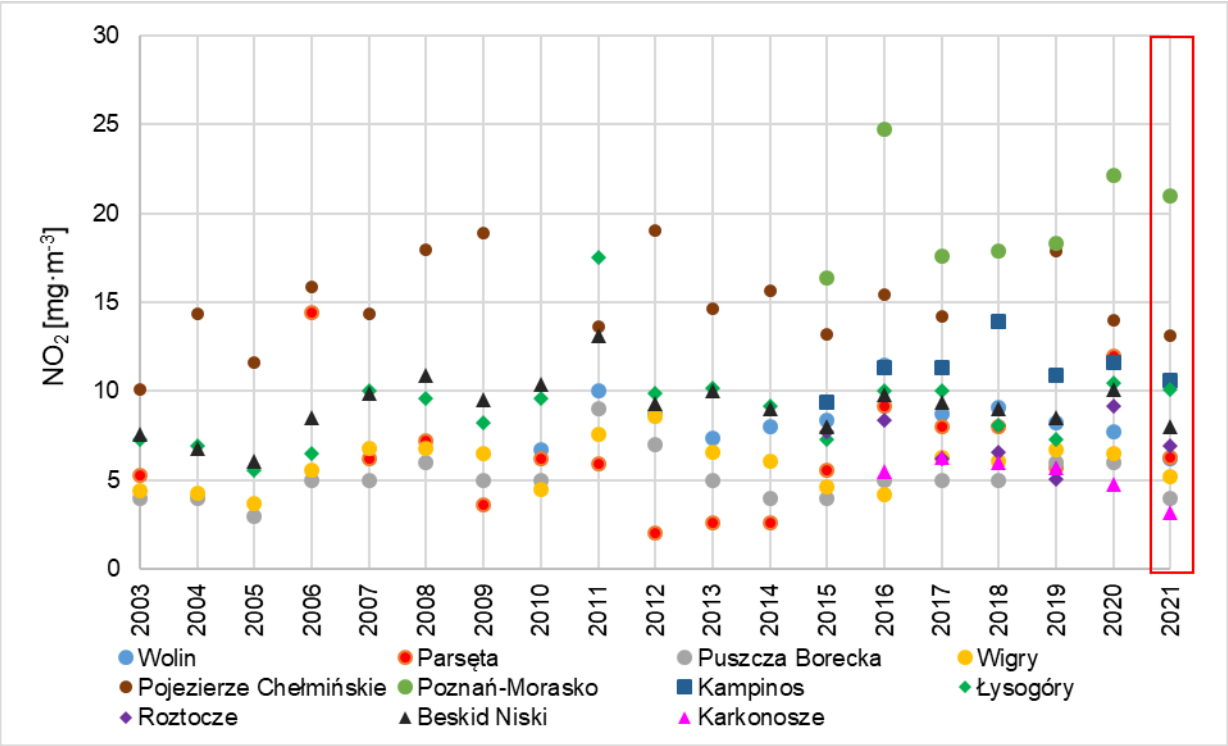
7.3. Zanieczyszczenie powietrza

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 roku w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz. U. z 2012 r. poz. 1031) poziomy dopuszczalne stężenia substancji w powietrzu ze względu na ochronę roślin wynoszą: 20 $\mu g \cdot m^{-3}$ SO_2 dla roku i pory zimowej (od 1 X do 31 III) oraz 30 $\mu g \cdot m^{-3}$ NO_2 dla roku. We wszystkich zlewniach średnie roczne stężenia dwutlenku azotu i dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym w 2021 roku hydrologicznym były zbliżone do wartości z wielolecia 2003-2020, a dopuszczalne stężenia nie zostały przekroczone w żadnej Stacji Bazowej (Tab. 30, Ryc. 25, Ryc. 26).

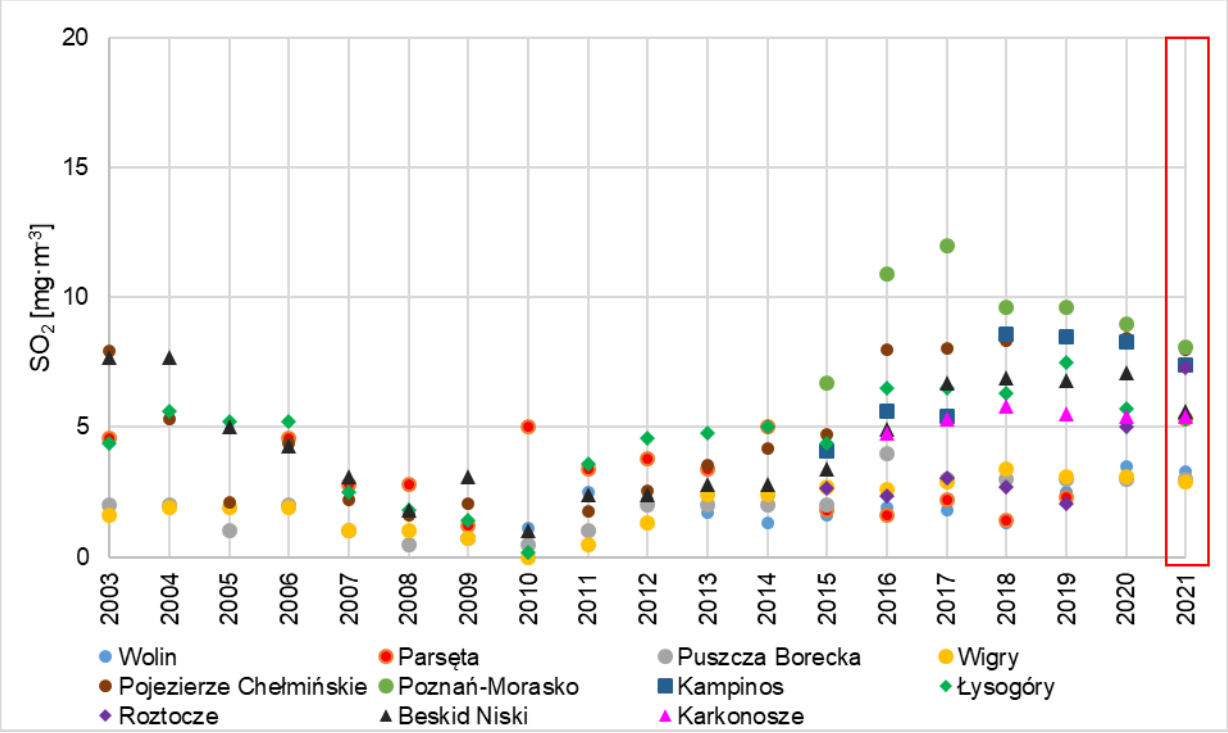
Tab. 30. Zanieczyszczenie powietrza – średnie roczne stężenie SO_2 i NO_2 [$\mu g \cdot m^{-3}$] w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku

Stacja	Strefa krajobrazowa	NO_2 [$\mu g \cdot m^{-3}$]	SO_2 [$\mu g \cdot m^{-3}$]
Wolin	nadmorska	6,2	3,3
Parsęta	pojezierzy	6,3	5,3
Puszcza Borecka		4,0	3,0
Wigry		5,2	2,9
Pojezierze Chełmińskie		13,1	8,0
Poznań-Morasko		21,0	8,1
Kampinos	nizin	10,6	7,4
Łysogóry	wyżyn	10,1	5,3
Roztocze		7,3	6,9
Beskid Niski	gór średnich	8,0	5,6
Karkonosze		3,2	5,4

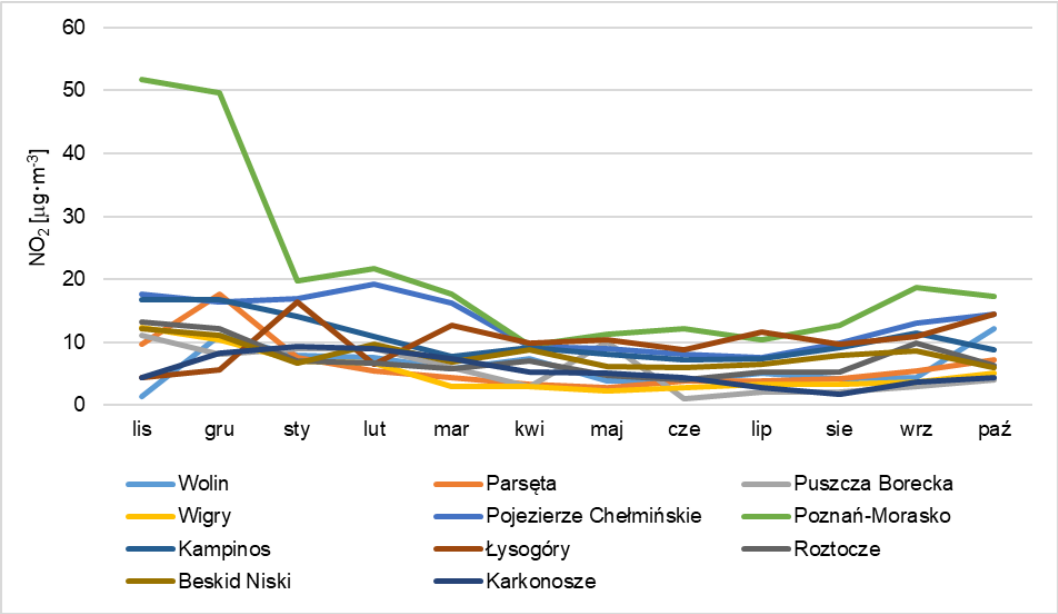
Dobry stan jakości powietrza wpływał pozytywnie na stan przyrody ożywionej. Generalnie najwyższe poziomy zanieczyszczeń powietrza notowano w zlewniach znajdujących się w pobliżu dużych aglomeracji miejskich (Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko, Kampinos). Najniższe stężenia dwutlenku siarki notowano w Polsce północnej (Wolin, Puszcza Borecka i Wigry), a dwutlenku azotu – w Polsce północno-wschodniej (Puszcza Borecka i Wigry) oraz w Karkonoszach. Roczny przebieg stężeń dwutlenku siarki oraz dwutlenku azotu charakteryzował się występowaniem wyższych wartości w półroczu zimowym, w trakcie trwania sezonu grzewczego. Zależność ta szczególnie widoczna jest w przypadku miejskiej Stacji Poznań-Morasko (Ryc. 27, Ryc. 28).



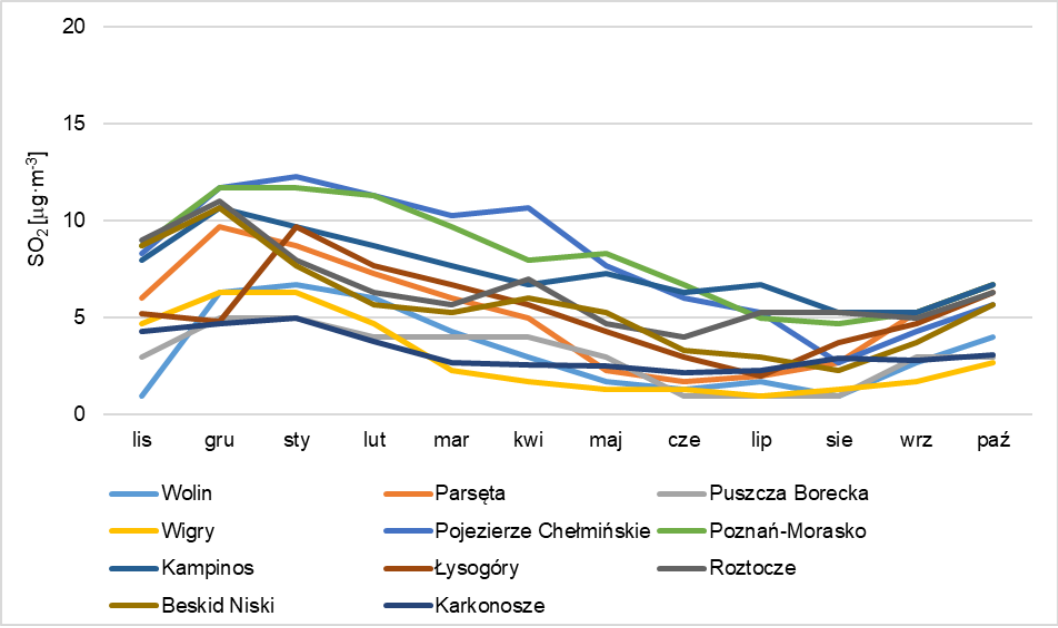
Ryc. 25. Średnie roczne stężenia NO_2 w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2021



Ryc. 26. Średnie roczne stężenia SO_2 w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2021



Ryc. 27. Średnie miesięczne stężenia NO_2 w 2021 roku w zlewniach badawczych ZMŚP



Ryc. 28. Średnie miesięczne stężenia SO_2 w 2021 roku w zlewniach badawczych ZMŚP

7.4. Uszkodzenia drzew i drzewostanów

Pomiary uszkodzeń drzew i drzewostanów realizowano w 10 Stacjach Bazowych ZMŚP. W Stacji Pojezierze Chełmińskie w zlewni Strugi Toruńskiej ze względu na brak program nie jest wykonywany.

Zmiany klimatyczne, a w szczególności tendencja do wzrostu temperatury powietrza i okresy susz, mogą negatywnie wpływać na stan drzewostanów, które będą bardziej podatne m.in. na gradacje szkodników. Stan drzewostanów w 2021 roku w monitorowanych

zlewniach utrzymał się na podobnym poziomie jak w latach wcześniejszych. W porównaniu z rokiem 2020, defoliacja i odbarwienie były wyższe w sześciu Stacjach (Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Łysogóry, Beskid Niski oraz Karkonosze), niższe w 3 Stacjach (Wigry, Kampinos i Roztocze). W Poznaniu defoliacja i odbarwienie utrzymały się na tym samym poziomie. Należy jednak podkreślić, że zmiany nie były znaczące, poza Roztoczem, gdzie średnia defoliacja z poziomu 29% spadła do 15%. Badania zależności przyczynowo-skutkowych (warunki pogodowe danego roku na zdrowotność drzewostanów) wykazują duże opóźnienie w czasie. W większości badanych geoekosystemów konsekwencje bardzo złych warunków wodnych w 2015 roku znalazły swoje odzwierciedlenie w gorszym stanie drzewostanów jeszcze w 2016 roku, a dopiero niewielka poprawa wystąpiła w 2017 roku (np. w Kampinosie i na Roztoczu).

W większości monitorowanych zlewni w 2021 roku zarejestrowano lekką defoliację (11-25%, poziom ostrzegawczy). Wyjątkiem jest zlewnia Wrzosówki w Karkonoszach, gdzie średnia defoliacja wyniosła zaledwie 7,5% i zaklasyfikowano ją do pierwszej klasy (0-10%, drzewostany zdrowe) oraz zlewnie Lewińskiej Strugi, jeziora Łękuk, Kanału Olszowieckiego oraz Wieńca, gdzie wystąpiła średnia defoliacja (26-60%, drzewostany uszkodzone). W przypadku zlewni Kanału Olszowieckiego, próg 26% został nieznacznie przekroczony. Najwyższy stopień redukcji aparatu asymilacyjnego od początku pomiarów utrzymuje się w Górach Świętokrzyskich i wynosi 50% (Tab. 31).

Tab. 31. Średnia defoliacja w zlewniach ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym

Stacja	Defoliacja [%]
Wolin	35,0
Parsęta	19,8
Puszcza Borecka	37,0
Wigry	17,5
Poznań-Morasko	15,0
Kampinos	27,8
Łysogóry	50,0
Roztocze	15,0
Beskid Niski	21,5
Karkonosze	7,5

Analiza przestrzenna zdrowotności drzewostanów posiadała w 2021 roku wymiar regionalny, czego potwierdzeniem były wartości średniej defoliacji sosen w zlewni górnej

Parsęty (19,8%), które były zbliżone, w porównaniu z rokiem 2020, dla sosny w wieku powyżej 60 lat z terenu RDLP Szczecinek – 19,9%, czy dla województwa zachodniopomorskiego – 21,0% (Zajączkowski 2021). Jednakże w analizie czasowo-przestrzennej stanu drzewostanów w Polsce należy uwzględnić także lokalną zmienność przestrzenną, która często może nie w pełni nawiązywać do ujęcia regionalnego. Na przykład w południowo-wschodniej części województwa zachodniopomorskiego, w zlewni górnej Parsęty średnia defoliacja sosny wyniosła w 2017 roku 17,0%, ale w północno-zachodniej części województwa, w zlewni Jeziora Gardno defoliacji sosen w tym samym roku nie stwierdzono. Z kolei w roku 2018 w obu zlewniach defoliacja sosny była na zbliżonym poziomie (17,4% w Stacji Parsęta i 21,0% w Stacji Wolin), a w 2021 roku defoliacja była już znacząco wyższa na Wolinie (35,0%) niż na Pojezierzu Drawskim (19,8%). Taka sytuacja świadczy o braku istotnych zmian pod względem defoliacji w zlewni górnej Parsęty i pogarszającego się od paru lat stanu zdrowotnego sosen na Wolinie.

7.5. Roślinne gatunki inwazyjne obcego pochodzenia

Obce geograficznie gatunki inwazyjne roślin są istotnym zagrożeniem dla środowiska przyrodniczego. Powodują one zmiany w naturalnych siedliskach przyrodniczych m.in. poprzez wypieranie gatunków rodzimych, które nie mogą konkurować z gatunkami o szerokiej skali ekologicznej (Tokarska-Guzik i in. 2012). Stąd też inwazje gatunków obcych (roślin i zwierząt) stanowią drugi co do znaczenia (po niszczeniu siedlisk) problem w zakresie ochrony przyrody rodzimej (Genovesi, Shine 2004). Ekspansja roślin inwazyjnych obcego pochodzenia odbywa się głównie dolinami rzecznymi i szlakami komunikacyjnymi (Czyryca 2017).

W 2021 roku zrealizowano badania patrolowe (obserwacje sprawdzające) występowania roślinnych gatunków inwazyjnych na obszarze całych zlewni badawczych w ramach monitoringu ogólnego. W tabeli 33 przedstawiono charakterystykę występowania gatunków inwazyjnych w badanych zlewniach ZMŚP i dokonano względnej waloryzacji zagrożenia dla funkcjonowania rodzimej flory. Jako wartości graniczne pomiędzy małym, a dużym zagrożeniem ekspansji gatunków inwazyjnych w monitorowanych geoekosystemach przyjęto liczbę 10 gatunków występujących w zlewni. Monitoring ogólny gatunków inwazyjnych realizowany jest na wybranych kwadratach według siatki MGRS na terenie zlewni, dlatego też analizując liczbę gatunków inwazyjnych w badanych geoekosystemach, istotne jest uwzględnienie obserwacji z lat wcześniejszych, prowadzonych w innych częściach zlewni.

Pod względem występowania roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia najlepsza sytuacja występowała w obszarach chronionych, na terenach Parków Narodowych (Wolińskiego, Świętokrzyskiego i Karkonoskiego). Zauważono pewną prawidłowość, że mniej gatunków inwazyjnych występowało w zlewniach z dominacją zwartego, leśnego pokrycia terenu, przy równoczesnym braku gęstej sieci komunikacyjnej i hydrograficznej (np. Wolin, Karkonosze) niż w zlewniach o znacznym areale gruntów ornych i zabudowań oraz gęstej infrastrukturze drogowej (np. Poznań-Morasko, Pojezierze Chełmińskie, Parsęta).

Tab. 32. Występowanie roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia w zlewniach ZMŚP w latach 2016-2021 roku

Stacja Bazowa	Liczba gatunków w zlewni											Zagrożenie
	monitoring ogólny							monitoring szczegółowy				
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	średnio	2016	2018	2020	średnio	
Wolin	5	7	7	7	5	5	6	2	2	2	2	małe
Parsęta	18	18	19	43	18	16	22	21	16	22	20	duże
Puszcza Borecka	3	5	6	6	6	6	5	2	2	2	2	małe
Wigry	23	3	14	14	14	14	14	2	2	2	2	duże
Pojezierze Chełmińskie	68	68	8	8	7	7	28	2	5	9	5	duże
Poznań-Morasko	23	17	13	5	7	5	12	32	19	23	25	duże
Kampinos	-	20	20	16	19	11	17	3	3	3	3	duże
Łysogóry	8	8	7	7	6	6	7	-	-	-	-	małe
Roztocze	38	38	38	38	28	31	35	10	9	9	9	duże
Beskid Niski	-	2	2	6	10	10	6	1	4	4	3	małe
Karkonosze	5	7	7	5	18	1	7	8	7	8	8	małe

7.6. Hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych

Warunki hydrometeorologiczne w 2021 roku nie zaburzały makrofitowej i hydromorfologicznej oceny koryt rzecznych. Badania prowadzono w pełni sezonu wegetacyjnego, który jest optymalnym okresem do badań makrofitowych i hydromorfologicznych. Badania terenowe w 2021 roku przeprowadzono w czterech Stacjach Bazowych (w każdej zlewni na 3 stanowiskach): Wolin (rzeka Lewińska Struga i Kanał Kołczewo), Parsęta (rzeka Parsęta), Kampinos (Kanał Olszowiecki) i Pojezierze Chełmińskie

(Struga Toruńska). W ocenie hydrobiologii rzek wykorzystano opracowanie Jusika i in. (2021).

Na podstawie wyników badań terenowych, które dostarczyły informacji o składzie gatunkowym makrofitów oraz ich pokryciu na stanowiskach, obliczono Makrofitowy Indeks Rzeczny (MIR) (Szoszkiewicz i in. 2010). W celu oceny stanu ekologicznego badanych odcinków cieków obliczone wartości wskaźnika MIR odniesiono do wartości granicznych dla pięciu klas stanu ekologicznego, specyficznych dla różnych typów makrofitowych rzek, określonych w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Dz. U. 2019 poz. 2149).

Wartości wskaźnika MIR wahały się od 23,8 na stanowisku Lewińska Struga ujście do 54,9 na stanowisku Parsęta Przełom. Dwa stanowiska zaklasyfikowano do bardzo dobrego stanu ekologicznego, cztery do dobrego, pięć do umiarkowanego a jeden do słabego stanu ekologicznego. W obrębie jednej Stacji Bazowej występuje pełna zgodność klas stanu ekologicznego, związana z niewielką zmiennością wartości wskaźnika MIR w obrębie całej zlewni. Odchylenie standardowe w Strudze Toruńskiej wynosi jedynie 0,81. Odchylenie standardowe indeksu MIR dla pozostałych badanych JCWP wynosi odpowiednio: Parsęta – 10,45; Lewińska Struga i Kanał Kołczewo – 6,77 oraz Kanał Olszowiecki – 4,91. Największe różnice indeksu MIR (oraz klas od 1 do 3), zaobserwowane w rzece Parsęcie, wynikają ze skrajnie różnego charakteru badanych odcinków. Przełom to naturalny, kamienisto-żwirowy odcinek zlokalizowany w lesie, Storkowo to również naturalny odcinek leśny o charakterze piaszczystym, natomiast Łąka to silnie przekształcony antropogenicznie (wyprostowany i wyprofilowany) odcinek piaszczysty płynący przez otwarty teren użytków zielonych (Jusik i in. 2021)

Badania hydromorfologiczne były prowadzone w oparciu o metodę oceny wód płynących – River Habitat Survey (RHS) (Environment Agency 2003), wg polskiej jej wersji. Na jej podstawie możliwa jest charakterystyka koryta rzecznego oraz w mniejszym stopniu doliny rzecznej. Dzięki temu możliwa jest ocena stopnia naturalności i przekształcenia morfologicznego cieku (Szoszkiewicz, Gebler 2012). Ocenę stanu hydromorfologicznego metodą RHS wykonano jako wypadkową wskaźników naturalności HQA i przekształcenia siedliska HMS.

Na tej podstawie oceniono stopień przekształcenia badanych odcinków rzecznych (12 odcinków w 4 zlewniach ZMŚP: Lewińskiej Strugi, Parsęty, Strugi Toruńskiej i Kanału Olszowieckiego). Oprócz dwóch najbardziej naturalnych odcinków Parsęty, na wszystkich pozostałych odcinkach badawczych wykazano znaczne antropogeniczne przekształcenia siedlisk, co koresponduje także z naturalnością tych rzek opisaną powyżej. Trzy odcinki zaklasyfikowano do piątej klasy przekształceń, a cztery do czwartej klasy. W grupie cieków, w których odcinki badawcze zaklasyfikowano do czwartej lub piątej klasy znalazły się wszystkie zlokalizowane na stacjach Wolin oraz Pojezierze Chełmińskie oraz jeden ze stacji Parsęta (Łąka). Umiarkowanie przekształcone były trzy odcinki zlokalizowane na Kanale Olszowieckim, co jest wynikiem wciąż widocznego ukształtowania koryta przez człowieka.

Porównanie uzyskanych wyników z poprzednimi badaniami przeprowadzonymi w latach 2015 i 2018 roku wskazuje na brak zmian w klasyfikacji stanu niemal wszystkich badanych odcinków rzecznych, podobnie jak miało to miejsce w przypadku zmian klas na podstawie wskaźnika HIR. Jednym wyjątkiem, była Struga Toruńska, w której ocena stanu uległa poprawie ze złego do słabego na odcinku Lipowiec. Zmiana odnotowana w ostatnich trzech latach, spowodowała jednak powrót do czwartek klasy, która została odnotowana podczas pierwszego badania w roku 2015. Stan hydromorfologiczny tego odcinka uległ pogorszeniu w roku 2018, co było spowodowane głównie zubożeniem roślinności wodnej i nadwodnej, na skutek prawdopodobnie prowadzonych prac utrzymaniowych. W roku 2021 bogactwo i struktura roślinności były bardziej zróżnicowane, co przy powolnym różnicowaniu się warunków abiotycznych, spowodowało niewielką poprawę stanu hydromorfologiczne (Jusik i in. 2021).

Stan geoekologiczny badanych geoekosystemów określono na podstawie niższej wartości otrzymanych wskaźników MIR i RHS. Do bardzo dobrego stanu geoekologicznego (1 klasa) zakwalifikowano Wrzosówkę, do umiarkowanego stanu (3 klasa) Bystrzankę, a do złego stanu (4 klasa) Różany Strumień (Tab. 33).

Tab. 33. Wartości wskaźnika MIR, RHS i stan geoekologiczny koryt rzecznych w zlewniach ZMŚP (2021)

Stacja ZMŚP (ciek)	MIR	RHS	Stan geoekologiczny
Wolin (Lewińska Struga)	3	5	zły
Parsęta (Parsęta)	2	2	dobry
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	3	5	zły
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	2	3	umiarkowany

8. STAN GEOEKOLOGICZNY I POTENCJAŁ ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP

Stan środowiska przyrodniczego badanych geoekosystemów określono na podstawie badań obejmujących realizację programów ZMŚP o interwale rocznym i trzyletnim. Wyniki badań ZMŚP obejmują relacje między składowymi elementami krajobrazu geograficznego, np. warunkami pogodowymi, procesami hydrologicznymi i geomorfologicznymi, stanem roślinności, antropopresją itp.

Stan geoekologiczny geoekosystemu oznacza rozpoznanie i określenie stanu przyrody ożywionej i nieożywionej w zasięgu monitorowanej zlewni rzecznej (lub jeziornej), w określonym czasie (doba, dekada, miesiąc, rok, wielolecie). Opis stanu geoekologicznego należy dokonać w powiązaniu ze współczesnymi zmianami klimatu, działalnością człowieka, ze wskazaniem zachowania geo- i bioróżnorodności środowiska, z podaniem form zagrożeń oraz przedstawieniem przewidywanych tendencji rozwoju (prognozy).

Stan geoekologiczny roku 2021 został określony na podstawie wyników realizacji corocznego programu ZMŚP w Stacjach Bazowych w 2021 roku z uwzględnieniem stanu z roku poprzedniego (z 2020 roku na 2021 rok). Do oceny dynamiki rocznej stanu geoekologicznego wykorzystano programy: meteorologia, zanieczyszczenie powietrza, chemizm opadów atmosferycznych, chemizm opadu podkoronowego, chemizm spływu po pniach, chemizm roztworów glebowych, opad organiczny, wody podziemne, wody powierzchniowe – rzeki, wody powierzchniowe – jeziora, gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny, uszkodzenia drzew i drzewostanów (Tab. 35).

Uzupełnieniem oceny geoekologicznej w 2021 roku było uwzględnienie także programów realizowanych 1 raz na 3 lata (Tab. 35): zmiany pokrycia terenu i użytkowanie ziemi, struktura i dynamika szaty roślinnej, hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych, ocena usług geoekosystemów. Biorąc pod uwagę krótkookresową (z roku na rok) zmienność tych komponentów środowiska przyrodniczego można założyć, że wyniki z 2019 i 2020 roku są aktualne także dla 2021 roku.

Przedstawiona ocena usług geoekosystemów dostarcza bardzo istotnych informacji o potencjale i zasobach środowiska przyrodniczego badanych geoekosystemów.

8.1. Potencjał środowiska przyrodniczego w oparciu o ocenę usług geoekosystemów

Potencjał środowiska przyrodniczego badanych geoekosystemów określono na podstawie realizacji programu „Ocena usług geoekosystemów". Ocena potencjału środowiska przyrodniczego do dostarczania usług polegała na porównaniu geoekosystemów (reprezentowanych przez określone typy pokrycia i użytkowania terenu) pod względem ich zdolności do dostarczania usług zaopatrujących, a zwłaszcza regulacyjnych. Metodyka określenia potencjału geoekosystemów oraz wyniki dla poszczególnych zlewni ZMŚP zostały zawarte w opracowaniu Lupy (2021). W procedurze wykorzystano matrycę usług ekosystemów, zawierającą wykaz typów ekosystemów i przypisane im usługi wraz z oceną poziomu usług.

Zdolność geoekosystemów do dostarczania poszczególnych usług oceniano na następujących poziomach: 0 – brak istotnego potencjału; 1 – niski potencjał; 2 – umiarkowanie niski potencjał, 3 – średni potencjał; 4 – wysoki potencjał; 5 – bardzo wysoki (maksymalny) potencjał. Bonitacją objęto 2 usługi zaopatrujące:

- produkcja żywności – produkty żywnościowe dla ludzi;
- produkcja paszy – pasza dla zwierząt;

oraz 9 usług regulacyjnych:

- kształtowanie klimatu w skali globalnej – trwałe unieruchamianie gazów cieplarnianych (GFG) przez geoekosystemy;
- kształtowanie klimatu w skali lokalnej – oddziaływanie na elementy pogody i klimatu (wiatr, opady, temperaturę, wilgotność, radiację) przez komponenty geoekosystemów, zwłaszcza pokrycie terenu;
- poprawa jakości powietrza – przechwytywanie i filtrowanie pyłów, zanieczyszczeń chemicznych i gazowych;
- poprawa jakości wody – oddziaływanie geoekosystemów na jakość wody, np. poprzez ograniczanie zanieczyszczeń i patogenów;
- regulacja obiegu wody – wpływ na składowe cyklu obiegu wody (np. retencja i regulacja odpływu, naturalny drenaż, stabilizacja poziomu wód i przeciwdziałanie suszom);
- regulacja obiegu biogenów – zdolność geoekosystemu do recyklingu, np. azotu i fosforu;
- ochrona przed erozją – retencja glebowa oraz zdolność do przeciwdziałania erozji gleb i powstawania osuwisk;

– zapylanie i rozprzestrzenianie nasion – pszczoły, ptaki, nietoperze, ćmy, muchy i inne zwierzęta przyczyniające się do reprodukcji roślin poprzez przeniesienie ich pyłków lub nasion;
– kontrola szkodników i przeciwdziałanie plagom – zdolność do zwalczania szkodników i chorób, co czyni rośliny i zwierzęta mniej podatnymi na choroby i pasożyty.

W 2021 roku program „Ocena usług geoekosystemów" był realizowany w czterech Stacjach Bazowych: Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos. W ocenie usług geoekosystemów wzięto pod uwagę dominację klasy potencjału środowiska przyrodniczego (największy udział procentowy) dla danej usługi. Potencjał środowiska badanych geoekosystemów określono na podstawie sumy punktów z macierzy (Tab. 34), a warunkowany on był głównie strukturą użytkowania i formami pokrycia terenu. Wyróżniono 3 klasy potencjału środowiska: niski (<20 pkt), średni (20-40 pkt) i wysoki (>40 pkt).

Tab. 34. Potencjał środowiskowy w zlewniach ZMŚP na podstawie programu oceny usług geoekosystemów (2021)

Stacja Bazowa	Usługi regulacyjne									Usługi zaopatrujące		Suma pkt	Potencjał środowiska
	kształtowanie klimatu w skali globalnej	kształtowanie klimatu w skali lokalnej	poprawa jakości powietrza	poprawa jakości wody	regulacja obiegu wody	regulacja obiegu biogenów	ochrona przed erozją	zapylanie i rozprzestrzenianie nasion	kontrola szkodników i przeciwdziałanie plagom	produkcja żywności	produkcja pasz		
Puszcza Borecka												42	wysoki
Wigry												41	wysoki
Pojezierze Chełmińskie												20	średni
Kampinos												25	wysoki

Potencjał środowiska przyrodniczego:

0 pkt – brak; 1 pkt – niski; 2 pkt – umiarkowanie niski; 3 –pkt umiarkowany; 4 pkt – wysoki; 5 pkt – bardzo wysoki

Wysokim potencjałem charakteryzowały się 3 analizowane zlewnie ZMŚP, o względnie małych przekształceniach antropogenicznych (Stacje: Puszcza Borecka, Wigry i Kampinos). Natomiast średnim potencjałem wyróżniła się Stacja Pojezierze Chełmińskie, monitorująca zlewnię o wysokiej antropopresji. Zachowana została stwierdzona w latach

wcześniejszych dysproporcja w zakresie waloryzacji usług regulacyjnych stan środowiska przyrodniczego a usługami zaopatrującymi ludność. Zlewnie o wysokim potencjale usług regulacyjnych nie posiadały żadnych usług zaopatrujących. Natomiast zlewnia o wysokim potencjale usług zaopatrujących (Stacja Pojezierze Chełmińskie) miała niski potencjał usług regulacyjnych.

8.2. Stan geoekologiczny

W oparciu o realizowany program ZMŚP dokonano waloryzacji stanu geoekologicznego badanych geoekosystemów w oparciu o wyniki z lat 2019-2021 (Tab. 35). Dokonano oceny geoekologicznej komponentów środowiska przyrodniczego (programów ZMŚP) realizowanych w stacjach. Uwzględniono właściwości ilościowe i jakościowe oraz tendencje zmian danego komponentu środowiska przyrodniczego.

Waloryzacja stanu geoekologicznego środowiska dla poszczególnych komponentów środowiska przyrodniczego wykonana została w oparciu o następujące kryteria (Tylkowski, Kostrzewski 2018):

- stan dobry +1 pkt – pozytywna zmiana ilościowa lub jakościowa danego komponentu w 2021 roku w odniesieniu do roku 2020; lub zachowanie dobrego stanu z poprzedniego roku;
- stan przeciętny 0 pkt – brak zmiany ilościowej lub jakościowej danego komponentu w 2021 roku na tle roku 2020; lub zachowanie przeciętnego stanu z poprzedniego roku;
- stan słaby -1 pkt – negatywna zmiana ilościowa lub jakościowa danego komponentu w 2021 roku na tle roku 2020; lub zachowanie słabego stanu z poprzedniego roku.

Do oceny stanu środowiska badanych zlewni wzięto pod uwagę wyniki programów realizowanych w rocznym interwale czasowym oraz 1 raz na 3 lata w okresie 2019-2021 (Tab. 35). Dla programów realizowanych corocznie była możliwość odniesienia stanu poszczególnych komponentów środowiska przyrodniczego w 2021 roku do roku ubiegłego. Natomiast dla programów realizowanych w cyklu trzyletnim odniesiono się do wyników badań z wcześniejszego cyklu pomiarowego.

Stan geoekologiczny dla danej zlewni określono jako sumę punktów otrzymanych z punktacji poszczególnych komponentów środowiska przyrodniczego (programów ZMŚP): stan dobry ≥10 pkt; stan przeciętny 1-9 pkt; stan słaby ≤0 pkt. Jest to ujęcie o charakterze porównawczym, którego celem jest wyłącznie porównanie miedzy sobą badanych geoekosystemów oraz porównanie z rokiem poprzednim (Tylkowski, Kostrzewski 2018).

Tab. 35. Stan geoekologiczny zlewni badawczych ZMŚP w 2021 roku (na podstawie programów o rocznym i trzyletnim interwale czasowym)

Program ZMŚP	Rok	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Programy 1 raz/rok *+1 pkt stan dobry*, *0 pkt stan przeciętny*, *-1 pkt stan słaby* ☐ *program nierealizowany w Stacji Bazowej*												
Meteorologia	**2021**											
	2020											
Zanieczyszczenie powietrza	**2021**											
	2020											
Chemizm opadów atmosferycznych	**2021**											
	2020											
Chemizm opadu podkoronowego	**2021**											
	2020											
Chemizm spływu po pniach	**2021**											
	2020											
Chemizm roztworów glebowych	**2021**											
	2020											
Wody podziemne	**2021**											
	2020											
Opad organiczny	**2021**											
	2020											
Wody powierzchniowe – rzeki	**2021**											
	2020											
Wody powierzchniowe – jeziora	**2021**											
	2020											
Gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny	**2021**											
	2020											
Uszkodzenia drzew i drzewostanów	**2021**											
	2020											
Program 1 raz/2 lata *[+1 pkt stan dobry, 0 pkt stan przeciętny, -1 pkt stan słaby]*												
Metale ciężkie i siarka w porostach	**2021**											
	2019											

Program ZMŚP	Rok	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Programy 1 raz/3 lata *[+1 pkt stan dobry, 0 pkt stan przeciętny, -1 pkt stan słaby]*												
Zmiany pokrycia terenu i użytkowanie ziemi	2019											
Struktura i dynamika szaty roślinnej	2019											
Hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych	2021											
	2020											
	2019											
Ocena usług geoekosystemów	2021											
	2020											
	2019											
Stan geoekologiczny	**2021**	**7**	**7**	**9**	**8**	**-3**	**-2**	**3**	**6**	**10**	**8**	**12**
	2020	**6**	**8**	**9**	**6**	**-6**	**-5**	**-4**	**4**	**6**	**9**	**11**
	2019	**6**	**7**	**9**	**6**	**-6**	**-5**	**-3**	**4**	**6**	**9**	**12**

Stan geoekologiczny w głównej mierze określany był na podstawie obiegu wody w poszczególnych geoekosystemach. O zakwalifikowaniu danego komponentu środowiska do stanu dobrego, przeciętnego lub słabego decydował stan ilościowy wody na poszczególnych etapach jego obiegu, np. w programie A1 – meteorologia, stan geoekologiczny opiera się na klasyfikacjach: opadowej Kaczorowskiej (1962) oraz termicznej Lorenc (1998) (Tab. 13). W programach, w których badany jest skład chemiczny próbek wodnych, poza stanem ilościowym, brana było pod uwagę również jakość wody. Na przykład w programie H1 – wody powierzchniowe – rzeki, o słabym stanie geoekologicznym mogło zadecydować okresowe zanikanie odpływu fluwialnego, jak również zakwalifikowanie stanu chemicznego zlewni jako poniżej dobrego – III-V klasa (Tab. 24, Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b). Z kolei w przypadku programów biotycznych, o stanie geoekologicznym decydowały wskaźniki przedstawione przy poszczególnych programach. Na przykład w programie K1 – uszkodzenia drzew i drzewostanów do dobrego stanu zaklasyfikowano zlewnie z zerową i pierwszą klasą defoliacji (do 25%), do przeciętnego stanu zlewnie ze średnią defoliacją (26-60%), a do stanu słabego zlewnie z trzecią i czwartą klasą defoliacji (powyżej 61%). Z kolei w programie

Hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych, stan geoekologiczny opierał się na wartościach wskaźników MIR i RHS (Tab. 33).

Względnie najlepszym stanem geoekologicznym w 2021 roku charakteryzowały się geoekosystemy niepoddawane antropopresji, położone w Parkach Narodowych (Stacje: Karkonosze i Roztocze). Przeciętnym stanem odznaczały się geoekosystemy znajdujące się w Polsce północnej (Stacje: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry), zlewnia Kanału Olszowieckiego (Stacja Kampinos) oraz zlewnie położone w strefie wyżynno-górskiej (Stacje: Łysogóry i Beskid Niski). Z kolei najgorszym stanem charakteryzowały się geoekosystemy poddane silnej antropopresji rolniczej i urbanizacyjnej (Stacje: Pojezierze Chełmińskie i Poznań Morasko). Zlewnia Różanego Strumienia znajduje się w strefie negatywnego oddziaływania miasta Poznania, a zlewnia Strugi Toruńskiej podlega intensywnej presji rolniczej. W porównaniu z poprzednim rokiem, stan geoekologiczny monitorowanych zlewni uległ poprawie, w szczególności w zlewni Kanału Olszowieckiego (Stacja Kampinos) i w zlewni Świerszcza (Stacja Roztocze). W głównej mierze wpłynęły na to korzystniejsze uwarunkowania hydrometeorologiczne. Na Roztoczu zarejestrowano najwyższe opady od przynajmniej 10 lat, a w zlewni Kanału Olszowieckiego, w przeciwieństwie do poprzedniego roku wystąpił odpływ fluwialny (Tab. 35).

9. PODSUMOWANIE STANU EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMÓW ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH POLSKI W 2021 ROKU

W 2021 roku hydrologicznym program ZMŚP realizowano w jedenastu Stacjach Bazowych, których lokalizacja odzwierciedla zróżnicowanie struktury krajobrazowej Polski. Funkcjonowanie monitorowanych eksperymentalnych zlewni ZMŚP, które są uznawane jako reprezentatywne dla danej strefy krajobrazowej, podlegało wpływom czynników naturalnych i antropogenicznych. W młodoglacjalnej strefie Niżu Polskiego badanych jest 6 geoekosystemów o odmiennych, regionalnych i lokalnych uwarunkowaniach, które decydują o stanie środowiska przyrodniczego: Stacja Wolin odznaczająca się dużym znaczeniem wpływu Bałtyku na atmosferyczną dostawę ładunku substancji rozpuszczonych, zwłaszcza w postaci aerozoli morskich, Stacja Parsęta, Stacja Puszcza Borecka, Stacja Wigry o względnie niskiej antropopresji, Stacja Pojezierze Chełmińskie wyróżniająca się bardzo dużą antropopresją związaną z funkcjonowaniem zmeliorowanej zlewni o użytkowaniu rolniczym i Stacja Poznań-Morasko charakteryzująca się silną antropopresją spowodowaną położeniem w granicach dużej aglomeracji miejskiej. W strefie nizin środkowopolskich monitorowana jest zlewnia Kanału Olszowieckiego w Stacji Kampinos, w której zaznacza się wpływ zanieczyszczeń atmosferycznych z Warszawy. Po dwie Stacje Bazowe znajdują się w strefach wyżyn oraz gór średnich. W strefie wyżyn są to: Stacja Łysogóry, gdzie obserwowane jest oddziaływanie lokalnych i ponadregionalnych emisji przemysłowych oraz Stacja Roztocze, w której zaznacza się niska antropopresja. Z kolei w górach średnich znajdują się: Stacja Beskid Niski, w której należy zwrócić uwagę na ryzyko zanieczyszczeń transgranicznych ze Słowacji oraz Stacja Karkonosze wyróżniająca się bardzo niską antropopresją.

O funkcjonowaniu i stanie środowiska przyrodniczego badanych geoekosystemów ZMŚP decyduje ich położenie w umiarkowanej strefie morfoklimatycznej, usytuowanie w różnych strefach krajobrazowych, o zróżnicowanej antropopresji. W oparciu o wieloletnie badania stacjonarne, można stwierdzić, że o przemianach środowiska przyrodniczego w umiarkowanej strefie morfoklimatycznej, w największym stopniu decyduje dynamika obiegu wody i materii rozpuszczonej, stymulowana przez uwarunkowania o charakterze lokalnym, regionalnym, a także globalnym.

Sprawą pierwszorzędnej wagi w prezentowanej analizie funkcjonowania eksperymentalnych geoekosystemów zlewni rzecznych i jeziornych była próba ilościowego i jakościowego oddzielenia oddziaływania czynników naturalnych i antropogenicznych.

Problematyka ta ma pierwszorzędne znaczenie w określeniu przyczyn obserwowanych zmian klimatu.

Rok 2021 odznaczał się zróżnicowaniem przestrzennym średniej rocznej temperatury powietrza i rocznej sumy opadów atmosferycznych. Warunki termiczne były korzystniejsze niż w latach poprzednich. W trzech monitorowanych zlewniach rok 2021 był chłodniejszy od wartości normalnej (przy różnicy >0,1°C), a cieplejszy (przy różnicy >0,1°C) w 2 zlewniach. W pozostałych sześciu różnice między średnią roczną temperaturą w 2021 roku, a średnią roczną temperaturą z wielolecia nie przekraczały 0,1°C. Pomimo niższych temperatur w roku 2021, wieloletnie pomiary temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP wskazują na niekorzystny trend podwyższania się średniej rocznej temperatury powietrza. Dla 7 stacji stwierdzono istotny statystycznie trend wzrostowy temperatury (Stacje: Wolin, Parsętą, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry i Beskid Niski), ponadto w 4 stacjach (Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Łysogóry i Beskid Niski) stwierdzono również istotny statystycznie trend wzrostowy frekwencji występowania dni gorących i upalnych, a w przypadku frekwencji występowania dni mroźnych stwierdzono istotny statystycznie trend spadkowy.

Warunki opadowe w 2021 roku zmieniały się od najbardziej korzystnych w strefie wyżyn (rok wilgotny w Stacjach: Łysogóry i Roztocze), do niekorzystnych w Polsce zachodniej (rok suchy w Stacjach: Wolin, Parsęta i Karkonosze). W pozostałych stacjach rok był normalny pod względem opadowym. Klasyfikacja ilościowa opadów w 2021 roku świadczy o względnym podobieństwie przestrzennym rocznej sumy opadów, co nie jest typowe dla klimatu Polski. Wyjątkiem są zlewnie charakteryzujące się większym wyniesieniem nad poziomem morza (położone w strefie gór niskich zlewnie Bystrzanki i Wrzosówki oraz położona w strefie wyżyn zlewnia Wieńca), odznaczające się stosunkowo wyższą roczną sumą opadów. Generalnie taka sytuacja potwierdza, że na dynamikę i strukturę opadów w Polsce wpływały czynniki globalne, a warunki regionalne i lokalne miały znaczenie drugorzędne.

Na funkcjonowanie środowiska przyrodniczego badanych geoekosystemów wpływał ładunek zanieczyszczeń dostarczony wraz z mokrą depozycją atmosferyczną. Jakość opadów atmosferycznych w 2021 roku pod względem wskaźnika odczynu i przewodności elektrolitycznej właściwej była bardzo dobra w większości badanych geoekosystemów, poza zlewnią Wieńca w Górach Świętokrzyskich. Zakwalifikowanie tej zlewni do klasy przewodności silnie podwyższonej zdecydowało o pogorszeniu jakości opadów atmosferycznych w stosunku do lat poprzednich pod względem wskaźnika SEC.

Przewodność nieznaczną stwierdzono w 4 Stacjach Bazowych: Puszcza Borecka, Kampinos, Roztocze i Karkonosze. W pozostałych stacjach mineralizacja opadów była lekko podwyższona i silnie podwyższona (Stacja Parsęta, minimalne przekroczenie wartości progowej). Odczyn opadów atmosferycznych w porównaniu do roku poprzedniego uległ poprawie i po raz drugi od początku pomiarów, we wszystkich zlewniach opady mieściły się w grupie opadów o normalnej kwasowości. Należy podkreślić utrzymującą się pozytywną tendencję stabilizacji bądź obniżenia mineralizacji opadów atmosferycznych w większości badanych zlewni. Jakość atmosferycznej dostawy wody do geoekosystemów była dobra.

W 2021 roku potwierdzona została tendencja do większego udziału tlenków azotu niż dwutlenku siarki w zakwaszaniu opadów atmosferycznych, którego presja w zakwaszaniu opadów jest najważniejsza od połowy lat 90 XX wieku. Większy udział dwutlenku siarki w zakwaszaniu opadów stwierdzono tylko w Polsce południowej (Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze) oraz w zlewniach położonych w pobliżu dużych aglomeracji miejskich (Poznań-Morasko i Kampinos). Powyższe prawidłowości odzwierciedlają sytuację większego wpływu związków azotu (np. NO_2) w zakwaszeniu opadów w Polsce, których źródłem są głównie zanieczyszczenia komunikacyjne. Jedynie w Polsce południowo-wschodniej większy wpływ w zakwaszeniu opadów mają siarczany, których źródłem jest zwłaszcza spalanie paliw kopalnych.

Korzystniejsze warunki hydrometeorologiczne w 2021 roku pozwoliły nieznacznie poprawić sytuację hydrogeologiczną. W żadnej zlewni nie stwierdzono występowania głębokiej niżówki, a frekwencja występowania płytkiej niżówki się zmniejszyła (wystąpiły tylko w Puszczy Boreckiej, na Roztoczu i w Beskidzie Niskim). W większości zlewni (poza zlewniami górnej Parsęty, Czarnej Hańczy i Różanego Strumienia), we wszystkich strefach krajobrazowych, wystąpiły również miesiące ze spadkiem retencji, chociaż z mniejszą częstotliwością niż w dwóch latach wcześniejszych. Wyższe stany wody nie wpłynęły znacząco na stan jakościowy wód podziemnych w zlewniach badawczych ZMŚP, w 9 z 11 zlewni stwierdzono zadowalającą klasę jakości wody, do dobrej klasy zaliczono tylko wody na Wolinie i w Beskidzie Niskim. Pozytywnie należy ocenić dobry stan chemiczny wód podziemnych we wszystkich badanych geoekosystemach.

W oparciu o badane wskaźniki hydrologiczne i fizyko-chemiczne można stwierdzić, że jakość wód rzecznych pozostaje na tym samym, przeciętnym poziomie od roku 2016, chociaż w 2021 roku zanotowano nieznaczny spadek jakości tych wód. Większość badanych cieków (6) posiadała w 2021 roku jakość wody bardzo dobrą i dobrą (2 cieki górskie: Wrzosówka i Bystrzanka; 2 cieki wyżynne: Wieniec i Świerszcz oraz 2 cieki nizinne:

Lewińska Struga i górna Parsęta). Z kolei w 4 nizinnych ciekach (Czarna Hańcza, Struga Toruńska, Różany Strumień i Kanał Olszowiecki) stwierdzono stan chemiczny poniżej dobrego (III-V klasa). Na obniżenie jakości wody do klasy poniżej dobrego stanu zadecydowały głównie podwyższone stężenia przewodności wody, stężenia chlorków, wapnia i magnezu. Ponadto w Strudze Toruńskiej na obniżenie jakości wody do klasy poniżej dobrego stanu zadecydowały również podwyższone wartości stężenia m.in. azotu azotanowego, którego przyczyną jest dominacja rolnego użytkowania zlewni i związane z tym nawożenie pól uprawnych. Stan chemiczny poniżej dobrego w Różanym Strumieniu, gdzie kumulują się negatywne wpływy oddziaływania północnych osiedli miasta Poznania, może być spowodowany dopływem ścieków i w efekcie podwyższeniem mineralizacji wody i wysokimi stężeniami jonów rozpuszczonych, np. chlorków. Nieznaczne pogorszenie jakości wód płynących zauważalne było również w zagrożeniu wzmożoną eutrofizacją w Strudze Toruńskiej (po raz pierwszy od trzech lat). Z kolei ocena jakości wody w monitorowanych 4 jeziorach (Gardno, Czarne, Łękuk i Kamionkowskie) pozwoliła na zakwalifikowanie tych wód do najlepszej klasy jakości wody. W przeciwieństwie do cieków, w jeziorach nie stwierdzono zagrożenia badanych jezior eutrofizacją.

W wodach podziemnych i powierzchniowych nie stwierdzono istotnej tendencji do spadku stężeń związków azotu co może oznaczać, że stanowią one potencjalne zagrożenie wzmożonej eutrofizacji. Działaniem zapobiegawczym jest w tym przypadku zachowanie stref nadrzecznych i przyjeziornych z naturalnymi strefami roślinności, w których zachodzi proces redukcji biogenów. Wieloletnie badania ilościowe i jakościowe wód zlewni rzecznych i jeziornych w programie ZMŚP potwierdzają występowanie tendencji do obniżenia stężenia jonów siarczanowych. Związane jest to przede wszystkim ze spadkiem stężenia SO_2 w powietrzu i opadach atmosferycznych. Przykładowo w Puszczy Boreckiej, w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, średnie roczne stężenia siarczanów w opadach były większe niż stężenia azotanów, a w kolejnych latach coraz wyraźniej zaznaczała się dominacja jonów azotanowych nad siarczanowymi. Taka sytuacja jest związana z relacjami pomiędzy prekursorami tych związków – tlenkami siarki i azotu w powietrzu – stężenia SO_2 malały w tym okresie wyraźnie, a stężenia NO_2 wykazywały tendencję wzrostową (Degórska i in. 2022). Ta zależność potwierdza aktualnie większą rolę w kształtowaniu jakości powietrza atmosferycznego przez zanieczyszczenia komunikacyjne niż przemysłowe.

W oparciu o ponad dwudziestopięcioletni okres standaryzowanego monitoringu, realizowanego w ramach programu ZMŚP można stwierdzić, że największe znaczenie na stan, przemiany i zmienność środowiska przyrodniczego geoekosystemów Polski wywierają

czynniki antropogeniczne o zasięgu regionalnym (np. dostawa zanieczyszczeń atmosferycznych spoza zlewni badawczych) i lokalnym (np. zmiany użytkowania terenu zlewni ZMŚP). Uwarunkowania fizycznogeograficzne wynikające z położenia zlewni ZMŚP w poszczególnych strefach krajobrazowych Polski mają raczej drugorzędne znaczenie dla określenia mechanizmu funkcjonowania środowiska geograficznego. Jednakże w przypadku analizy niektórych geowskaźników, np. stężenia i udziału w opadach atmosferycznych jonów pochodzenia morskiego (Cl^- i Na^+) możliwa jest regionalizacja jakości opadów atmosferycznych w transektach południkowych i równoleżnikowym. Powyższa regionalizacja chlorkowo-sodowa opadów atmosferycznych zakłócona jest tylko podwyższonym stężeniem tych jonów w wyżynnej zlewni Wieńca (Stacja Łysogóry), czego przyczyną może być antropopresja, przejawiająca się podatnością na napływ zanieczyszczeń pochodzenia nie tylko lokalnego, ale również bardziej odległego.

Zagrożeniem dla funkcjonowania badanych geoekosystemów są zarówno procesy naturalne (np. ekstremalne zdarzenia hydrometeorologiczne i geomorfologiczne) jak i antropogeniczne związane z dostawą zanieczyszczeń. W 2021 roku nie stwierdzono istotnych zagrożeń w funkcjonowaniu środowiska przyrodniczego badanych zlewni. Wśród zdarzeń ekstremalnych w monitorowanych zlewniach, warto wspomnieć o czerwcowym opadzie w Poznaniu o ekstremalnej intensywności (opad dobowy 77,6 mm, z maksymalnym natężeniem godzinnym 60 mm/h). Opad nawalny wpłynął destrukcyjnie na infrastrukturę miejską w Poznaniu, jednak nie miał istotnego wpływu na funkcjonowanie zlewni Różanego Strumienia w dłuższym okresie. Wśród naturalnych zjawisk ekstremalnych potencjalnie przekształcających środowisko przyrodnicze badanych geoekosystemów wyróżnić można występowanie suszy meteorologicznej w czterech zlewniach (Wolin, Parsęta, Łysogóry i Beskid Niski). Jednakże okresy bezopadowe nie spowodowały w większości badanych zlewni większych zmian funkcjonowania środowiska przyrodniczego. Efektem tych zdarzeń był m.in. okresowy zanik odpływu fluwialnego w zlewniach: Lewińskiej Strugi, Strugi Toruńskiej, Różanego Strumienia, Kanału Olszowieckiego i Wieńca.

Istotna dla zachowania i oceny walorów przyrodniczych geoekosystemów Polski była realizacja w 2021 roku w Stacjach Bazowych programów biotycznych (uszkodzenia drzew i drzewostanów, bioindykacja dotycząca występowania roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia i hydrobiologia rzek), jak również programu ujmującego zmiany antropogeniczne (ocena usług geoekosystemów). Wartościowanie środowiska przyrodniczego w zlewniach ZMŚP pozwoliło na wypracowanie metodyki wyceny zasobów środowiska

przyrodniczego w różnych geoekosystemach Polski oraz określenie potencjału środowiskowego badanych geoekosystemów.

W oparciu o długoletnie rozpoznanie zależności przyczynowo-skutkowych w zlewniach między abiotycznymi i biotycznymi komponentami środowiska przyrodniczego określenie (dla tego samego roku badawczego) zależności regresyjnej jest bardzo trudne, a wręcz niemożliwe. Przyroda ożywiona (np. porosty, makrofity) nie reaguje bezpośrednio i jednoznacznie na rozwój i zagrożenia wynikające z niekorzystnych uwarunkowań abiotycznych (np. warunki hydrometeorologiczne – susze, niżówki; zanieczyszczenia powietrza i opadów atmosferycznych). Na stan i przemiany świata ożywionego wpływa bardzo wiele zmiennych o niekiedy bardzo lokalnym zasięgu przestrzennym (np. warunki pogodowe, litologia, gleby, hydrologia i hydrogeologia), których wzajemne powiązania i zmienność czasowa decyduje o warunkach dla życia i rozwoju roślin i zwierząt. Poza tym stan i przemiany przyrody ożywionej charakteryzują się pewną inercją, gdzie niekorzystne uwarunkowania abiotyczne mogą skutkować dopiero po dłuższym okresie czasu. Dlatego bardzo istotne jest rozpatrywanie reakcji świata biotycznego na niekorzystne uwarunkowania środowiska abiotycznego w dłuższym okresie czasu. Pogorszenie stanu przyrody ożywionej (np. program uszkodzenia drzew i drzewostanów – parametry defoliacja i odbarwienie) może być konsekwencją niekorzystnych uwarunkowań abiotycznych (np. niedobór opadów, zakwaszenie wód opadowych, zanieczyszczenie powietrza) występujących kilka lat wcześniej. Przykładem takiej nie wprost proporcjonalnej i skomplikowanej zależności uwarunkowań abiotycznych do biotycznych były lata 2018 i 2019, kiedy występowały bardzo niekorzystne uwarunkowania abiotyczne (susza meteorologiczna, obniżenie poziomu wód gruntowych, ekstremalne niżówki w ciekach, zanik odpływu fluwialnego), które nie przełożyły się wtedy na pogorszenie jakości wody i zły stan przyrody ożywionej (porosty, makrofity, drzewostany). Taka sytuacja świadczy o dużej bezwładności, odporności i bardzo dobrej jakości środowiska przyrodniczego w badanych zlewniach. Przemiany biotycznych komponentów środowiska przyrodniczego (np. zasięg przestrzenny gatunków i zbiorowisk roślinnych) mogą wynikać z:

1) długookresowego oddziaływania presji będącej efektem m.in. zmian klimatycznych (np. wzrost średniej rocznej temperatury powietrza może skutkować pogorszeniem zdrowotności i zmianą zasięgu występowania, a nawet „wycofania się" gatunków „chłodnolubnych", np. świerka w Polsce północno-wschodniej). Przykładem zmian klimatycznych, generujących zmiany geoekosystemów leśnych są obserwacje dotyczące zmian zbiorowisk leśnych w nadmorskiej strefie brzegowej Bałtyku (Tylkowski 2015b), m.in. w zasięgu Stacji Bazowej Wolin. Dla polskiej strefy brzegowej Bałtyku

stwierdzono występowanie trendu wzrostu średniej rocznej temperatury powietrza 0,32°C/10 lat. Skutkiem wzrostu zasobów ciepła, zwłaszcza w sezonie wegetacyjnym, będzie występowanie w ciągu najbliższych 20 lat odpowiednich warunków cieplnych do występowania zbiorowisk leśnych typu *Fagetum* i degradacja zbiorowisk leśnych *Piceetum*. Z kolei może to spowodować wzrost defoliacji i odbarwienia igieł w drzewostanach sosnowych, ich większą podatność na zagrożenia pogodowe (np. wiatr, susze) oraz mniejszą odporność na szkodniki. Jeśli trend wzrostu warunków termicznych się nie zmieni to za 150 lat będą istniały dogodne warunki termiczne dla rozwoju ciepłolubnych lasów typu *Castanetum* i wtedy lasy bukowe będą bardziej podatne na zagrożenia (Tylkowski 2015b);

2) krótkookresowej, nagłej antropopresji związanej ze zmianą warunków siedliskowych (np. zmiany warunków wodnych, nadmiernej dostawy biogenów czy zmiany form użytkowania i pokrycia terenu). Przykładem był 2019 rok kiedy pogorszyła się zdrowotność epifitów nadrzewnych – wzrost powierzchni chloroz i nekroz w porównaniu z latami wcześniejszymi, jednakże prawdopodobnie główną przyczyną tego stanu były warunki meteorologiczne a nie wzmożona antropopresja.

Posiadając w Centralnej Bazie Danych ZMŚP ponad dwudziestopięcioletnie ciągi pomiarowe, uzasadnione jest prognozowanie przyszłych zmian środowiska przyrodniczego w badanych zlewniach. W 2020 roku w raportach Stacji Bazowych ZMŚP przedstawione zostało modelowanie zmian bilansu wodnego i biogeochemicznego (modelowanie Soil and Water Assessment Tool – SWAT). Modelowanie obejmowało m.in. odpływ wody ze zlewni oraz odpływy azotu azotanowego i fosforu. Przeprowadzona została również symulacja odpływu w dwóch okresach: 2021-2030 i 2041-2050 w oparciu o dane klimatyczne uzyskane z internetowego portalu KLIMADA 2.0. Efektem zastosowanego modelowania było uzyskanie informacji w zakresie kierunków rozwoju środowiska przyrodniczego monitorowanych zlewni. Ponowne opracowanie modelowania przedstawione zostanie w raportach za rok 2023.

Realizacja programu ZMŚP w ramach monitoringu przyrody ożywionej funkcjonującego w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska posiada duże znaczenie dla ochrony zasobów przyrodniczych Polski. Dziewięć zlewni badawczych ZMŚP (oprócz Pojezierza Chełmińskiego i Poznania-Morasko) znajduje się w granicach obszarów specjalnej ochrony siedlisk Natura 2000, a sześć zlewni znajduje się w Parkach Narodowych. Wyniki monitoringu zintegrowanego są przydatne dla Parków Narodowych oraz pomagają w realizacji programu Natura 2000, który służy ochronie dziedzictwa przyrodniczego Polski zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Należy zwrócić uwagę na edukacyjne i dydaktyczne funkcje realizowanego programu ZMŚP w różnych regionach Polski. Funkcja edukacyjna jest doskonałą możliwością przekazywania informacji o aktualnym stanie środowiska przyrodniczego, kierunkach zagrożeń i formach ochrony, jak również kształtowania właściwych postaw w odniesieniu do zrównoważonego rozwoju środowiska przyrodniczego.

W oparciu o dyskusje programu ZMŚP wprowadzono przedmioty Monitoring środowiska przyrodniczego oraz Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego do programu studiów wyższych, powstały specjalizacje uniwersyteckie w tym zakresie. Planowana jest organizacja Studium Podyplomowego w zakresie Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Inicjatywa ta jest z powodzeniem realizowana, co pomaga w przygotowaniu specjalistów w zakresie monitoringu środowiska przyrodniczego.

Należy zwrócić uwagę na przydatność praktyczną wyników monitoringu środowiska przyrodniczego geoekosystemów dla celów zagospodarowania przestrzennego w samorządach lokalnych. Realizacja programu ZMŚP spełnia ważną funkcję planistyczno-decyzyjną, która polega na wykorzystaniu oceny stanu środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów jako podstawy decyzji planistycznych.

Dane pomiarowe z realizacji programu ZMŚP umożliwiają realizację projektów badawczych i aplikacyjnych. Ważnym zadaniem w realizacji programu ZMŚP jest zwiększenie współpracy z Regionalnymi Wydziałami Monitoringu Środowiska GIOŚ, a także z Regionalnymi Dyrekcjami Ochrony Środowiska, z Regionalnymi Dyrekcjami Lasów Państwowych, jak również z władzami samorządowymi. Rozwinięcie współpracy z wyżej wymienionymi jednostkami pozwoli na większe upowszechnienie wyników badań ZMŚP, a także umożliwi wprowadzenie do raportu ZMŚP zagadnień ważnych z praktycznego punktu widzenia. Włączenie Stacji Bazowych ZMŚP do systemu europejskiego Integrated Monitoring upowszechnia informacje o stanie środowiska przyrodniczego w Polsce, pozwala na studia porównawcze w skali międzynarodowej.

Podstawowym zadaniem ZMŚP na kolejne lata jest wypracowanie i wzmocnienie indywidualności przedmiotowej programu ZMŚP w kompleksowej ocenie stanu i przemian środowiska przyrodniczego Polski oraz ugruntowanie pozycji w monitoringu krajowym i europejskim.

Szczegółowe, kompleksowe opracowania stanu i przemian oraz ukazanie związków przyczynowo-skutkowych w funkcjonowaniu środowiska przyrodniczego w badanych geoekosystemach ZMŚP w 2021 roku na tle wielolecia przedstawiono w raportach Stacji Bazowych ZMŚP, które stanowią załącznik do niniejszego opracowania.

10. LITERATURA

Awłasiewicz W., 1953: Sposób badania odpływu rzek przy pomocy mapy parowania. Gospodarka Wodna 13(6), 202-205.

Czyryca P., 2017: Zagrożenie inwazyjnymi gatunkami roślin obcego pochodzenia w zlewni Jeziora Gardno (Woliński Park Narodowy). Przegląd Przyrodniczy XXVIII 3: 18-28.

Degórska A., Białoskórska U., Bratkowski J., Marcinkowski M., Prządka Z., Skotak K., Syrzycki M., Typiak-Nowak D., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Puszcza Borecka w 2021 roku. Warszawa, maszynopis.

Dyrektywa Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych. Dz. U. UE L91.135 z dnia 30 maja 1991 r.

Dyrektywa Rady 91/676/EWG z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego. Dz. U. UE L91.375 z dnia 31 grudnia 1991 r.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej. Dz. U. UE L00.327 z dnia 22 grudnia 2000 r.

Environment Agency, 2003: River Habitat Survey in Britain and Ireland – Field Survey Guidance Manual: 2003 Version. Environment Agency, Warrington.

Froehlich W., 1982: Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin w górskiej zlewni fliszowej. Prace Geogr. IGiPZ PAN, 143.

Genovesi P., Shine C., 2004: European strategy on invasive alien species. Nature and environment, No. 137, Council of Europe Publishing.

Grodzińska K., Laskowski R., 1996: Ocena stanu środowiska i procesów zachodzących w lasach zlewni potoku Ratanica (Pogórze Wielickie, Polska Południowa). Bibl. Monit. Środ. Warszawa.

Herbich J., 2003: Dyrektywa Siedliskowa – założenia, realizacja, perspektywy. Parki Narodowe 2: 3-8.

Isidorow W., Jaroszyńska J., 1998. Chemiczne problemy ekologii, Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, Białystok.

Jansen W., Block A., Knaack J., 1988: Kwaśne deszcze, Historia, powstawanie, skutki. Aura (4): 18-19.

Jóźwiak M., Jóźwiak M.A., Kozłowski R., Szwed M., Żelezik M., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Łysogóry w 2021 roku. Kielce, maszynopis.

Jusik S., Gebler D., Szoszkiewicz K., 2021: Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznego. Sprawozdanie z realizacji I etapu umowy nr DM/13/2020/F pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w roku 2021". Poznań, maszynopis.

Kaczorowska Z., 1962: Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. Prace Geogr. IG PAN (33): 1-102.

Kejna M., Hildebrandt K., Jankowski M., Nowak M., Pius B., Rutkowski L., Sobota I., Uscka-Kowalkowska J., Wojtczak H., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Pojezierze Chełmińskie w 2021 roku. Toruń, maszynopis.

Kijowska-Strugała M., Bochenek W., Ptaszek E., Szydłowski T., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Beskid Niski w 2021 roku. Szymbark, maszynopis.

Kolander R., 1999: Stan geoekosystemów Polski w 1998 roku. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_1998.pdf

Kondracki J., 2000: Geografia Regionalna Polski, Wydawnictwo Naukowe PWN.

Kostrzewski A., 1993: Geoekosystem obszarów nizinnych. Koncepcja metodologiczna. [W:] A. Kostrzewski (red.), Geoekosystem obszarów nizinnych, Polska Akademia Nauk, Kom. Nauk. Prez. PAN „Człowiek i Środowisko", Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław: 11-17.

Kostrzewski A., 1995: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – cele, założenia i zadania. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Propozycje programowe, Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 7-22.

Kostrzewski A., 2003: Obieg wody i jego wpływ na powstanie i funkcjonowanie struktur krajobrazowych strefy młodoglacjalnej (Polska północno-zachodnia, Pomorze Zachodnie). [W:] A. Kostrzewski, J. Szpikowski (red.), Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych 3: 17-20.

Kostrzewski A., Kruszyk R., Kolander R., 2006: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2018: Stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów Polski w latach 1994-2015 w oparciu o realizację programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2021: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., 1995: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań. Bibl. Monit. Środ., Warszawa.

Kostrzewski A., Mizgajski A., Stępniewska M., Tylkowski J., 2014: The use of Integrated Environmental Programme for ecosystem services assessment. Ekonomia i Środowisko 4 (51): 94-101.

Kostrzewski A., Pulina M. (red.), 1992: Metody hydrochemiczne w geomorfologii dynamicznej. Wybrane problemy. Prace Naukowe UŚ, 1254, Katowice.

Kostrzewski A., Szpikowski J., Szpikowska G., Domańska M., Kruszyk R., Tylkowski J., 2007: Ocena stanu środowiska geograficznego zlewni górnej Parsęty na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w latach 1994-2006. [W:] A. Kostrzewski, A. Andrzejewska (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska przyrodniczego a zadania ochrony Obszarów Natura 2000. Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 161-174.

Krakowski K., K., Dobrowolski M., Stanek M., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Karkonosze w 2021 roku. Jelenia Góra, maszynopis.

Kruszyk R., 2003: Stan geoekosystemów Polski w 2002 roku. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2002.pdf

Kruszyk R., 2004: Stan geoekosystemów Polski w roku 2003. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2003.pdf

Kruszyk R., 2005: Stan geoekosystemów Polski w roku 2004. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2004.pdf

Kruszyk R., 2006: Stan geoekosystemów Polski w roku 2005. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2005.pdf

Kruszyk R., 2009: Raport o stanie geoekosystemów Polski w roku 2008. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2008.pdf

Kruszyk R., 2010: Stan geoekosystemów Polski w roku 2009. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2009.pdf

Krzysztofiak L., Mackiewicz A., Romański M., Danilczyk M., Krzysztofiak A., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Wigry w 2021 roku. Krzywe, maszynopis.

Kundzewicz Z.W., 2011: Zmiany klimatu, ich przyczyny i skutki – obserwacje i projekcje. Landform Analysis (15): 39-49.

Lorenc H., 1998: Ocena stopnia realizacji programu "obserwacje meteorologiczne i badania klimatyczne w systemie zintegrowanego monitoringu środowiska" oraz synteza uzyskanych wyników badań za okres 1994-1997. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski. IX Sympozjum ZMŚP, Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 113-119.

Lupa P., 2021: Ocena usług geoekosystemów. Sprawozdanie z realizacji I etapu umowy nr DM/13/2020/F pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w roku 2021". Poznań, maszynopis.

Łowicki D., Mizgajski A., 2013: Typology of physical-geographical regions in Poland in line with land-cover structure and its changes in the years 1990-2006. Geographia Polonica 86 (3): 255-266.

Macioszczyk A., 1987: Hydrogeochemia, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.

Majewski M., Kostrzewski A., 2019: Stan geoekosystemów Polski w roku 2018. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/Raport_2018.pdf

Majewski M., Kostrzewski A., 2020: Stan geoekosystemów Polski w roku 2019. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/Raport_2019.pdf

Majewski M., Kostrzewski A., 2021: Stan geoekosystemów Polski w roku 2020. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2021/11/Raport_2020.pdf

Major M., 2007: Stan geoekosystemów Polski w roku 2006. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2006.pdf

Major M., 2008: Stan geoekosystemów Polski w roku 2007. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2007.pdf

Major M., Chudzińska M., Kolendowicz L., Kruszyk R., Majewski M., Marciniak M., Półrolniczak M., Okońska M., Stefaniak M., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2021 roku. Poznań, maszynopis.

Manual for Integrated Monitoring, 1998: Finnish Environment Institute, ICP IM Programme Centre, Helsinki, Finland. www.syke.fi/nature/icpim > Manual for Integrated Monitoring, dostęp: 20.05.2020.

Mazurek M., 2000: Zmienność transportu materiału rozpuszczonego w zlewni Kłudy jako przejaw współczesnych procesów denudacji chemicznej (Pomorze Zachodnie). Wyd. Nauk. UAM, Poznań.

Mazurek M., Zwoliński Z., 2000: Funkcjonowanie wybranych geoekosystemów Polski w świetle pomiarów monitoringowych w roku hydrologicznym 1999. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_1999.pdf

Mazurek M., Zwoliński Z., 2001: Stan geoekosystemów Polski w roku 2000. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2000.pdf

Mazurek M., Zwoliński Z., 2002: Stan geoekosystemów Polski w roku 2001. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2001.pdf

Michalska G.M., Szpikowski J., 2000: Obieg wody w geoekosystemie zlewni górnej Parsęty w roku hydrologicznym 2005. [W:] Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów z uwzględnieniem lokalnych problemów ekologicznych. Ossolineum, Wrocław. Kom. Nauk. Prez. PAN „Człowiek i środowisko", Z. Nauk., 25: 87-104.

Miętus M., Wibig J., 2011: Klimat. Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo. Zmiany klimatu i ich wpływ na środowisko naturalne Polski oraz określenie ich skutków ekonomicznych. IMGW Warszawa-Gdynia-Kraków.

Mizgajski A., Stępniewska M., 2012: Ecosystem services assessment for Poland – challenges and possible solutions. Ekonomia i Środowisko 2 (42): 54-73.

Olszewski A., Andrzejewska A., Degórska A., Gutkowska A., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Kampinos w 2021 roku. Leszno k. Warszawy – Izabelin, maszynopis.

Rozporządzenie Ministra Środowiska 2002: Z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie kryteriów wyznaczania wód wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu ze źródeł rolniczych. Dziennik Ustaw Nr 241, poz. 2093.

Rozporządzenie Ministra Środowiska 2012: Z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dziennik Ustaw 2012, poz. 1031.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej 2019a: Z dnia 11 października 2019 r. sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych. Dziennik Ustaw 2019, poz. 2148.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej 2019b: Z dnia 11 października 2019 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. Dziennik Ustaw 2019, poz. 2149.

Rynkiewicz A., 2007: Problemy eutrofizacji wód w Polsce i ich ograniczanie w sposób naturalny. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Poznań.

Sapek A., 2009: Współczesne źródła chlorków w środowisku wód śródlądowych. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych nr 40: 455-464.

Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorczyk I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W., 2018: Physicogeographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. Geographia Polonica, 91 (2): 143-170.

Stach A., 2009: Analiza struktury przestrzennej i czasoprzestrzennej maksymalnych opadów dobowych w Polsce w latach 1956-1980. Wyd. Nauk, UAM, Poznań, 323.

Stachyra P, Gleń G., Maciejewski Z., Radliński B., Smoła M., Szpyra E., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Roztocze w 2021 roku. Zwierzyniec, maszynopis.

Szoszkiewicz K., Gebler D. 2012: Polska wersja systemu oceny stanu hydromorfologicznego rzek River Habitat Survey – nowe zastosowania w praktyce. Gospodarka Wodna 4: 141-146.

Szoszkiewicz K., Zbierska J., Jusik S., Zgoła T., 2010: Makrofitowa Metoda Oceny Rzek. Podręcznik metodyczny do oceny i klasyfikacji stanu ekologicznego wód płynących w oparciu o rośliny wodne. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.

Szpikowska G., 2004: Jakość i rola opadów atmosferycznych w systemie denudacyjnym zlewni młodoglacjalnej (Chwalimski Potok, górna Parsęta). [W:] M. Kejna, J. Uscka (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów w warunkach narastającej antropopresji, Bibl. Monit. Środ.: 167-176.

Szpikowska G., 2011: Uwarunkowania i zmienność chemizmu wód opadowych, podziemnych i powierzchniowych w zlewni Chwalimskiego Potoku (górna Parsęta). [W:] A. Kostrzewski, M. Samołyk (red.), Funkcjonowanie geoekosystemów w warunkach zmian użytkowania terenu i narastającej antropopresji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Vol. XXVIII, Biała Góra: 173-186.

Szpikowska G., Tylkowski J., 2006: Denudation balance of the Upper Parsęta catchment in the years 2000-2004. Quaestiones Geographicae 25A: 75-82.

Szpikowski J., 2011: Stan geoekosystemów Polski w roku 2010 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (z wykorzystaniem wybranych geoindykatorów). http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2010b.pdf

Szpikowski J., 2012: Stan geoekosystemów Polski w roku 2011 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (z wykorzystaniem wybranych geoindykatorów). http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2011.pdf

Szpikowski J., Borysiak J., Domańska M., Kostrzewski A., Kruszyk R., Majewski M., Szpikowska G., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Parsęta w 2021 roku. Storkowo, maszynopis.

Tokarska-Guzik B., Dajdok Z., Zając M., Zając A., Urbisz A., Danielewicz W., Hołdyński Cz., 2012: Rośliny obcego pochodzenia w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem gatunków inwazyjnych. GDOŚ Warszawa.

Tylkowski J., 2005: Sezony transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania rzek Pobrzeża Bałtyku. [W:] Plejstoceńskie i holoceńskie przemiany środowiska przyrodniczego Polski, K. Borówka (Red.), US, INoM, PTG, Szczecin: 58-62.

Tylkowski J., 2013: Stan geoekosystemów Polski w roku 2012 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (z wykorzystaniem wybranych geoindykatorów). http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2012.pdf

Tylkowski J., 2014: Stan geoekosystemów Polski w roku 2013 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2013.pdf

Tylkowski J., 2015a: Stan geoekosystemów Polski w roku 2014 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2014.pdf

Tylkowski J., 2015b: The variability of climatic vegetative seasons and thermal resources at the Polish Baltic Sea coastline in the context of potential composition of coastal forest communities. Baltic Forestry 21 (1): 73-82

Tylkowski J., 2016: Stan geoekosystemów Polski w roku 2015 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2015.pdf

Tylkowski J., Czyryca P., Winowski M., 2022: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Wolin w 2021 roku. Biała Góra, maszynopis.

Tylkowski J., Kostrzewski A., 2017: Stan geoekosystemów Polski w roku 2016 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://centrumzmsp.home.amu .edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2016.pdf

Tylkowski J., Kostrzewski A., 2018: Stan geoekosystemów Polski w roku 2016 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://centrumzmsp.home.amu. edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_2017.pdf

Withers P.J.A., Neal C., Jarvie H., Doody D.G., 2014: Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here?, Sustainability, 6(9): 5853-5875.

Zajączkowski G., 2021. Stan zdrowotny lasów w Polsce w 2020 roku na podstawie badań monitoringowych, Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi, Sękocin Stary.

Zwoliński Z., 1997: Stan geoekosystemów Polski w roku hydrologicznym 1996. http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2020/11/raport_1996.pdf

Zwoliński Z., 1998: Geoindykatory w badaniach współczesnej dynamiki geoekosystemów. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego, Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski. Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 163-167.

http://siedliska.gios.gov.pl/pl/monitoring/metodyka

Spis rycin

Ryc. 1. Lokalizacja Stacji ZMŚP w strefach krajobrazowych Polski (Kostrzewski i in. 2014 zmienione) 10

Ryc. 2. Lokalizacja Stacji Bazowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w makroregionach fizycznogeograficznych Polski, (Kondracki 2000, zmienione) 11

Ryc. 3. Lokalizacja Stacji Bazowych ZMŚP w Parkach Narodowych Polski 17

Ryc. 4. Lokalizacja zlewni badawczych ZMŚP na tle Obszarów Natura 2000 w Polsce 18

Ryc. 5. Położenie zlewni Stacji Bazowych ZMŚP w zasięgu Obszarów Natura 2000 22

Ryc. 6. Średnie roczne temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia 35

Ryc. 7. Istotne statystycznie trendy wzrostu temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP – Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry i Beskid Niski 36

Ryc. 8. Sumy roczne opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia 37

Ryc. 9. Przebieg miesięczny temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku na tle wielolecia 40

Ryc. 10. Przebieg zmian liczby dni gorących (Tmax>25°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP 42

Ryc. 11. Przebieg zmian liczby dni upalnych (Tmax>30°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP 42

Ryc. 12. Przebieg zmian liczby dni mroźnych (Tśr<0°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP 43

Ryc. 13. Przebieg zmian liczby dni bardzo mroźnych (Tmin< -10°C) w latach 1994-2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP 43

Ryc. 14. Zmienność czasowa współczynników miesięcznych przepływu w roku hydrologicznym 2021 na tle zmienności czasowej wartości współczynników miesięcznych przepływu z wielolecia 61

Ryc. 15. Klasyfikacja pH i SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku (dla opadu całkowitego) 66

Ryc. 16. Zmienność czasowa SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia 67

Ryc. 17. Istotne statystycznie trendy spadku SEC w opadach atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP – Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos 68

Ryc. 18. Zmienność czasowa kwasowości opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym na tle wielolecia 69

Ryc. 19. Istotne statystycznie trendy wzrostu odczynu (spadku zakwaszenia) opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP – Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Kampinos i Beskid Niski 70

Ryc. 20. Zmiany wskaźnika czynników kwasogennych w zakwaszaniu wód opadowych w Stacjach Bazowych ZMŚP w wieloleciu 1994-2021 72

Ryc. 21. Deficyt odpływu wody i bilans substancji rozpuszczonych w zlewniach ZMŚP w latach 2015-2021. S – deficyt odpływu, B – bilans substancji rozpuszczonych 89

Ryc. 22. Przebieg termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku 92

Ryc. 23. Czas trwania termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku 93

Ryc. 24. Zmienność czasu trwania okresu wegetacyjnego w Stacjach Bazowych ZMŚP dysponujących ponad 5-letnim okresem pomiarowym 96

Ryc. 25. Średnie roczne stężenia NO2 w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2021 98

Ryc. 26. Średnie roczne stężenia SO2 w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2021 98

Ryc. 27. Średnie miesięczne stężenia NO2 w 2021 roku w zlewniach badawczych ZMŚP 99

Ryc. 28. Średnie miesięczne stężenia SO2 w 2021 roku w zlewniach badawczych ZMŚP 99

Spis tabel

Tab. 1. Charakterystyka położenia zlewni eksperymentalnych ZMŚP w strefach krajobrazowych i dominującej formy pokrycia terenu (Kostrzewski i in. 2014, zmienione) 10

Tab. 2. Charakterystyka fizycznogeograficzna zlewni eksperymentalnych ZMŚP 12

Tab. 3. Podstawowy program pomiarowy realizowany przez Stacje Bazowe ZMŚP w 2021 r. 24

Tab. 4. Programy badawczo-pomiarowe ZMŚP zrealizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP przez Ekspertów ZMŚP w 2021 roku 24

Tab. 5. Zakres programów i parametrów pomiarowych ZMŚP wykonanych w Stacjach Bazowych w 2021 roku 25

Tab. 6. Programy specjalistyczne realizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku 32

Tab. 7. Średnia temperatura powietrza i suma opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku 34

Tab. 8. Liczba dni charakterystycznych temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 roku 45

Tab. 9. Klasyfikacja opadowa dla roku (Kaczorowska 1962, zmienione) 46

Tab. 10. Roczna klasyfikacja opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP 47

Tab. 11. Klasyfikacja termiczna roku wg Lorenc (1998) 48

Tab. 12. Roczna klasyfikacja termiczna dla Stacji Bazowych ZMŚP 49

Tab. 13. Klasyfikacja termiczno-opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2021 roku 50

Tab. 14. Wartości maksymalne i minimalne temperatur w roku hydrologicznym 2021 w Stacjach Bazowych ZMŚP 50

Tab. 15. Wskaźnik miesięcznych zmian retencji RM dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym 53

Tab. 16. Wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną kn dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym 55

Tab. 17. Miesięczne średnie wartości współczynnika odpływu [-] i odpływu jednostkowego oraz ekstremalne dobowe odpływy jednostkowe [dm-3·s-1·km-2] w 2021 roku hydrologicznym w Stacjach Bazowych ZMŚP 56

Tab. 18. Miesięczne wysokości warstwy opadu i odpływu [mm] oraz skróconego bilansu wodnego [mm] w 2021 roku hydrologicznym w zlewniach ZMŚP 63

Tab. 19. Klasyfikacja przewodności elektrolitycznej wód opadowych (wg Jansena i in. 1988) 65

Tab. 20. Klasyfikacja odczynu wód opadowych (wg Jansena i in. 1988) 65

Tab. 21. Średnie stężenie substancji rozpuszczonych w wodach opadowych w zlewniach ZMŚP w 2021 roku 74

Tab. 22. Klasy jakości wody i stan chemiczny wód podziemnych w zlewniach ZMŚP w 2021 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych 76

Tab. 23. Średnie stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych w zlewniach ZMŚP w 2021 roku 79

Tab. 24. Jakość wód płynących w 2021 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b) 82

Tab. 25. Jakość wód stojących w 2021 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b) 82

Tab. 26. Wskaźniki eutrofizacji rzek w Stacjach ZMŚP w 2021 roku 84

Tab. 27. Wskaźniki eutrofizacji jezior w Stacjach ZMŚP w 2021 roku 84

Tab. 28. Bilans jonów denudacyjnych i biogenicznych w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku 87

Tab. 29. Sezon wegetacyjny w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku 94

Tab. 30. Zanieczyszczenie powietrza – średnie roczne stężenie SO2 i NO2 [µg·m-3] w zlewniach badawczych ZMŚP w 2021 roku 97

Tab. 31. Średnia defoliacja w zlewniach ZMŚP w 2021 roku hydrologicznym 100

Tab. 32. Występowanie roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia w zlewniach ZMŚP w latach 2016-2021 roku 102

Tab. 33. Wartości wskaźnika MIR, RHS i stan geoekologiczny koryt rzecznych w zlewniach ZMŚP (2021) 104

Tab. 34. Potencjał środowiskowy w zlewniach ZMŚP na podstawie programu oceny usług geoekosystemów (2021) 107

Tab. 35. Stan geoekologiczny zlewni badawczych ZMŚP w 2021 roku (na podstawie programów o rocznym i trzyletnim interwale czasowym) 109