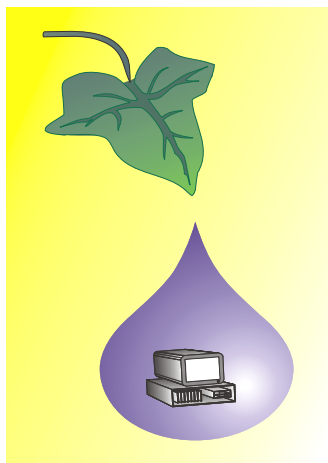




Dofinansowano ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej

Sprawozdanie z realizacji VI etapu umowy nr 19/2018/F
pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
- nadzór merytoryczny oraz prowadzenie badań w latach 2018 – 2020”,
zawartej pomiędzy
Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska w Warszawie
a
Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Zadanie nr 2
Stan geoekosystemów Polski w 2020 roku

Poznań
2021

Mikołaj Majewski

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Pracownia 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 2020 roku
na podstawie badań
Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Poznań 2021

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	4
2. ZLEWNIE BADAWCZE ZMŚP	9
3. ZLEWNIE BADAWCZE ZMŚP A OBSZARY SZCZEGÓLNICIE 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	34
5.1. Warunki pogodowe	34
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	76
6.3. Wody powierzchniowe	78
6.4. Bilans jonów denudacyjnych i biogennych	85
7. WPŁYW UWARUNKOWAŃ ABIOTYCZNYCH NA PRZYRODĘ OŻYWIONĄ W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP	91
7.1. Termiczne pory roku	91
7.2. Sezon wegetacyjny	95
7.3. Zanieczyszczenie powietrza	98
7.4. Uszkodzenia drzew i drzewostanów	100
7.5. Roślinne gatunki inwazyjne obcego pochodzenia	102
7.6. Hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych	103
8. STAN GEOEKOLOGICZNY I POTENCJAŁ ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO W EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMACH ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH ZMŚP	107
8.1. Potencjał środowiska przyrodniczego w oparciu o ocenę usług geoekosystemów	107
8.2. Stan geoekologiczny	110
9. MODELOWANIE ZMIAN BILANSU WODNEGO I BIOGEOCHEMICZNEGO EKSPERYMENTALNYCH ZLEWNI ZMŚP	114
10. PODSUMOWANIE STANU EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMÓW ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH POLSKI W 2020 ROKU	121
11. LITERATURA	129
Spis rycin	134
Spis tabel	135

1. WPROWADZENIE

Opracowanie zostało wykonane zgodnie z umową 19/2018/F pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie badań w latach 2018-2020” (zwana dalej umową ZMŚP). Umowa została zawarta 29 czerwca 2018 roku pomiędzy Głównym Inspektorem Ochrony Środowiska w Warszawie a Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu i jest sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Przedmiotowe opracowanie wykonano w ramach zadania 2 pt. „Opracowanie corocznych sprawozdań o stanie geoekosystemów Polski”. W pracy przedstawiono stan geoekosystemów Polski w 2020 roku hydrologicznym, z odniesieniem do wieloletniego (1994-2019) okresu badań w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP). Takie podejście badawcze umożliwia określenie skali przemian środowiska przyrodniczego monitorowanych eksperymentalnych geoekosystemów zlewni rzecznych i jeziornych, w powiązaniu z obserwowanymi zmianami klimatu i różnymi przejawami antropopresji.

Program badawczo-pomiarowy ZMŚP w 2020 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 2020 rok hydrologiczny (od 1 listopada 2019 roku do 31 października 2020 roku), w których analizowano funkcjonowanie geoekosystemów (zlewni) eksperymentalnych, uznanych za reprezentatywne w wybranych strefach krajobrazowych Polski (tj. Degórska i in. 2021, Jóźwiak i in. 2021, Kejna i in. 2021, Kijowska-Strugała i in. 2021, Krakowski i in. 2021, Krzysztofiak i in. 2021, Major i in. 2021, Olszewski, Andrzejewska 2021, Stachyra i in. 2021, Szpikowski i in. 2021, Tylkowski i in. 2021). W opracowaniu wykorzystano także dane zgromadzone w Centralnej Bazie Danych ZMŚP za lata hydrologiczne 1994-2020. 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 stanu aktualnego i tendencji rozwoju monitorowanych geoeosystemów, 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). 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 geoeosystemów 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. 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 geoeosystemów 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 geoeosystemu, które spełniają rolę biowskaźników stanu i tendencji rozwoju środowiska.

Program ZMŚP merytorycznie nawiązuje do 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 sieć badawczo-pomiarowa monitoringu geoekosystemów ZMŚP na terenie Polski należy do ww. programu europejskiego.

Podstawowym celem niniejszego opracowania jest syntetyczne przedstawienie informacji o stanie środowiska przyrodniczego oraz tendencjach przemian i rozwoju wybranych geoekosystemów Polski w 2020 roku na tle wielolecia 1994-2019. 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. porosty, makrofity.

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, 2015, 2016; Tylkowski, Kostrzewski 2017, 2018; Majewski, Kostrzewski 2019, 2020). 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 rzecznej, występowania susz oraz opadów rozlewnych i nawałnych, 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. Od klimatycznego bilansu wodnego zależy 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, 2015, 2016; Tylkowski, Kostrzewski 2017, 2018; Majewski, Kostrzewski 2019, 2020). 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 2020 rok, będący przedmiotem niniejszego opracowania, podobnie jak sprawozdania za lata 2011-2019 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 w ostatnim dwudziestopięcioleciu, ze szczególnym uwzględnieniem zdarzeń ekstremalnych, np. w 2020 roku. 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 informacji i danych ZMŚP pozwala na aktualną ocenę stanu środowiska oraz na predykcję jego rozwoju. Centralna Baza Danych ZMŚP zawiera ponad 1,5 mln rekordów przedstawiających rzeczywiste, terenowe dane z okresu 1994-2020. 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. Szczegółowe informacje o programie ZMŚP znajdują się na stronie internetowej <http://zmstp.gios.gov.pl>. Przedstawione założenia o charakterze metodologicznym i metodycznym stanowią podstawę prezentacji wyników realizowanego programu ZMŚP w 2020 roku.

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 testowe powierzchnie i profile badawcze oraz stanowiska pomiarowe. W 2020 roku komplementarne badania terenowe i analitykę laboratoryjną prowadzono wg standaryzowanych metod w 11 Stacjach Bazowych ZMŚP (Ryc. 1, Ryc. 2, Tab. 1, Tab. 2).

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).

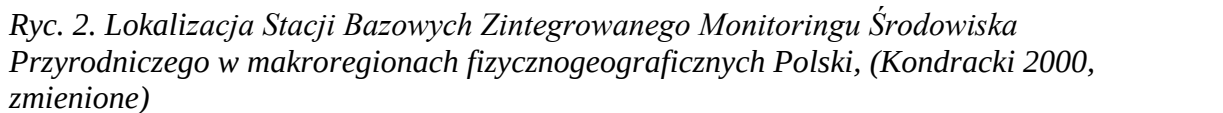
Pod względem dominujących form pokrycia terenu w zlewniach ZMŚP występuje duże zróżnicowanie (Tab. 1). Najmniej przekształcone przez człowieka formy pokrycia terenu występują na terenie parków narodowych w zlewni Świerszcza i Wrzosówki (leśne) i jeziora Gardno (leśne i średnio nienaturalne). Nienaturalny i średnio zalesiony typ pokrycia terenu występuje w zlewni Kanalu 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	jeziorno Gardno	Morze Bałtyckie	leśna i średnio nienaturalna	2010
Parsęta	górna Parsęta	Pojezierza	zróźnicowana	1994
Puszcza Borecka	jeziorno Łękuk	Pojezierza	zróźnicowana	1994
Wigry	Czarna Hańcza	Pojezierza	rolnicza	1994
Pojezierze Chełmińskie	Struga Toruńska	Pojezierza	rolnicza	1994
Poznań-Morasko	Różany Strumień	Pojezierza	zróźnicowana	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



WOLIN – Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań; PARSETA – 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 Elckie	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 równomiernie ujmują równoleżnikowy układ głównych stref krajobrazowych Polski:

1. Transekt zachodni: strefa młodogłacialna Niżu Polskiego (Stacje Bazowe: Wolin, Parsęta, Poznań-Morasko), strefa górską (Stacja Bazowa Karkonosze).
2. Transekt środkowy: strefa młodogłacialna Niżu Polskiego (Stacja Bazowa Pojezierze Chełmińskie), strefa starogłacialna Niżu Polskiego (Stacja Bazowa Kampinos), strefa wyżynna (Stacja Bazowa Łysogóry), strefa górską (Stacja Bazowa Beskid Niski).
3. Transekt wschodni: strefa młodogłacialna 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 Nizy 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 i Pojezierze Chełmińskie.
3. Kolejny transekt równoleżnikowy, w zasięgu strefy gór i wyżyn, obejmuje Stacje: Karkonosze, Łysogóry i Roztocze.

W strefie wybrzeża i młodoglacjalnej Nizy 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 geokosystem 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. 2021).

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 ograniczonym stopniu wpływają na funkcjonowanie środowiska przyrodniczego. Można ją uznać za reprezentatywną dla obszarów młodoglacjalnych umiarkowanej strefy klimatycznej (Szpikowski i in. 2021).

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, a badania jakości powietrza i wód docierających do podłoża zlewni 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. 2021).

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. 2021).

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. 2021).

Krajobraz starogłacjalny Polski centralnej reprezentowany jest przez zlewnię Kanału Olszowieckiego (Stacja Bazowa Kampinos), położoną w obrębie Puszczy Kampinoskiej, gdzie dominuje geoekosystem bagienno-łukowy 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, Andrzejewska 2021).

Stacja Bazowa Łysogóry obejmuje badania 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 (Józwiak i in. 2021).

Stacja Bazowa Roztocze realizuje badania w wyżynnej zlewni śródlęsnego ciekłu – 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. 2021).

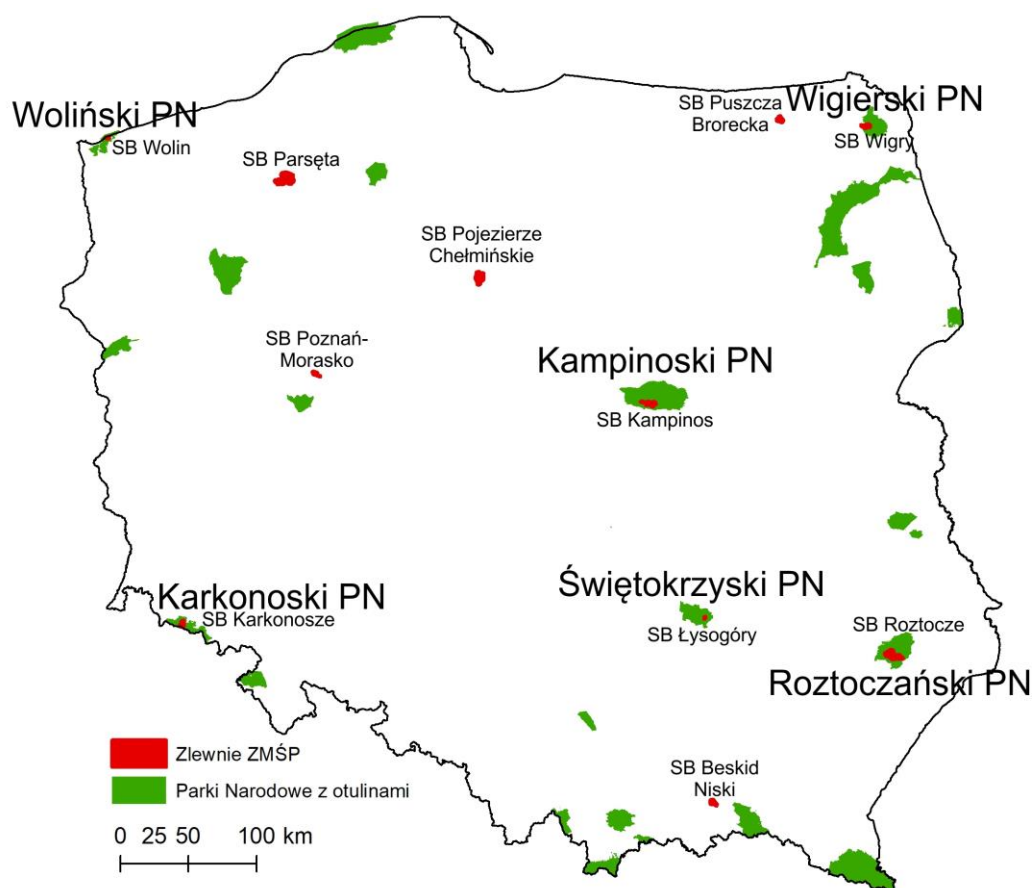
Stacja Bazowa Beskid Niski, zlokalizowana w zlewni Bystrzanki, reprezentuje geoekosystem części Karpat Fliszowych, który w coraz mniejszym stopniu narażony jest na

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. 2021).

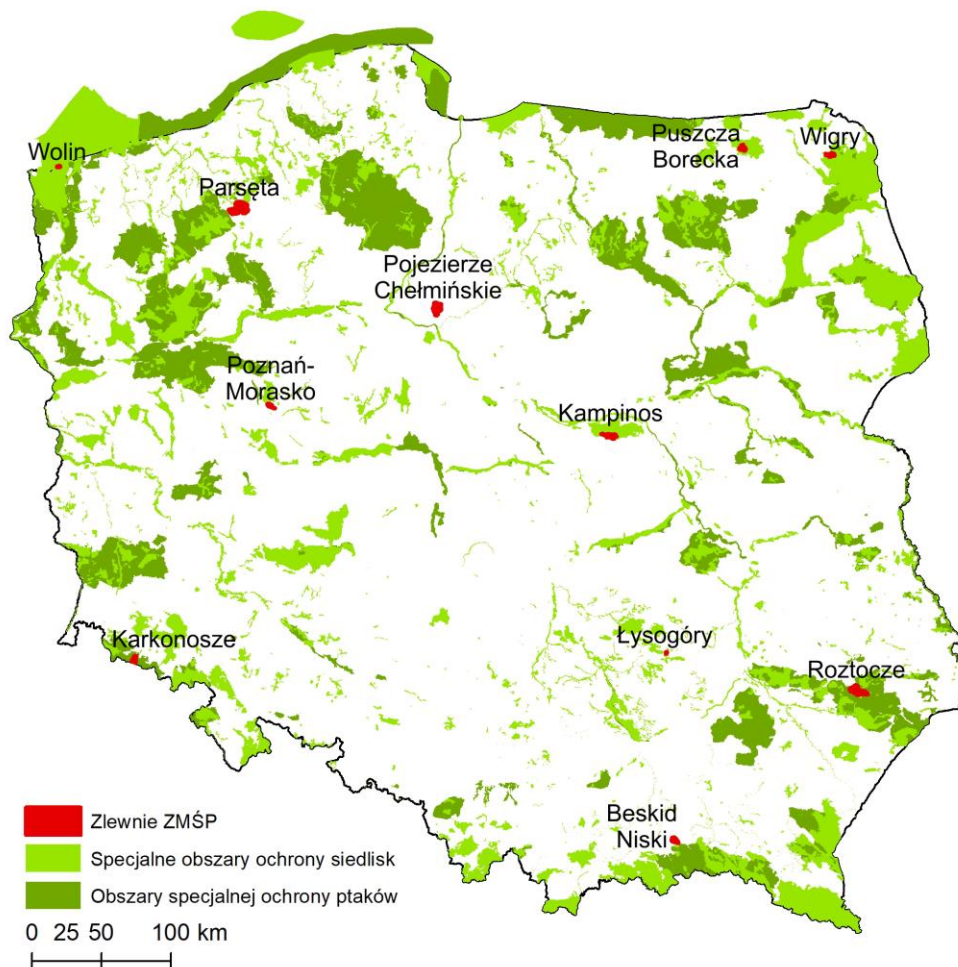
Stacja Bazowa Karkonosze położona w zlewni Wrzosówki reprezentuje krajobraz gór średnich. W zlewni występuje duża różnorodność ekosystemów, siedlisk i zbiorowisk roślinnych, charakteryzujących się typową dla obszarów górskich piętrowością. Piętro regla dolnego porośnięte jest lasami o strukturze siedliskowej 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. 2021).

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

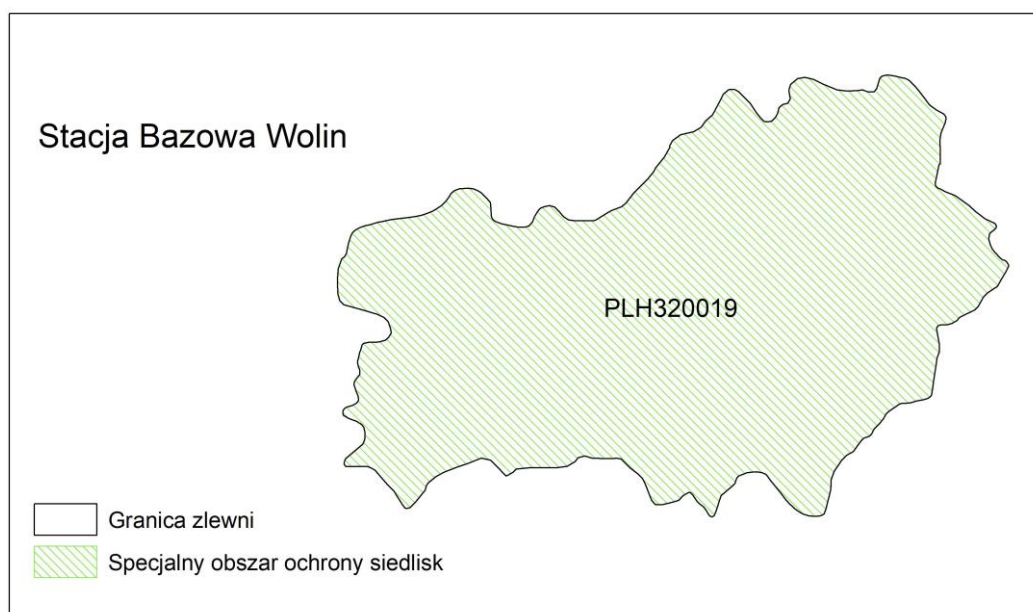


Ryc. 4. Lokalizacja zlewni badawczych ZMŚP na tle Obszarów Natura 2000 w Polsce

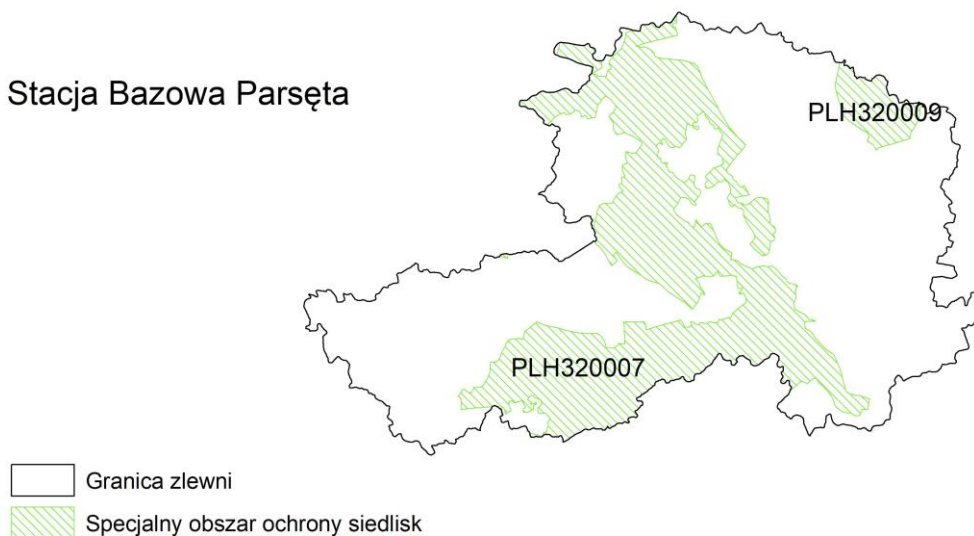
Spośród jedenastu Stacji Bazowych ZMŚP aż dziewięć jest położonych całkowicie albo częściowo na obszarach Natura 2000. Jedynie zlewnie Strugi Toruńskiej i Różanego Strumienia są położone poza granicami obszarów Natura 2000:

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).

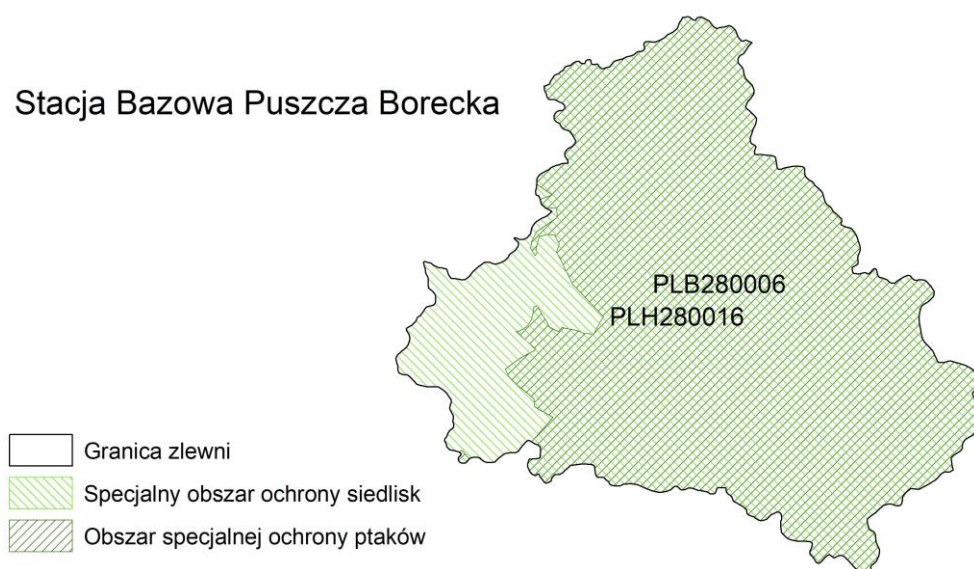
4. Zlewnia Czarnej Hańczy, objęta monitoringiem Stacji Bazowej Wigry, wchodzi w około 80% w skład obszaru Natura 2000 *Ostoja Wigierska (PLH200004)* (Ryc. 5). Ponadto ok. 65% powierzchni zlewni znajduje się w Wigierskim Parku Narodowym.
5. Zlewnia Kanału Olszowieckiego (Stacja Bazowa Kampinos) w około 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 PLH180052*.



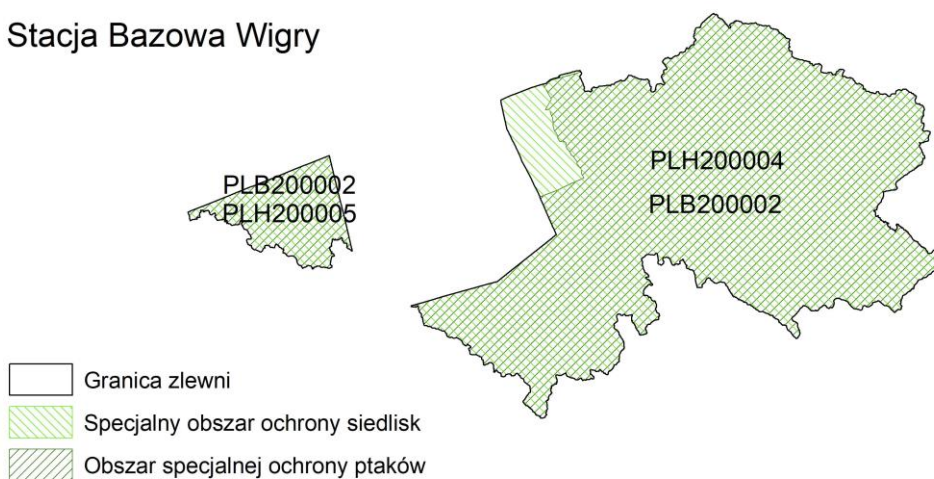
Stacja Bazowa Parsęta



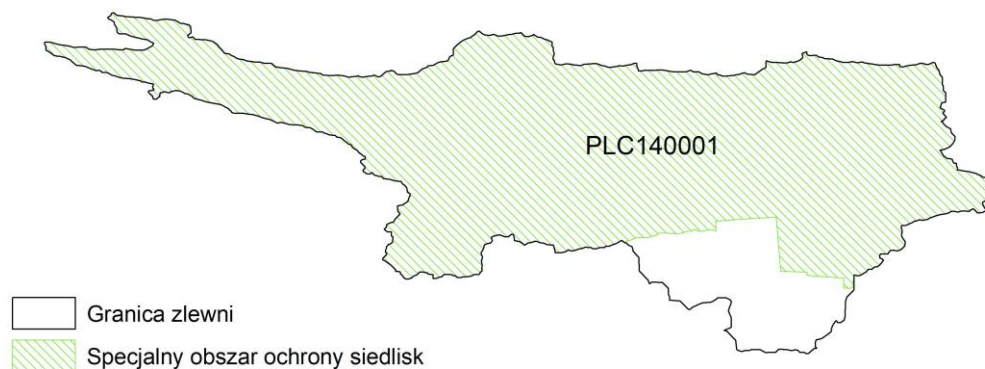
Stacja Bazowa Puszcza Borecka



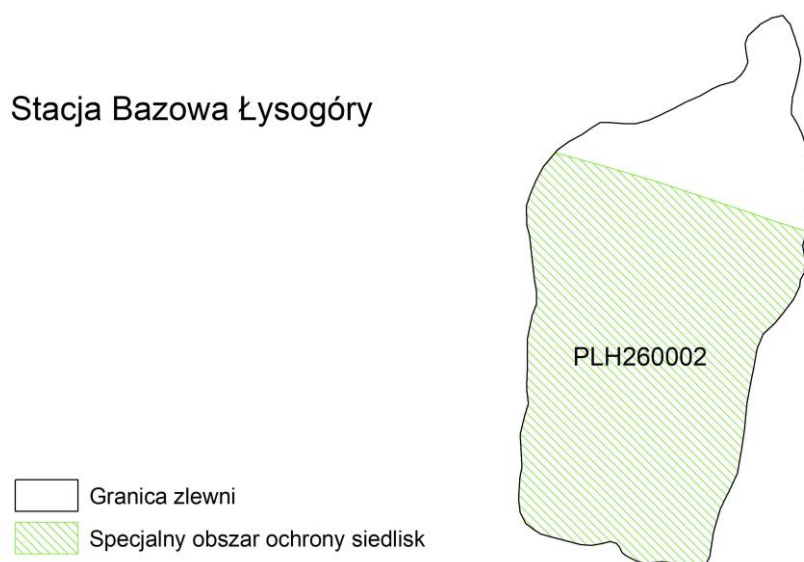
Stacja Bazowa Wigry



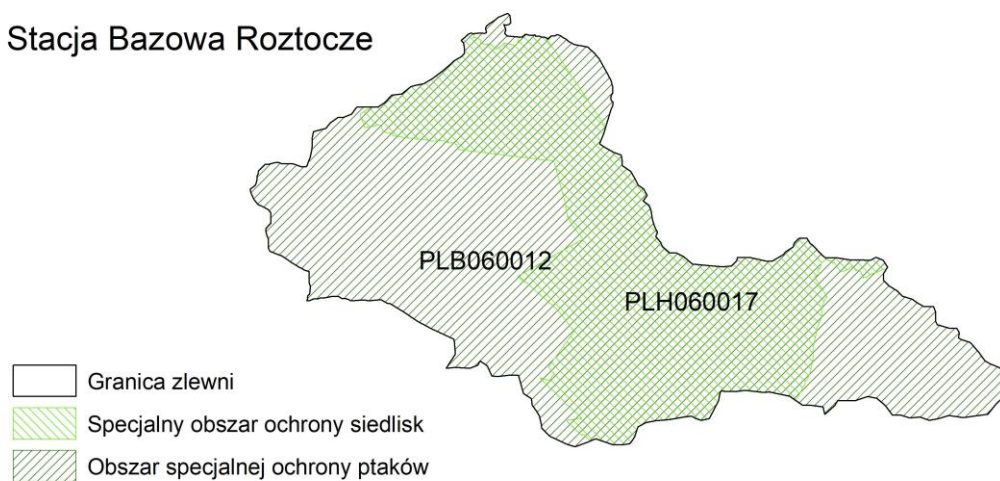
Stacja Bazowa Kampinos

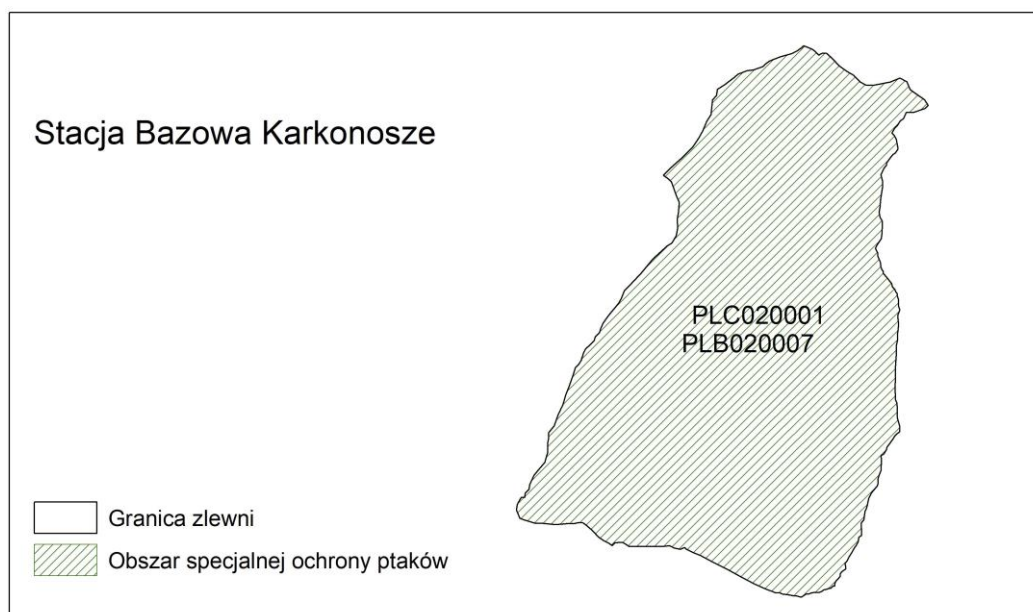


Stacja Bazowa Łysogóry



Stacja Bazowa Roztocze





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 utrzymanie ich właściwego stanu ochrony zależy od zbadania dynamiki procesów i zjawisk zachodzących naturalnie i warunkowanych antropogenicznie, od których zależy struktura i funkcjonowanie siedlisk Natura 2000. 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: wietrzna (deflacja, akumulacja), wodna (powierzchniowa, liniowa) i wodno-grawitacyjna (osuwiska, obrywy, osiadania, spęływania, 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 2020 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. Program chemizm spływu po pniach C3 wykonywany był jedynie na powierzchniach badawczych z dominacją drzewostanu liściastego, tzn. przez Stacje ZMŚP: Wolin, Puszcza Borecka, Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze. Program wody powierzchniowe jeziora H2 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 ciekłu nie wykonywano programu H1 wody powierzchniowe rzeki.

W 2020 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 program Metale ciężkie i siarka w porostach D1, który jest realizowany co 2 lata (zadanie 6. umowy ZMŚP – dr hab. Małgorzata Jóźwiak, Europejski Instytut Kształcenia Podyplomowego, Kielce). Program Gleby E1, realizowany raz na 10 lat w danej zlewni, wykonano w Stacji Poznań-Morasko (zadanie 7. umowy ZMŚP – prof. dr hab. Jolanta Komisarek, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu). W trzech Stacjach ZMŚP: Poznań-Morasko, Beskid Niski i Karkonosze wykonano Program I1 Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznej, 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 prof. UAM dr hab. Małgorzata Stępniewska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu) zrealizowano w trzech Stacjach Bazowych: Łysogóry, Roztocze i Beskid Niski

Tab. 4).

Tab. 3. Podstawowy program pomiarowy realizowany przez Stacje Bazowe ZMŚP w 2020 roku

Program pomiarowy	Wolin	Parsęta	Puszczyna Borecka	Wigry	Pojezierz Chelmiński	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											
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											
Epifity nadrzewne M1											
	zrealizowany przez Stacje					nierealizowany – brak w zlewni danego komponentu środowiska geograficznego					
	zrealizowany we współpracy z jednostkami zewnętrznymi					niezrealizowany – awaria, brak sprzętu, lub inne przyczyny					

Tab. 4. Programy badawczo-pomiarowe ZMŚP zrealizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP przez Ekspertów ZMŚP w 2020 roku

Program pomiarowy	Wolin	Parsęta	Puszczyna Borecka	Wigry	Pojezierz Chelmiński	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Metale ciężkie i siarka w porostach D1											
Gleby E1											
Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzeczno I1											
Ocena usług geoeosystemów											

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

W tabeli 5. przedstawiono programy i parametry pomiarowe zrealizowane w 2020 roku przez Stacje ZMŚP, zarówno w ramach zakresu obligatoryjnego jak i rozszerzonego. Zrealizowano 13 programów ZMŚP, wśród których badano 132 parametry podstawowe i 72 parametry rozszerzone.

Tab. 5. Zakres programów i parametrów pomiarowych ZMŚP wykonanych w Stacjach Bazowych w 2020 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 dobową	Wszystkie stacje
	temperatura powietrza na 2 m	TA_D	pomiar ciągły/średnia dobową	
	minimalna temperatura powietrza na 2 m	TA_N	pomiar ciągły/minimalna dobową	
	maksymalna temperatura powietrza na 2 m	TA_X	pomiar ciągły/maksymalna dobową	
	temperatura minimalna powietrza przy powierzchni gruntu (na 5 cm nad gruntem)	TA_G	pomiar ciągły/minimalna dobową	
	temperatura gruntu na głębokościach 5, 20 i 50 cm	T_S	pomiar ciągły/średnia dobową	
	wilgotność względna powietrza na 2 m	HH	pomiar ciągły/średnia dobową	
	wysokość opadów na 1 m	RR_T	1/dobę/suma	
	rodzaj opadów		1/dobę	
	prędkość wiatru na 10 m	WIV	pomiar ciągły/średnia dobową	
	kierunek wiatru na 10 m	WID	pomiar ciągły/wartość modalna	
	grubość pokrywy śnieżnej	SC_H	1/dobę	
	uśłonecznienie	SOL_P	pomiar ciągły/suma dobową	
	natężenie promieniowania całkowitego – suma dobową	SOL_T_S	pomiar ciągły/suma dobową ze średnich godzinnych	
	Zakres rozszerzony			

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	czas trwania opadów	RR_P	rejestracja ciągła	Puszcza Borecka
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		Puszcza Borecka
	ozon O3	O3		
	azot azotanowy [HNO ₃ (g)+NO ₃ (a)]	NO3N_T		
	azot amonowy [NH ₃ (g)+NH ₄ (a)]	NH4N_T		
	dwutlenek węgla CO ₂	CO2		
	siarka siarczanowa S-SO ₄	SO4S		
	pył zawieszony	PM10		
	CHEMIZM OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH C1	Zakres obligatoryjny		
przewodność elektrolityczna właściwa		COND	12/rok z próbek dobowych lub tygodniowych	Wszystkie stacje
odczyn (pH)		PH		
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			

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	glin Al	AL		Puszcza Borecka, Łysogóry
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		
	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	Obligatoryjnie tylko dla drzewostanu liściastego. Wykonano: Wolin, Puszcza Borecka, Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND	12/rok z próbek tygodniowych	
	odczyn (pH)	PH		
	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		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	glin Al	AL		
CHEMIZM ROZTWORÓW GLEBOWYCH F1	Zakres obligatoryjny			
	przewodność elektrolityczna właściwa	COND	1/miesiąc	Wszystkie stacje
	odczyn (pH)	PH		
	wodorowęglany (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, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski, 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/miesiąc lub 1/kwartał	
	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		
	BZT ₅	BZT5		

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	tlen rozpuszczony	O2		
WODY PODZIEMNE F2	Zakres rozszerzony			
	glin Al	AL	1/kwartał	Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Karkonosze
	krzemionka SiO2	SIO2		Parsęta, Puszcza Borecka
	mangan Mn	MN		Puszcza Borecka, Łysogóry
	żelazo Fe	FE		Puszcza Borecka
	rozpuszczony węgiel organiczny RWO	DOC		
	kadm Cd	CD		
	miedź Cu	CU		
	ołów Pb	PB		
	cynk Zn	ZN		
	nikiel Ni	NI		
	arsen As	AS		
	chrom Cr	CR		
	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, Łysogóry, Roztocze
magnez Mg		MG		
sód Na		NA		
mangan Mn		MN		Puszcza Borecka
cynk Zn		ZN		
bor B	B			
miedź Cu	CU			
molibden Mo	MO			
ołów Pb	PB			

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	kadm Cd	CD		
WODY POWIERCHNIOWE RZEKI H1	Zakres obligatoryjny			
	poziom wody	WL	ciągła rejestracja	Wszystkie stacje – oprócz Puszczy Boreckiej (brak ciekusu)
	zjawiska lodowe		obserwacja	
	zarastanie koryta			
	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			
	krzemionka SiO ₂	SIO2	1/miesiąc	Parsęta
	fosfor fosforanowy P-PO ₄	PO4P		
	glin Al	AL		Wolin, Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry, Roztocze, Karkonosze
	mangan Mn	MN		Parsęta, Łysogóry

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	żelazo Fe	FE		
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	
	wodorowęglany (jeżeli pH > 4,5)	HCO3		
	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		
	fosfor ogólny P _{ogól.}	PTOT		
	fosfor fosforanowy PO ₄ P	PO4P		
	tlen rozpuszczony O ₂	O2D		
	BZT ₅	BZT5		
	Zakres rozszerzony			
	glin Al.	AL	1/kwartał	Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie
	krzemionka SiO ₂	SIO2		Parsęta, Puszcza Borecka
	mangan Mn	MN		
	żelazo Fe	FE		
	fosfor fosforanowy PO ₄ P	PO4P		Puszcza Borecka
	rozpuszczony węgiel organiczny RWO	DOC		
	kadm Cd	CD		
	miedź Cu	CU		
ołów Pb	PB			
cynk Zn	ZN			
nikiel Ni	NI			

Program	Parametr	Kod parametru	Częstotliwość pomiarów/ czas uśredniania	Status Uwagi
	arsen As	AS		
GATUNKI INWAZYJNE OBCEGO POCHODZENIA – ROŚLINY J3	Zakres obligatoryjny			
	liczba gatunków inwazyjnych (zlewnia)	NSPEC_I_DB	Co roku, przez cały sezon wegetacyjny	Wszystkie stacje
	liczba kwadratów MGRS	NUM_MGRS_DB		
	liczba gatunków inwazyjnych	NSPEC_I_P1	1/2 lata	
	liczebność pędów juvenilnych	JUVE_TS_P1		
	liczebność pędów dorosłych według gatunków drzew i krzewów	ADULT_TS_P10		
	liczebność pędów generatywnych według gatunków zielnych	GENE_H_P1		
	liczebność pędów wegetatywnych według gatunków zielnych	VEGE_H_P1		
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	
EPIFITY NADRZEWNE M1	Zakres obligatoryjny			
	powierzchnia plechy	AREA_L	1/rok	Wszystkie stacje
	zdrowotność plechy	HEALTH_L		
	liczba porostów krzaczkowatych na pniu	NUM_LK		
	powierzchnia nekroz	AREA_NEC		
	powierzchnia chloroz	AREA_CHL		

Poza programem badawczo-pomiarowym ZMŚP, Stacje Bazowe realizowały w 2020 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 2020 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 Monitorowanie stanu liczebnego populacji lęgowych dymówki <i>Hirundo Rustica L.</i> i oknówki <i>Delichon Urbica (L.)</i>
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
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 2020 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 7,3°C w Puszczy Boreckiej. W powyższym transekcie równoleżnikowym bardzo dobrze zaznacza się wpływ oceanizmu (Stacje Wolin i Parsęta) oraz kontynentalizmu (Stacja Puszcza Borecka), 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. Średnia roczna suma opadów w Polsce północnej wynosiła od 590,9 mm w Wigrach do 697,2 mm w Parsęcie. Stwierdzono natomiast wyraźne zmniejszenie się ilości opadów w transekcie południkowym Niżu Polskiego np. od Stacji Bazowej Puszcza Borecka (689,2 mm) do Stacji Bazowej Kampinos (570,3 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 868,9 mm, czy Stacja Karkonosze 1004,5 mm).

Poza czynnikami kontynentalno-oceanicznymi na warunki termiczne i opadowe w zlewniach ZMŚP wpływają czynniki lokalne, związane m.in. z rzeźną 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).

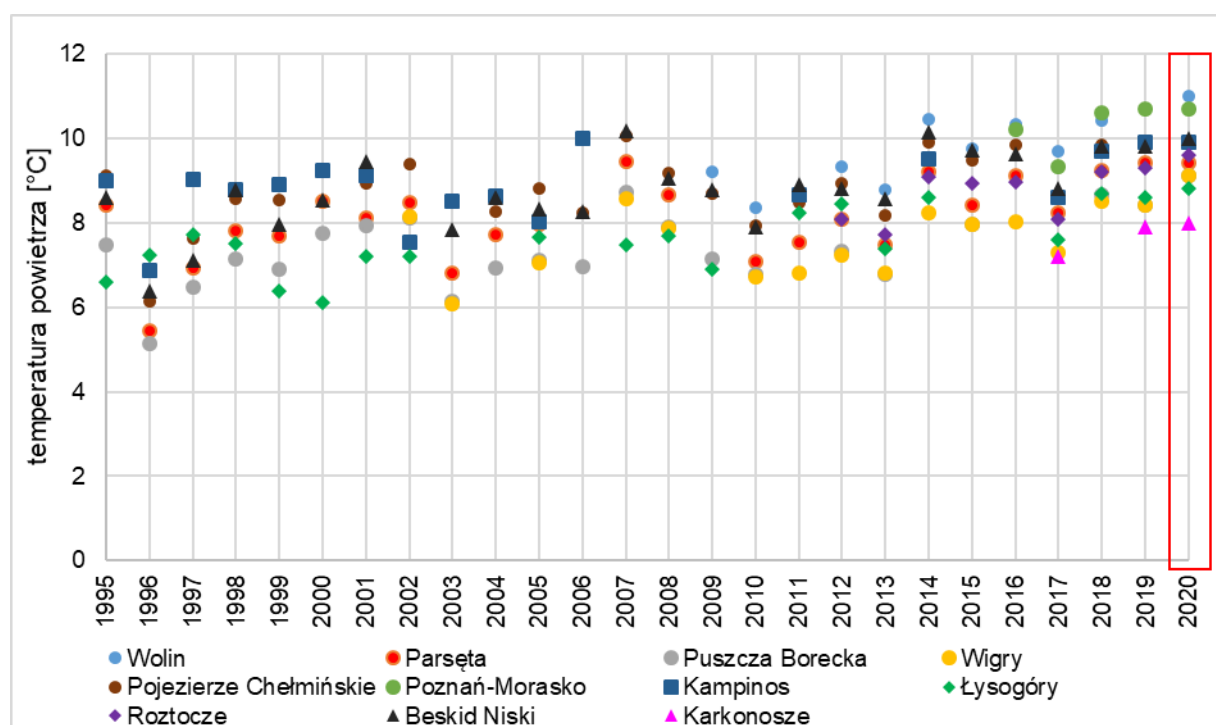
Tab. 7. Średnia temperatura powietrza i suma opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku

Stacja Bazowa ZMŚP (Okres pomiarowy - wielolecie)	Średnia temperatura powietrza [°C]		Suma opadów atmosferycznych [mm]	
	2020 r.	wielolecie	2020 r.	wielolecie
Wolin (2009-2019)	11,0	9,6	477,5	588,7
Parzęta (1987-2019)	9,4	8,0	615,6	697,2
Puszcza Borecka (1994-2019)	9,1	7,3	616,1	689,2
Wigry (2002-2019)	9,1	8,2	517,2	590,9
Pojezierze Chełmińskie (1994-2019)	9,9	8,7	583,1	543,1
Poznań-Morasko (2016-2019)	10,7	8,8	592,8	522,6
Kampinos (1994-2019)	9,9	8,5	707,2	570,3
Łysogóry (2005-2019)	8,8	7,3	811,6	731,0
Roztocze (2012-2019)	9,6	8,6	737,4	648,2
Beskid Niski (1994-2019)	10,0	8,7	894,6	868,9
Karkonosze (2016-2019)	8,0	7,7	1123,6	1004,5

Podobnie jak w latach poprzednich, we wszystkich zlewniach badawczych ZMŚP średnia roczna temperatura powietrza w roku 2020 była wyższa od średniej wieloletniej. W dziewięciu Stacjach różnice wyniosły ponad 1°C, z maksymalnym odchyleniem 1,9°C w Poznaniu i 1,8°C w Puszczy Boreckiej. Najmniejsze różnice między średnią roczną

temperaturą w 2020 roku, a średnią z wielolecia stwierdzono w Karkonoszach ($0,3^{\circ}\text{C}$) oraz w Wigrach ($0,9^{\circ}\text{C}$) (Tab. 7).

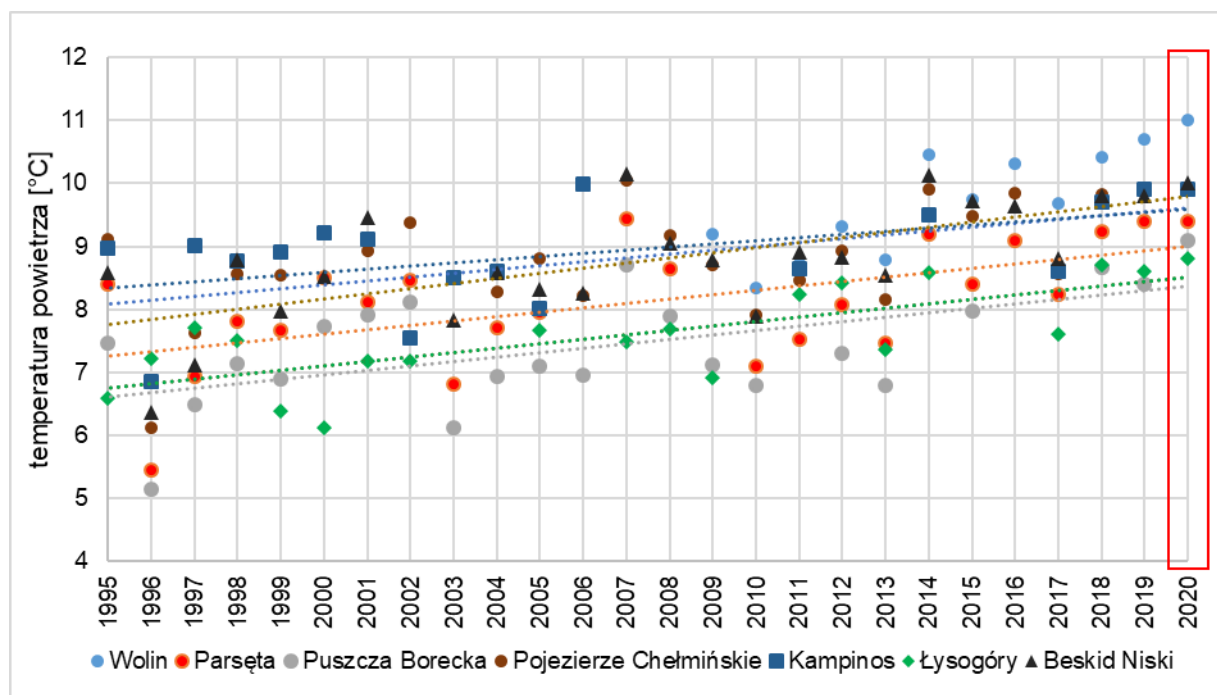
Najwyższa średnia roczna temperatura powietrza wystąpiła w północno-zachodniej Polsce ($11,0^{\circ}\text{C}$ w Stacji Wolin i $10,7^{\circ}\text{C}$ Poznań-Morasko). Po raz pierwszy od początku pomiarów w ramach ZMŚP, tylko w dwóch wysoko położonych Stacjach (Łysogóry i Karkonosze) średnia roczna temperatura powietrza nie przekroczyła 9°C (Tab. 7, 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 zdecydowały 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 2020 roku hydrologicznym na tle wielolecia

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

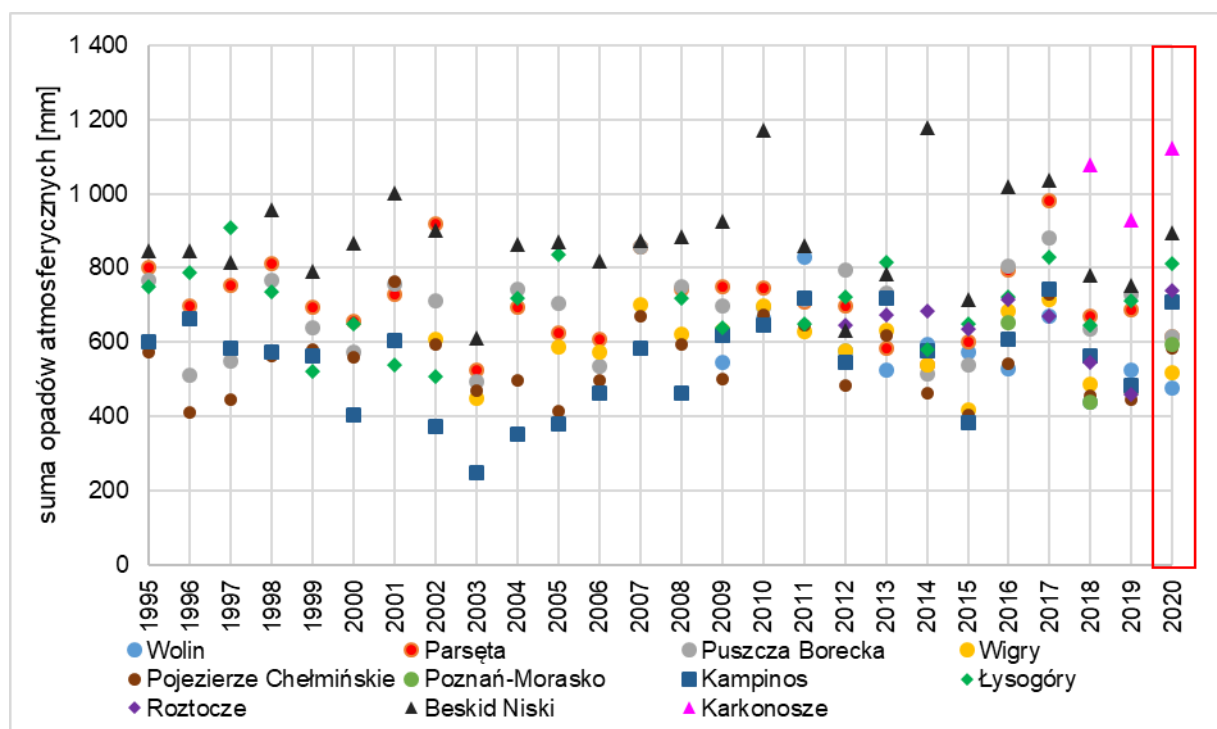
Boreckiej, Pojezierza Chełmińskiego, Kampinosu, Łysogór i Beskidu Niskiego. Średni trend 10-letni wzrostu średniej temperatury powietrza wynosi $0,66^{\circ}\text{C}/10$ lat. Najwyższe trendy, przekraczające $0,7^{\circ}\text{C}$ stwierdzono w Stacjach Kampinos ($0,80^{\circ}\text{C}$) i Beskid Niski ($0,73^{\circ}\text{C}$), a najniższe, poniżej $0,6^{\circ}\text{C}$ w Stacjach Wigry ($0,55^{\circ}\text{C}$) i Pojezierze Chełmińskie ($0,50^{\circ}\text{C}$) (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 2020 był bardziej wilgotny niż wartości średnie z wielolecia (Tab. 7). Niższą sumę opadów niż we wcześniejszych latach (średnio o 85 mm) zanotowano w Stacjach położonych w Polsce północnej (Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry). W pozostałych stacjach, roczne sumy opadu w 2020 roku były wyższe niż wartości wieloletnie średnio o 80 mm. Największe różnice wystąpiły w Kampinosie (+136,9 mm), w Karkonoszach (+119,1 mm) i na Wolinie (-111,2 mm). W większości monitorowanych zlewni warunki opadowe istotnie się poprawiły w odniesieniu do dwóch suchych lat poprzedzających. Szczególną poprawę stwierdzono w Kampinosie i na Roztoczu, gdzie w stosunku do roku 2019, opad był wyższy odpowiednio o 223,8 mm i 277,9 mm. Wyjątkowo niekorzystna sytuacja utrzymała się jedynie na Wolinie, gdzie roczna suma opadu była niższa niż 500 mm. W przypadku rocznych sum opadów atmosferycznych w zlewniach

badawczych ZMŚP nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów wzrostowych, ani spadkowych (Ryc. 8).

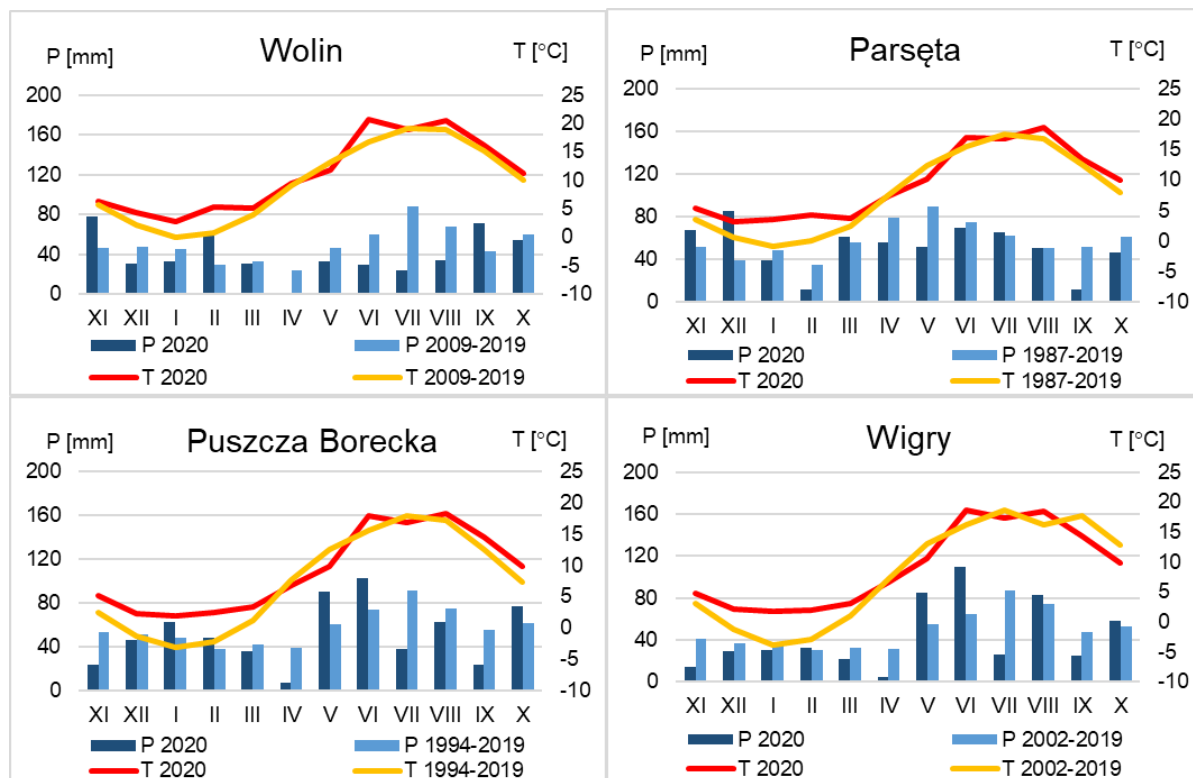


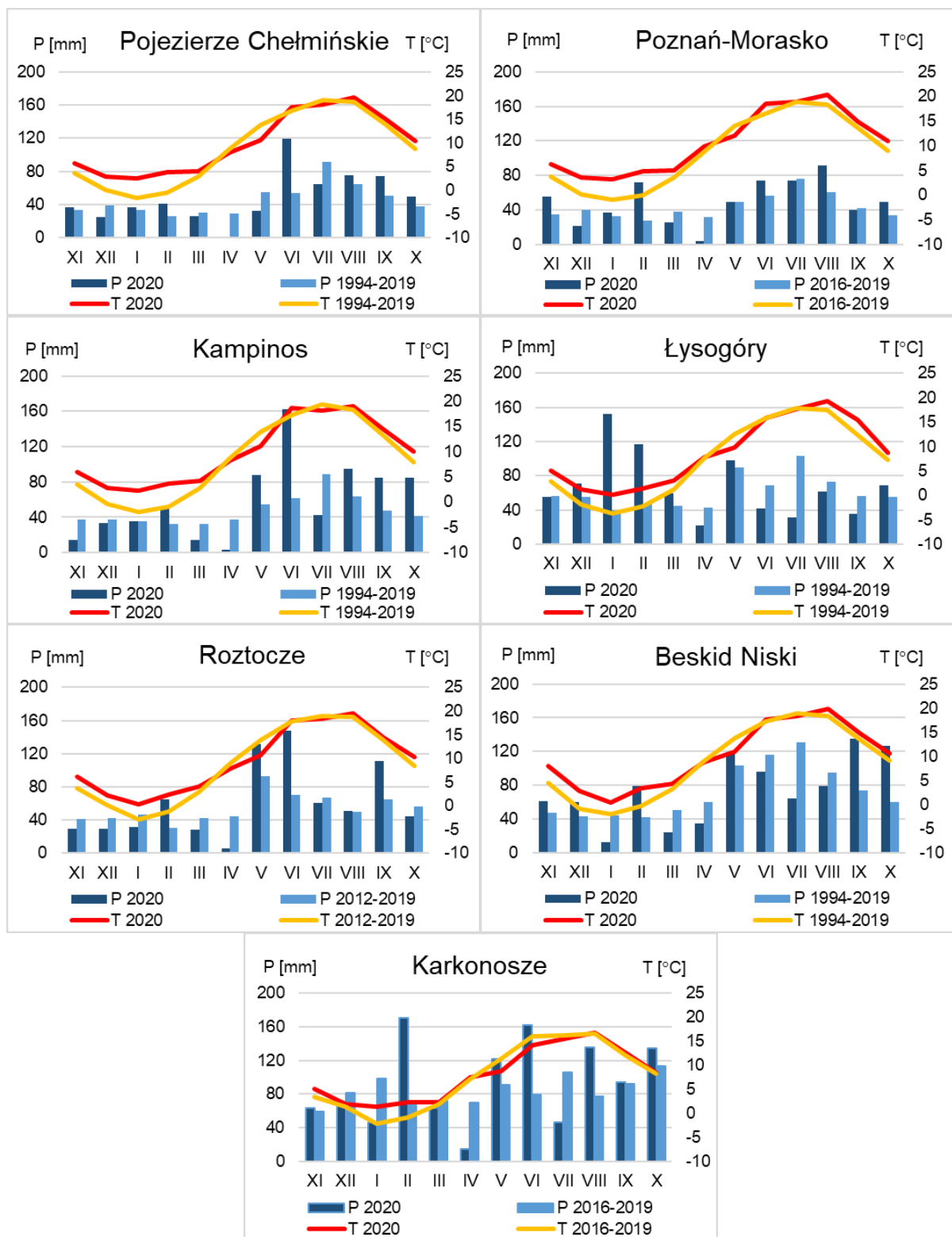
Ryc. 8. Sumy roczne opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym na tle wielolecia

W 2020 roku wysoką średnią roczną temperaturą powietrza ($11,0^{\circ}\text{C}$) oraz niską sumą roczną opadów atmosferycznych (477,5 mm) wyróżniała się Stacja Wolin. 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 $8,0^{\circ}\text{C}$, przy rocznej sumie opadów ponad 1100 mm. Poprawie uległa sytuacja w Polsce centralnej oraz w pasie wyżyn, gdzie w porównaniu do dwóch lat poprzedzających, sumy opadów były znacząco wyższe, a temperatury wzrosły nieznacznie (Stacje Kampinos, Łysogóry i Roztocze).

Uwarunkowania termiczno-opadowe, decydujące o odbudowie zasobów wodnych oraz możliwości rozwoju roślinności, wykazują względnie niekorzystny rozkład miesięczny w 2020 roku (Ryc. 9). Przebieg miesięczny średniej temperatury powietrza przez większość roku był powyżej wartości normalnych. Z jednej strony wysokie temperatury sprzyjały wydłużeniu okresu wegetacji, szybszemu rozkwitaniu i dojrzewaniu roślin. Jednak z drugiej

strony podwyższona termika wzmacniała ewapotranspirację i utrudniała odbudowę zasobów wód powierzchniowych i podziemnych. Szczególnie zauważalnie wyższe temperatury we wszystkich stacjach zanotowano w miesiącach zimowych: w styczniu (średnio o $4,0^{\circ}\text{C}$) i lutym (średnio o $4,2^{\circ}\text{C}$). W poszczególnych stacjach temperatury w tych miesiącach były wyższe w stosunku do wartości z wielolecia od $2,3^{\circ}\text{C}$ w styczniu w Beskidzie Niskim do $5,7^{\circ}\text{C}$ w styczniu w Wigrach). Wyjątkowo chłodnym miesiącem był maj, w którym we wszystkich Stacjach zarejestrowana średnią miesięczną temperaturę niższą niż w wieloleciu o średnio $2,6^{\circ}\text{C}$. Miesięczny rozkład temperatury w 2020 roku przejawiał się brakiem występowania termicznej zimy. Sezon wegetacyjny rozpoczął się w marcu i trwał do końca roku hydrologicznego. Pod względem opadowym dynamika miesięczna atmosferycznej dostawy wody w 2020 roku była zróżnicowana. W większości miesięcy (styczeń, luty, maj, czerwiec, sierpień, wrzesień i październik) opady były wyższe niż w wieloleciu, jednak w kwietniu oraz w lipcu opady były niższe odpowiednio o 30,4 mm i 41,4 mm. Szczególnie korzystny pod względem opadowym był czerwiec, w którym sumy opadów przewyższały wartości z wielolecia o ponad 60 mm w 4 Stacjach (Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Roztocze i Karkonosze). Wysokie opady w maju i czerwcu mogły być korzystne zwłaszcza dla rozwoju roślinności, gdyż w tym czasie występuje ich najszybszy rozwój. W 2020 roku, podobnie jak w latach wcześniejszych nie wystąpiła wyraźna regionalizacja przestrzenna w Polsce dla miesięcznej atmosferycznej dostawy wody do zlewni.





Ryc. 9. Przebieg miesięczny temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku na tle wielolecia

Liczba dni charakterystycznych pod względem termiczno-wilgotnościowym

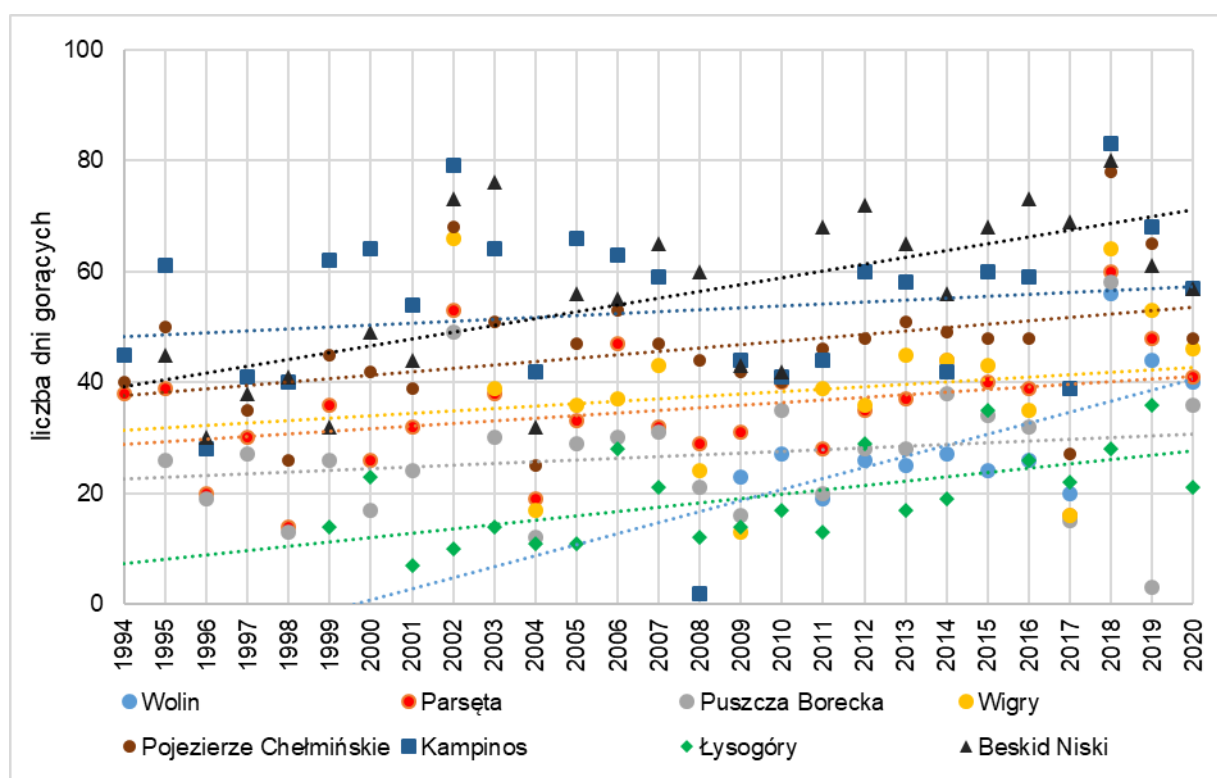
Na dynamikę obiegu wody w zlewniach ZMŚP w znacznym stopniu wpływają uwarunkowania meteorologiczne, ujęte m.in. w postaci liczby dni charakterystycznych pod względem termiczno-wilgotnościowym (Tab. 8).

W 2020 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 9 dni) niż upalną z maksymalną temperaturą dobową wyższą niż 30°C (średnio 5 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 północnej (6 dni na Pojezierzu Drawskim w Stacji Parsęta oraz w Puszczy Boreckiej), jak również w Polsce centralnej – w Kampinosie (również 6 dni). Z kolei najwięcej dni ekstremalnych wystąpiło w pasie wyżyn (49 dni w Górach Świętokrzyskich i 26 dni na Roztoczu). Podkreślić należy zdecydowanie mniejszą liczbę dni charakterystycznych (upalnych i mroźnych) w porównaniu do lat wcześniejszych oraz brak wystąpienia dni bardzo mroźnych we wszystkich monitorowanych zlewniach.

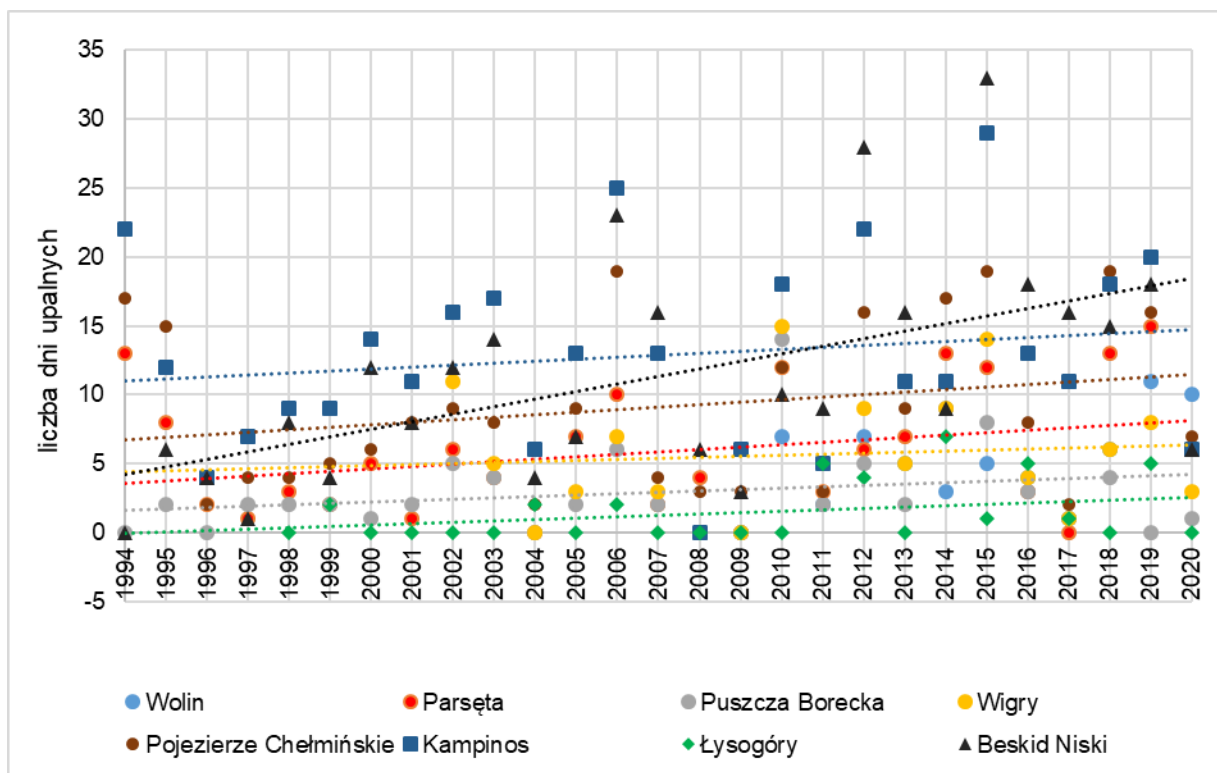
Stosunek ekstremów termicznych na Niżu Polskim w 2020 roku był odmienny w porównaniu z latami wcześniejszymi. Po raz pierwszy więcej było dni upalnych (średnio 7 dni) niż dni mroźnych (średnio 2 dni). W 4 Stacjach (Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko oraz Kampinos) dni mroźne nie wystąpiły ani razu. Z pozostałych stacji nizinnych, najwięcej dni mroźnych wystąpiło w Polsce północno-wschodniej, na Stacjach Puszcza Borecka (5 dni) i Wigry (7 dni). Frekwencja występowania dni upalnych nawiązuje do średniej rocznej temperatury powietrza – najwięcej dni upalnych wystąpiło na Wolinie (10 dni) oraz Poznaniu (18 dni), co, w przypadku Stacji Poznań-Morasko, można wiązać ze zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła. Podobnie jak w latach poprzednich, najwięcej dni charakterystycznych – mroźnych i upalnych występowało w strefie wyżynnej, średnio 38 dni, od 26 dni na Roztoczu do 49 dni w Górach Świętokrzyskich. W tej strefie notowano także zdecydowaną przewagę występowania dni mroźnych (25 dni na Roztoczu i wszystkie 49 dni w Górach Świętokrzyskich) nad dniami upalnymi (tylko 1 dzień na Roztoczu). Strefa górską charakteryzowała się występowaniem mniejszej niż w poprzednich latach liczby dni upalnych i mroźnych (11 dni w Beskidzie Niskim i 12 dni w Karkonoszach). W Karkonoszach, podobnie jak w Górach Świętokrzyskich wszystkie dni charakterystyczne były dniami mroźnymi. Z kolei w przypadku Beskidu Niskiego wystąpiła nieznaczna przewaga dni upalnych (6 dni) nad dniami mroźnymi (5 dni).

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, istotnie statystyczny trend wzrostowy ($p < 0,05$) stwierdzono dla 5 Stacji Bazowych: Wolin, Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Łysogóry oraz Beskid Niski (Ryc. 10). Dla czterech wymienionych stacji (poza Wolinem) istotny statystycznie trend wzrostowy stwierdzono również dla częstości występowania dni upalnych (Ryc. 11).

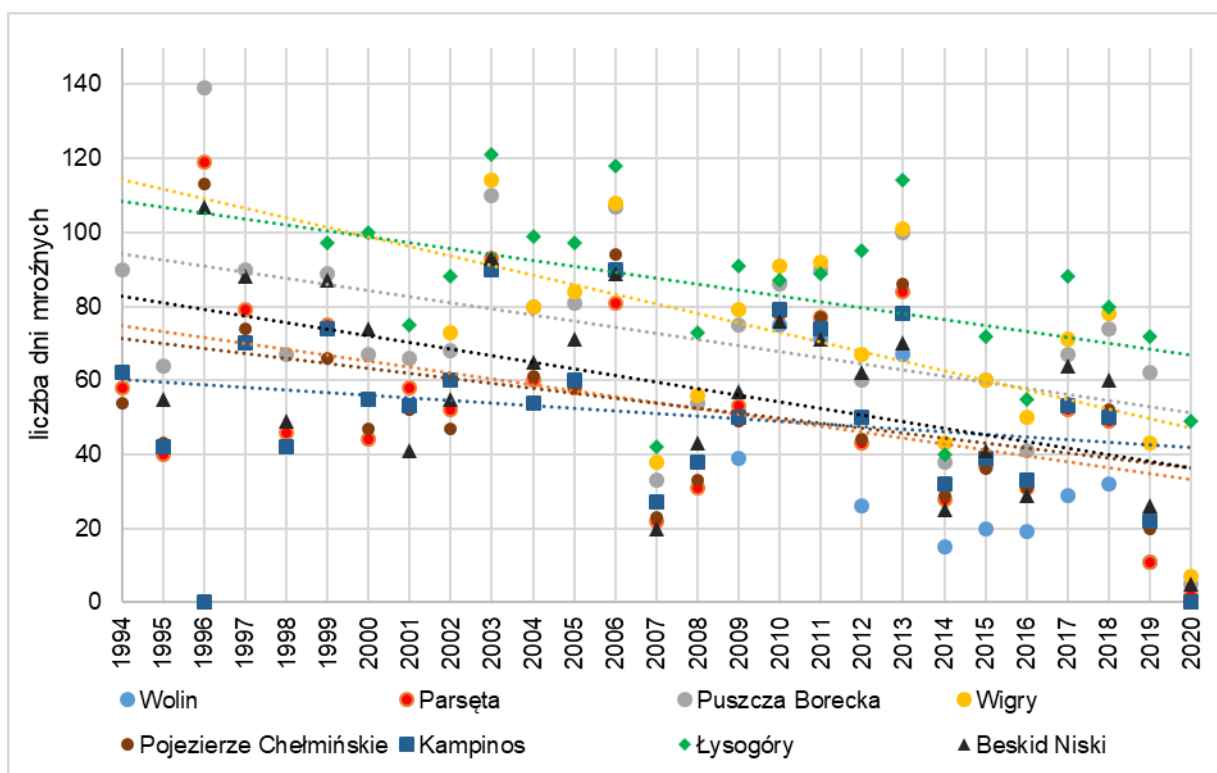
W przypadku dni mroźnych oraz bardzo mroźnych, można zauważyć tendencję zmniejszania częstości występowania tych dni. W przypadku dni mroźnych, istotnie statystyczny trend spadkowy ($p < 0,05$) stwierdzono dla 7 Stacji Bazowych: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie, Łysogóry i Beskid Niski (Ryc. 12). Z kolei dla dni bardzo mroźnych istotny statystycznie trend spadkowy częstości ich występowania stwierdzono jedynie dla Stacji Wolin, dysponującej 11-letnim okresem pomiarowym (Ryc. 13).



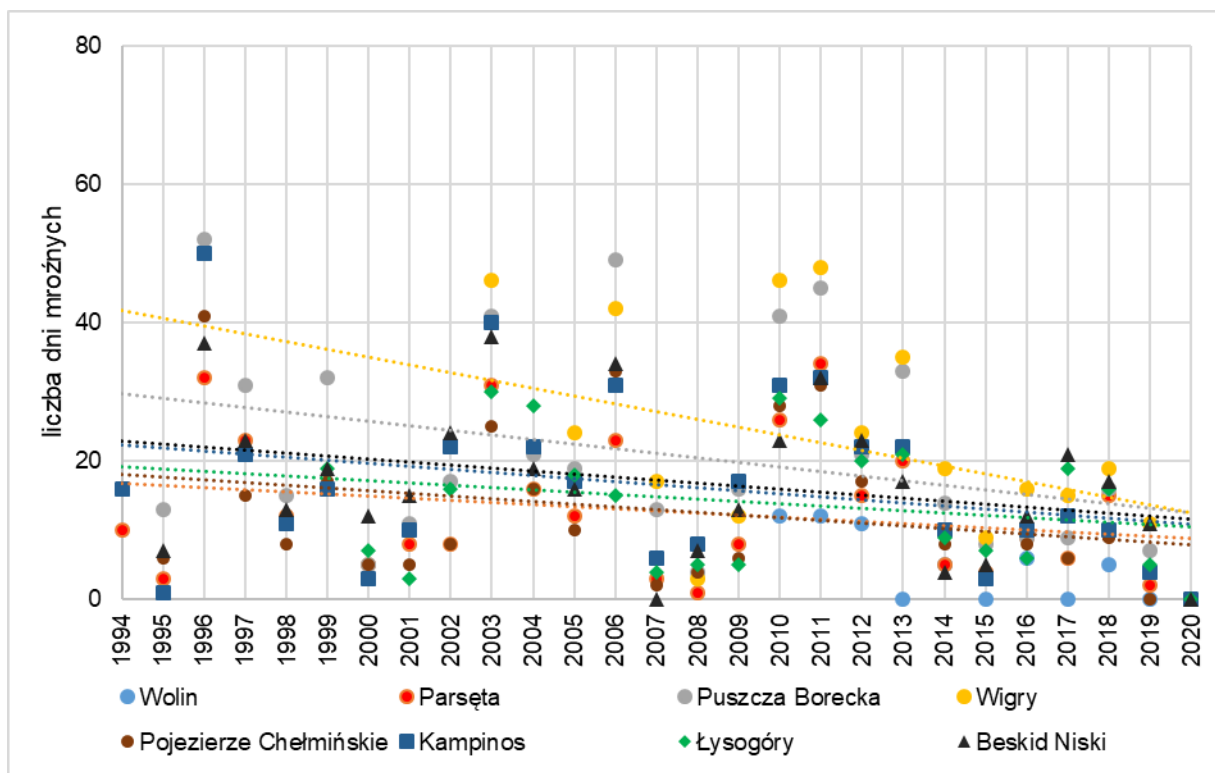
Ryc. 10. Przebieg zmian liczby dni gorących ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP



Ryc. 11. Przebieg zmian liczby dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP



Ryc. 12. Przebieg zmian liczby dni mroźnych ($T_{sr} < 0^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP



Ryc. 13. Przebieg zmian liczby dni bardzo mroźnych ($T_{min} < -10^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP

Frekwencja dobowej wydajności opadów, podobnie jak w latach wcześniejszych, w 2020 roku wykazała zróżnicowanie przestrzenne, nawiązujące do struktury krajobrazowej Polski. Najwięcej dni z opadem ($P \geq 0,1$ mm) występowało w strefie górskiej (174 dni), mniej w strefie wyżynnej (167 dni), a najmniej w strefie nizinnej (165 dni). Na Niżu Polskim zakres zmienności liczby dni z opadem wynosił od 139 dni na Wolinie do 196 dni w Puszczy Boreckiej. W strefie wyżynnej, zdecydowanie więcej dni z opadem wystąpiła na Roztoczu (194 dni) niż w Górach Świętokrzyskich (139 dni). Z kolei w górach więcej dni opadowych występowało w Karkonoszach (208 dni) niż w Beskidzie Niskim (139 dni). Liczba dni z opadem w porównaniu do roku poprzedniego znacząco się nie zmieniła, jednak zanotowano nieznaczny wzrost frekwencji opadów: na nizinach średnio o 13 dni, na wyżynach średnio o 7 dni, a w górach średnio o 8 dni).

Odnosnie opadów o dużej wydajności ($P \geq 10$ 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 (33 dni w Karkonoszach i 28 dni w Beskidzie Niskim) oraz na wyżynach (30 dni w Górach Świętokrzyskich i 25 dni na Roztoczu). Najmniej dni z opadem ≥ 10 mm wystąpiło na nizinach, a w szczególności na Wolinie (8 dni), w Wigrach (11 dni i w Puszczy Boreckiej (12 dni). Najwięcej dni z opadem

większym niż 10 mm (15 dni) w tej strefie krajobrazowej zarejestrowano w Stacjach Parsęta, Poznań-Morasko i Kampinos.

W roku 2020 zanotowano więcej dni z opadem powyżej 10 mm niż w dwóch poprzednich latach, jednak wciąż utrzymuje się spadkowy trend frekwencji takich opadów, 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 20,2 mm w Stacji Parsęta do 58,5 mm w Kampinosie).

Tab. 8. Liczba dni charakterystycznych temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku

Element pogody	Stacja Bazowa ZMŚP										
	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chelmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Bardzo upalne $T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Upalne $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$	10	6	1	3	7	18	6	0	1	6	0
Gorące $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$	40	41	36	46	48	44	57	21	51	57	16
Przymrozkowe $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$	15	85	95	95	72	60	102	82	65	96	94
Mroźne $T_{\text{śr}} < 0^{\circ}\text{C}$	1	0	5	7	0	0	0	49	25	5	12
Bardzo mroźne $T_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Opad $\geq 0,1 \text{ mm}$	139	171	196	148	155	168	175	139	194	139	208
Opad $\geq 1,0 \text{ mm}$	98	145	116	89	94	104	95	72	105	107	143
Opad $\geq 10,0 \text{ mm}$	8	15	12	11	13	15	15	30	25	28	33
Max opad dobowy [mm]	38,1	20,2	32,8	30,8	43,2	40,6	58,5	22,9	41,2	48,2	40,3
Dni z pokrywą śnieżną	1	1	3	6	1	1	0	1	6	12	74
Średnia grubość pokrywy śnieżnej [cm]	-	-	2,4	2	1	2	-	-	1,1	1,8	5

Utrzymująca się od paru lat marginalna rola pokrywy śnieżnej w retencji wody w badanych zlewniach została pogłębiona w roku 2020, co było sytuacją wyjątkowo niekorzystną. W pięciu Stacjach (Wolin, Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko i Łysogóry) pokrywa śnieżna utrzymała się tylko przez 1 dzień, a w Stacji Kampinos w ogóle nie wystąpiła. Najwięcej dni z pokrywą śnieżną zarejestrowano w górach: 74 dni w Karkonoszach oraz 12 dni w Beskidzie Niskim. Z kolei średnia miąższość pokrywy śnieżnej była bardzo mała, osiągając największe wartości w Karkonoszach (zaledwie 5 cm w Jagniątkowie i 36 cm na Szrenicy).

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 stosowaną 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	$p \leq 90\% p_{\text{norm.}}$
2	normalny	$90\% p_{\text{norm.}} < p < 110\% p_{\text{norm.}}$
3	wilgotny	$p \geq 110\% p_{\text{norm.}}$

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. Rok 2020 pod względem opadów był korzystniejszy dla odbudowy zasobów wodnych w większości zlewni. W 3 Stacjach (Poznań-Morasko, Kampinos i Łysogóry) rok 2020 sklasyfikowano jako wilgotny, w kolejnych 6 stacjach rok był normalny pod względem opadowym. Tylko w dwóch Stacjach (Wolin i Karkonosze) rok 2020 był rokiem suchym. W porównaniu z rokiem 2019, w 6 monitorowanych zlewniach warunki opadowe polepszyły się, w 4 zlewniach utrzymały się na tym samym poziomie. Jedynie na Wolinie sytuacja znacząco się pogorszyła (Tab. 10).

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. 10. Roczna klasyfikacja opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP

Rok	Wolin	Parzęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chelmińskie	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											

poniżej 90%

suchy

90-110%

normalny

powyżej 110%

wilgotny

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. Od 2014 roku trwa kolejny, najdłuższy okres o podwyższonej termice. Sześć z ostatnich siedmiu lat (poza chłodniejszym 2017) we wszystkich stacjach było cieplejszych od wartości normalnej, co świadczy o dominacji cech kontynentalizmu nad oceanizmem.

Tab. 12. Roczna klasyfikacja termiczna dla Stacji Bazowych ZMŚP

Rok	Wolin	Parzęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chelmińskie	Poznań-Morasko	Kampanos	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											

ekstremalnie ciepły
anomalnie ciepły
bardzo ciepły
ciepły
lekko ciepły

normalny

lekko chłodny
chłodny
bardzo chłodny
anomalnie chłodny
ekstremalnie chłodny

Na właściwości cieplne w 2020 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 2020 roku szczególnie niekorzystna sytuacja termiczna występowała na Wolinie, w Wigrach, w Poznaniu, na Roztoczu i Karkonoszach, gdzie był to rok anomalnie i ekstremalnie ciepły. Niekorzystne warunki wystąpiły również w Stacjach: Parsęta, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos i Beskid Niski, gdzie był to rok bardzo ciepły. Wysokiemu parowaniu ograniczającemu retencję wody sprzyjały również warunki ciepłe w pozostałych stacjach, dla których 2019 rok był ciepły (Puszcza Borecka) lub lekko ciepły (Łysogóry) (Tab. 12).

Klasyfikacja termiczno-opadowa w 2020 roku dla większości Stacji Bazowych ZMŚP wskazuje na potencjalnie niekorzystną sytuację do retencji wody w zlewniach ZMŚP, co przejawiało się spadkiem zasobów wód powierzchniowych i podziemnych. Niekorzystna sytuacja do odnowy zasobów wodnych występowała prawie w całym kraju. Co prawda w monitorowanych zlewniach zanotowano nieznacznie wyższe sumy opadów atmosferycznych, jednak warunki termiczne zdecydowanie przewyższały wartości ze średnich wieloletnich. Przeciętna sytuacja pod względem odbudowy zasobów wodnych była m.in. w Górach Świętokrzyskich, gdzie dla Stacji Łysogóry rok 2020 był lekko ciepły i wilgotny pod względem opadowym (Tab. 13).

Tab. 13. Klasyfikacja termiczno-opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2020 roku

Rok 2020	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chełmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Łysogóry	Roztocze	Beskid Niski	Karkonosze
Klasyfikacja termiczna	ekstremalnie ciepły	bardzo ciepły	ciepły	anomalnie ciepły	bardzo ciepły	anomalnie ciepły	bardzo ciepły	lekko ciepły	anomalnie ciepły	bardzo ciepły	anomalnie ciepły
Klasyfikacja opadowa	suchy	normalny	normalny	normalny	normalny	wilgotny	wilgotny	wilgotny	normalny	normalny	suchy
Sytuacja dla ochrony i odnowy zasobów wodnych	niekorzystna	przeciętna	przeciętna	niekorzystna	niekorzystna	niekorzystna	przeciętna	przeciętna	niekorzystna	przeciętna	niekorzystna

Zdarzenia ekstremalne

Zróźnicowanie przestrzenne wskaźnika oceanizmu i kontynentalizmu klimatu Polski oraz wyniesienie nad poziomem morza znajdują swoje odzwierciedlenie w mniejszych kontrastach termicznych w regionach północnozachodnich niż w południowowschodnich. Jednak w 2020 roku amplitudy roczne temperatur powietrza były bardzo zbliżone we wszystkich monitorowanych zlewniach. Najwyższe wystąpiły w Stacjach Wolin (42,6°C) i Parsęta (42,3°C), z kolei najniższe amplitudy zanotowano w Łysogórach (36,1°C)

i w Karkonoszach (37,3°C) (Tab. 14). Tylko na Wolinie wystąpił jeden dzień bardzo upalny z temperaturą maksymalną wyższą niż 35°C. W porównaniu z latami wcześniejszymi, amplitudy były niższe, co należy wiązać z brakiem występowania dni bardzo mroźnych we wszystkich stacjach.

Tab. 14. Wartości maksymalne i minimalne temperatur w roku hydrologicznym 2020 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]	36,9	33,3	30,1	30,4	32,7	34,5	32,6	28,6	31,5	30,9	28,2
T _{min} [°C]	-5,7	-9,0	-11,4	-9,7	-7,3	-7,4	-9,4	-7,5	-8,6	-9,5	-9,1
Amplituda [°C]	42,6	42,3	41,5	40,1	40,0	41,9	42,0	36,1	40,1	40,4	37,3

W 3 monitorowanych zlewniach położonych w Polsce północnej (Wolin, Puszcza Borecka, Wigry), według klasyfikacji Lorenc (1998), czerwiec był miesiącem ekstremalnie ciepłym w odniesieniu do wartości wieloletnich, co było szczególnie niekorzystne dla rozwoju roślinności, gdyż w tym czasie występuje ich najszybszy rozwój. Ponadto w trzech Stacjach: Wolin (sześciokrotnie, raz w lipcu, pięć razy w sierpniu), Poznań-Morasko (jednokrotnie w sierpniu) i Łysogóry (dwukrotnie w sierpniu) zarejestrowano noc tropikalną, z temperaturą minimalną wyższą niż 20°C. W Poznaniu pięciokrotnie (dwukrotnie w czerwcu i sierpniu oraz raz w lipcu) wystąpiły też fale upałów, czyli ciągi przynajmniej 3 dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C. Pomimo wyższych średnich rocznych temperatur powietrza, maj był miesiącem stosunkowo chłodnym. Skutkowało to wystąpieniem późnych przymrozków w 6 monitorowanych zlewniach (Stacje: Parsęta, Wigry, Kampinos, Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze).

W 2020 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 również nie były wyjątkowe, ani razu nie wystąpił opad dobowy wyższy niż 50 mm. 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 w większości

monitorowanych zlewni (poza Puszcą Borecką, Wigrami i Karkonoszami). Poza tym w Stacjach: Wolin i Beskid Niski stwierdzono występowanie bardzo silnego wiatru, ze średnią prędkością 10-minutowa $>15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ odpowiednio dla 10 i 20 dni.

W 2020 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 2020 roku hydrologicznym do najbardziej uciążliwych zjawisk ekstremalnych należały głównie susze meteorologiczne. Niewystarczająca wydajność opadów atmosferycznych, wysokie temperatury powietrza i parowanie terenowe były przyczyną utrzymania się suszy glebowej i suszy hydrologicznej, odznaczającej się np. okresowym wyschnięciem cieków w czterech 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, gdyż 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.

Tab. 15. Wskaźnik miesięcznych zmian retencji R_M dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym

Stacja ZMŚP	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Wolin	spadek retencji	retencja bez zmian	wzrost retencji	wzrost retencji	wzrost retencji	spadek retencji	spadek retencji	spadek retencji	spadek retencji	spadek retencji	spadek retencji	wzrost retencji
Parsęta	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	wzrost retencji	retencja bez zmian
Puszcza Borecka	retencja bez zmian	retencja bez zmian	wzrost retencji	wzrost retencji	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	spadek retencji	spadek retencji	spadek retencji	retencja bez zmian
Wigry	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian
Pojezierze Chełmińskie	wzrost retencji	wzrost retencji	wzrost retencji	retencja bez zmian	retencja bez zmian	spadek retencji	spadek retencji	retencja bez zmian	wzrost retencji	spadek retencji	wzrost retencji	wzrost retencji
Poznań-Morasko	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	wzrost retencji	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian	retencja bez zmian
Kampinos	wzrost retencji	wzrost retencji	wzrost retencji	wzrost retencji	retencja bez zmian	spadek retencji	wzrost retencji	retencja bez zmian	spadek retencji	retencja bez zmian	wzrost retencji	wzrost retencji
Łysogóry	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)	analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)
Roztocze	retencja bez zmian	wzrost retencji	spadek retencji	wzrost retencji	retencja bez zmian	spadek retencji	wzrost retencji	wzrost retencji	spadek retencji	spadek retencji	retencja bez zmian	retencja bez zmian
Beskid Niski	retencja bez zmian	wzrost retencji	retencja bez zmian	retencja bez zmian	spadek retencji	retencja bez zmian	wzrost retencji	spadek retencji	retencja bez zmian	wzrost retencji	wzrost retencji	spadek retencji
Karkonosze	wzrost retencji	wzrost retencji	spadek retencji	wzrost retencji	spadek retencji	spadek retencji	wzrost retencji	wzrost retencji	spadek retencji	retencja bez zmian	wzrost retencji	wzrost retencji

spadek retencji
 retencja bez zmian
 wzrost retencji
 analiza niemożliwa z przyczyn metodycznych (źródło - niemożliwe określenie stanu wody)

W 2020 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 Rózanego Strumienia w Poznaniu. Z kolei największe zróżnicowanie zmian retencji występowało w Polsce południowej i południowowschodniej (Stacje: Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze). W Stacji Bazowej Wolin najdłużej utrzymywał się spadek retencji (przez 6 miesięcy), o którym decydowały bardzo niskie opady atmosferyczne, wysokie temperatury powietrza oraz wzmożona ewapotranspiracja. W układzie miesięcznym relatywnie najlepsze warunki do retencji wody były w pierwszych miesiącach roku hydrologicznego (od listopada do lutego). W tym okresie w stacjach notowano wzrost retencji albo retencję bez zmian (poza Stacjami Roztocze i Karkonosze, gdzie w styczniu wystąpił spadek retencji). Zdecydowanie gorsze warunki dla

retencji wody wystąpiły od marca do września (tylko w Parsęcie, Wigrach i Poznaniu nie wystąpiły miesiące z wartością wskaźnika R_M mieszczącego się w przedziale spadku retencji) (Tab. 15).

Pogorszenie retencji wód podziemnych w tym okresie wynikało z dużej frekwencji dni gorących wzmagających ewapotranspirację oraz występowania susz meteorologicznych w okresie letnim. W konsekwencji infiltracja wody do warstw podziemnych była ograniczona. Podobnie jak w roku 2018 i 2019, a w odróżnieniu do lat wcześniejszych, 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 słaby stan ilościowy wód podziemnych w badanych zlewniach w 2020 roku (Tab. 15), co w konsekwencji prowadziło do możliwości wystąpienia zagrożenia niżówki hydrogeologicznej w większości badanych geosystemów (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:

$$k_n = 1 - G / SNGW_{(1994-2019)}$$

gdzie:

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

$SNGW_{(1994-2019)}$ – 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 2020 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 północnozachodniej (Wolin) i południowowschodniej (Roztocze i Beskid Niski). We wszystkich trzech stacjach wystąpiła płytka niżówka, a na

Wolinie (w 3 miesiącach) wystąpiła również głęboka niżówka. O relatywnie największym zagrożeniu występowania niżówki hydrogeologicznej decydowały niekorzystne warunki termiczno-opadowe, które nie powodowały znaczącego wzrostu stanu wód podziemnych. Zagrożenie wystąpienia płytkiej niżówki występowało również w pozostałych monitorowanych zlewniach. Podobnie jak w roku 2019 i w przeciwieństwie do lat wcześniejszych, w żadnej stacji nie utrzymywał się przez cały rok brak zagrożenia wystąpienia niżówki hydrogeologicznej. Przyczyną utrzymywania się już trzeci rok, od 2018 roku, niekorzystnych warunków hydrogeologicznych (Tab. 16) był brak wydajnych opadów atmosferycznych w latach 2018-2019, występowanie okresów suszy meteorologicznej oraz niekorzystne warunki termiczne, w tym występowanie fal upałów. Wyższe opady atmosferyczne w 2020 roku spowodowały nieznaczną poprawę sytuacji hydrogeologicznej w stosunku do roku 2019, co przejawia się mniejszą liczbą miesięcy z wystąpieniem płytkiej i głębokiej niżówki.

Tab. 16. Wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną k_n dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2020 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

Reakcja badanych geosystemów w postaci zasilania opadowego i podziemnego widoczna była w 2020 roku w wodach powierzchniowych, zwłaszcza w wodach rzecznych, które stanowią strefę odprowadzania wody z badanych zlewni. Miara 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 [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$] w 2020 roku hydrologicznym w Stacjach Bazowych ZMŚP

Stacja (Rzeka)	Współczynnik odpływu	Średni miesięczny odpływ jednostkowy	Maksymalny dobowy odpływ jednostkowy	Minimalny dobowy odpływ jednostkowy
	[-]	[$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]		
Wolin (Lewińska Struga)	0,12	1,70	11,90	0,00
Parsęta (Parsęta)	0,43	7,34	27,08	3,46
Wigry (Czarna Hańcza)	0,31	5,11	11,81	3,53
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	0,17	2,10	3,22	0,06
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	0,04	0,70	5,60	0,00
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	0,00	0,00	0,00	0,00
Łysogóry (Wieniec)	0,02	1,54	3,92	0,00
Roztocze (Świerszcz)	0,01	0,38	1,65	0,13
Beskid Niski (Bystrzanka)	0,33	8,40	204,54	0,25
Karkonosze (Wrzosówka)	0,66	24,00	256,7	7,50

Ekstremalna sytuacja wystąpiła w Kanale Olszowieckim (Stacja Kampinos), gdzie nie zanotowano ani jednego dnia z przepływem. W okresie zimowym nie wystąpiła pokrywa śnieżna, nie było więc też roztopów. Bardzo niskie opady w marcu i niemal brak opadów w kwietniu przy niskiej retencji spowodowały, że przez cały rok hydrologiczny mimo późniejszych wysokich opadów nie zanotowano odpływu ze zlewni (Olszewski, Andrzejewska 2021). W związku z powyższym, Kanał Olszowiecki został wyłączony z analizy wskaźników hydrologicznych w tym roku.

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 ciekami ze zlewni. Współczynnik odpływu w zadanym przedziale czasu (miesiąc, rok) jako wartość niemianowaną oblicza się następująco:

$$\alpha = O/P [-]$$

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 2020 roku był na podobnym poziomie jak w roku 2019. Przyjmował on wartości od 0,01 w Świerszczu na Roztoczu i 0,02 w Wieńcu w Górach Świętokrzyskich do wartości najwyższych: 0,43 w górnej Parsęcie i 0,66 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 (Różany Strumień, Struga Toruńska, Lewińska Struga), a maksymalnie 31-43% (Parsęta, Czarna Hańcza) 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 współczynnika odpływu osiągnął w ciekach górskich (Bystrzanka i Wrzosówka), gdzie udział wód opadowych w wodach rzecznych wyniósł 33-66%. W tych zlewniach migracja wody opadowej do koryta rzecznej jest szybka i krótka. Jakość wód opadowych w zlewniach górskich może znacząco wpływać na jakość wody w rzekach.

W zlewniach górskich reakcja odpływu rzeczno 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 rzeczno, ale także m.in. dla potrzeb melioracji czy nawadniania.

W roku 2020 zauważalny jest ścisły związek pomiędzy wielkością opadów atmosferycznych w okresach poprzedzających, a aktualnym odpływem ze zlewni. Porównywalne wartości współczynnika odpływu w 2019 roku (który pod względem warunków hydrometeorologicznych był mniej korzystny niż rok 2020) można tłumaczyć mniejszą retencją w suchych i ciepłych latach 2018 i 2019. Wyższe opady w 2020 roku mogą przyczynić się do uzupełniania zasobów wód podziemnych (retencji), czego efekty mogą być widoczne w kolejnym, 2021 roku. Stosunkowo niskie wartości współczynnika odpływu w roku 2020 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 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Obliczenia odpływu jednostkowego dokonuje się z uwzględnieniem średniego przepływu w danym okresie (doba, miesiąc, rok) na podstawie formuły:

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

gdzie:

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

A – powierzchnia zlewni [km^2].

W badanych zlewniach ZMŚP w 2019 roku średni miesięczny wskaźnik odpływu jednostkowego (Tab. 17) przyjmował niskie wartości, poniżej $5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ prawie we wszystkich zlewniach nizinnych i wyżynnych (oprócz Parsęty i Czarnej Hańczy). Na wysoki odpływ jednostkowy na Parsęcie wpłynęły wysokie miesięczne wartości wskaźnika w półroczu zimowym, co wynikało ze stosunkowo wysokich opadów w styczniu i lutym, przy małym parowaniu terenowym. Z kolei równie wysoki odpływ jednostkowy, powyżej $8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, 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 niskim odpływie jednostkowym w 2020 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 rzecznej. Ponadto Lewińska Struga w profilu badawczym ma długość 3 km, z czego jedynie 0,6 km ciek 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 do głębszych warstw wodonośnych nie mających kontaktu hydraulicznego z ciekami), jak i spowodowane działalnością człowieka (np. przekierowywanie wody z cieków przez gospodarzy do przydomowych zbiorników). Antropopresja w zlewni Strugi Toruńskiej (Pojezierze Chełmińskie) przejawia się zaburzeniem odpływu rzecznej wskutek działalności rolniczej, gdzie wody rzeczne wykorzystywane są do nawadniania pól uprawnych.

Współczynnik miesięcznego przepływu

Podstawą oceny ustroju rzecznej 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):

$$k = SQ_{mi} / SQ_r,$$

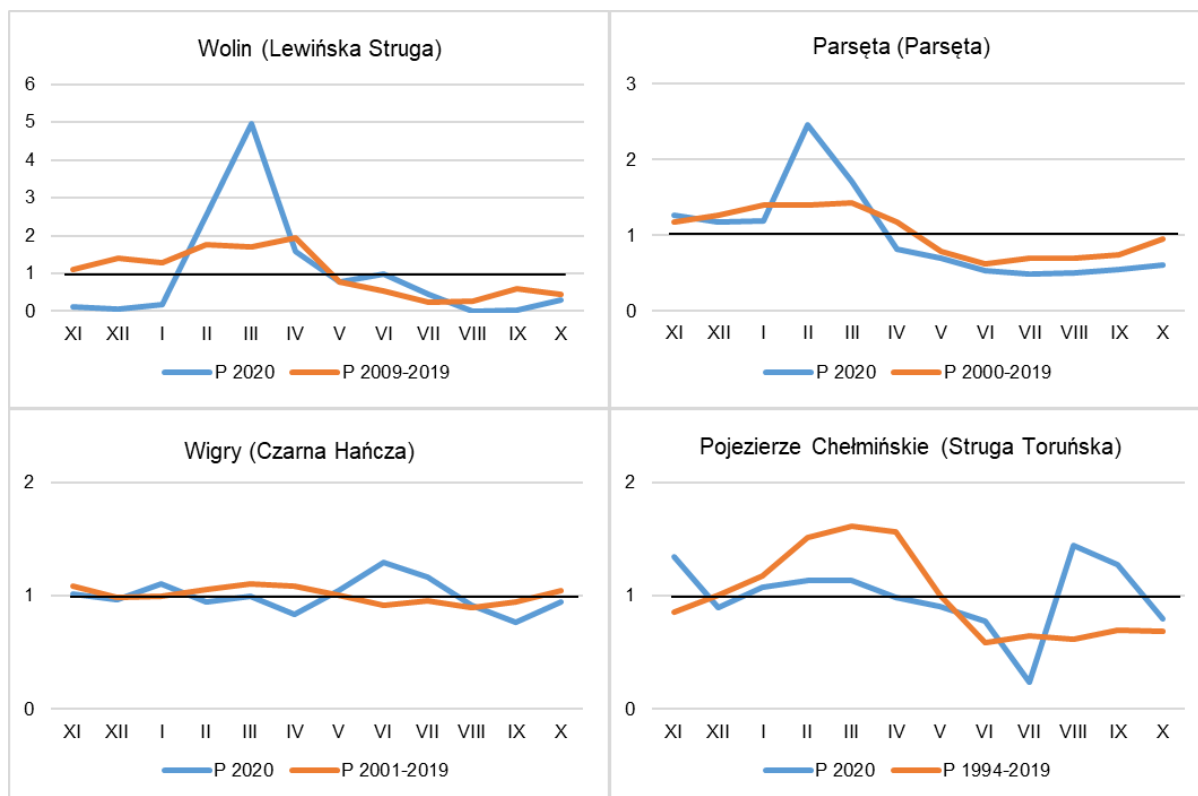
gdzie:

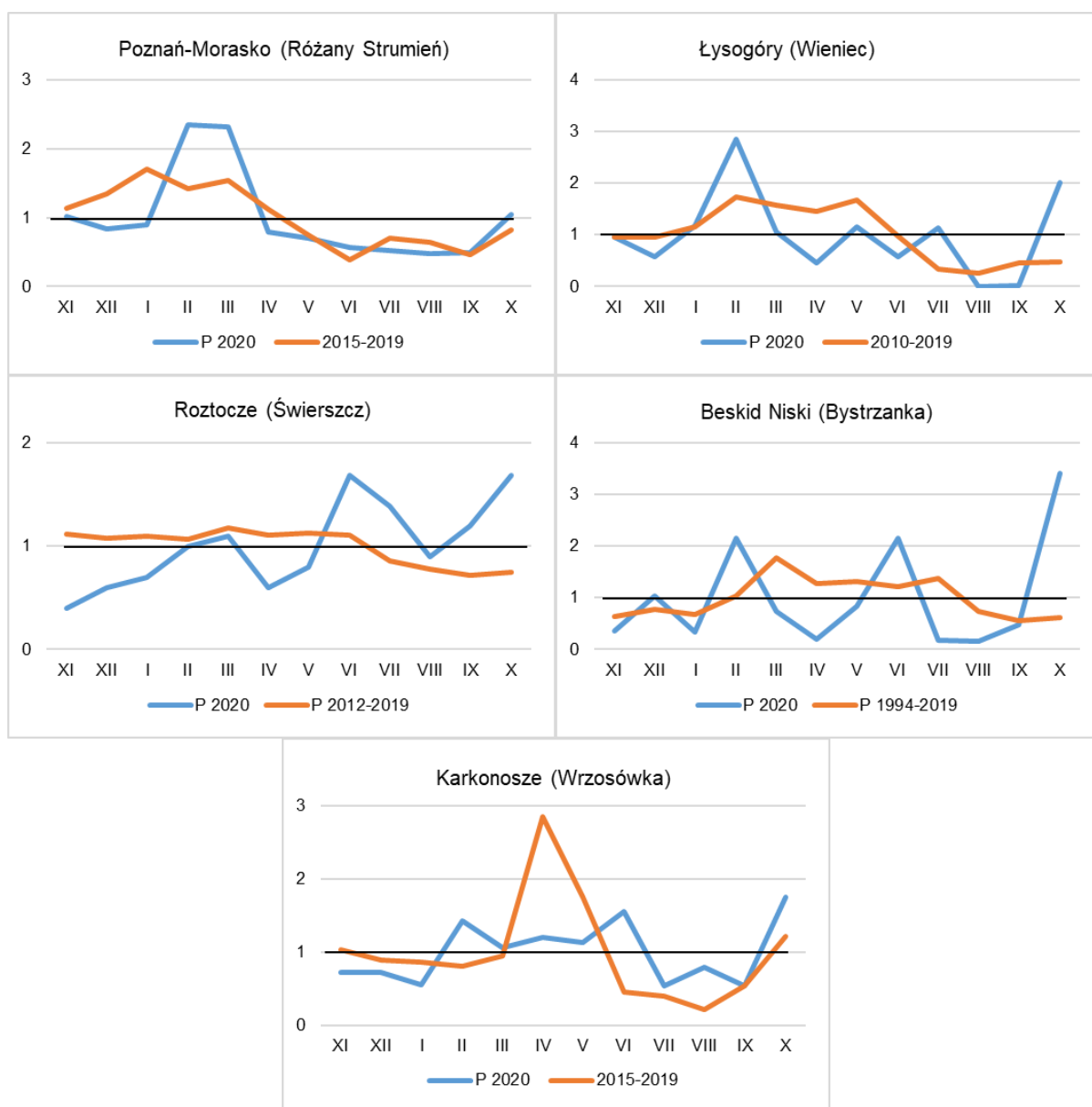
SQ_{mi} – średni przepływ j-tego miesiąca w wieloleciu;

SQ_r – średni przepływ roczny w wieloleciu.

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

Współczynnik miesięcznych przepływów w 2020 roku hydrologicznym odbiegał od współczynnika przepływów dla wartości średnich z wielolecia i był zróżnicowany w poszczególnych zlewniach (Ryc. 14). Najbardziej typowy był przepływ Czarnej Hańczy. W zlewniach w Polsce północnozachodniej (Lewińska Struga, Parsęta i Różany Strumień), ale również w Wienie i Bystrzance, wyraźnie zaznaczyły się wyższe przepływy w półroczu zimowym, co wynikało z większych sum opadów atmosferycznych przy mniejszej ewapotranspiracji w tym okresie. W zlewniach w Polsce południowowschodniej i południowej (Świerszcz, Bystrzanka i Wrzosówka) wyraźnie zaznaczyły się wyższe wartości współczynnika przepływu w październiku. W związku z brakiem występowania pokrywy śnieżnej (lub krótkiego czasu jej zalegania i małej miąższości), w roku 2020 roztopy miały wpływ na wielkość przepływów jedynie w Karkonoszach. W pozostałych monitorowanych ciekach, zasilanie wód miało charakter deszczowy. Generalnie najmniejsze przepływy występowały głównie od czerwca do września, kiedy to trzy monitorowane cieki (poza Kanałem Olszowieckim) okresowo (lub stale) nie prowadziły wody (Lewińska Struga, Różany Strumień, Wieniec).





Ryc. 14. Zmienność czasowa współczynników miesięcznych przepływu w roku hydrologicznym 2020 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 systemem fluwialnym. 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 geoeosystemach 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 2020 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 2020 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 Łysogóry (793,1 mm) i Roztocze (725,5 mm). Wysoki deficyt w Kampinosie (707,2 mm) związany jest z anormalną sytuacją z brakiem odpływ fluwialnego w Kanale Olszowieckim. Stosunkowo wysoki deficyt wody w zlewni Różanego Strumienia (571,9 mm) był wynikiem znikomego odpływu wody w badanym cieku. Zlewnia Różanego Strumienia jest przykładem obszaru poddawanego procesowi silnej antropopresji. Postępujący proces przeobrażania zlewni w obszar o cechach typowych dla obszarów zurbanizowanych polega z jednej strony na wkraczaniu na jej teren budownictwa mieszkaniowego i związanej z nim infrastruktury komunalnej, drogowej. Takie przeobrażenia powodują zwiększone parowanie terenowe i ograniczenie infiltracji wody opadowej do wód podziemnych i dalej do systemu korytowego. W pozostałych zlewniach nizinnych deficyt odpływu nie przekroczył 500 mm (Tab. 18). W porównaniu z rokiem 2019, w 6 Stacjach (Wigry, Poznań-Morasko, Kampinos, Łysogóry, Roztocze i Beskid Niski) deficyt odpływu był wyższy w 2020 roku. Uproszczony bilans wodny w 2020 roku (średnio 549 mm) był zbliżony do bilansu z wilgotnego roku 2017 (625 mm) i wyższy niż w suchych i ciepłych latach 2015, 2018 i 2019 (średni deficyt odpływu wody odpowiednio 440, 439 i 475 mm). W ostatnich pięciu latach najwyższy średni deficyt odpływu wystąpił w roku 2016 – 625 mm.

Reasumując, znaczna ilość dostarczanej wraz z opadami wody, która w 2020 roku była wyższa od średniej wieloletniej, tracona była na parowanie terenowe. Straty na

parowanie terenowe wskutek ciepłego 2020 roku mogły wynosić około 380-400 mm rocznie (Awłasiewicz 1953). Większy deficyt wodny w większości zlewni może świadczyć o potencjalnej odbudowie zasobów wodnych po suchych latach 2018 i 2019. Sytuacja byłaby jeszcze korzystniejsza, gdyby nie wysokie temperatury wzmagające ewapotranspirację.

Tab. 18. Miesięczne wysokości warstwy opadu i odpływu [mm] oraz skróconego bilansu wodnego [mm] w 2020 roku hydrologicznym w zlewniach ZMŚP

Stacja (zlewnia)	P Opad atmosferyczny	H _{pow} Odpływ powierzchniowy	S Deficyt odpływu P-H _{pow}
	[mm]		
Wolin (Lewińska Struga)	477,5	52,7	424,8
Parsęta (Parsęta)	656,6	230,9	425,7
Wigry (Czarna Hańcza)	517,2	161,7	355,5
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	578,0	98,5	479,5
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	592,8	20,9	571,9
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	707,2	0,0	707,2
Łysogóry (Wieniec)	811,6	18,5	793,1
Roztocze (Świerszcz)	737,4	11,9	725,5
Beskid Niski (Bystrzanka)	894,6	268,5	626,1
Karkonosze (Wrzosówka)	1123,6	740,2	383,4

Generalnie we wszystkich badanych zlewniach w 2020 roku, warunki do odbudowy zasobów wodnych były umiarkowane. W odróżnieniu do suchych lat 2018 i 2019, 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).

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).

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 rzeczny. 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 rzeczno 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 fizyczno-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

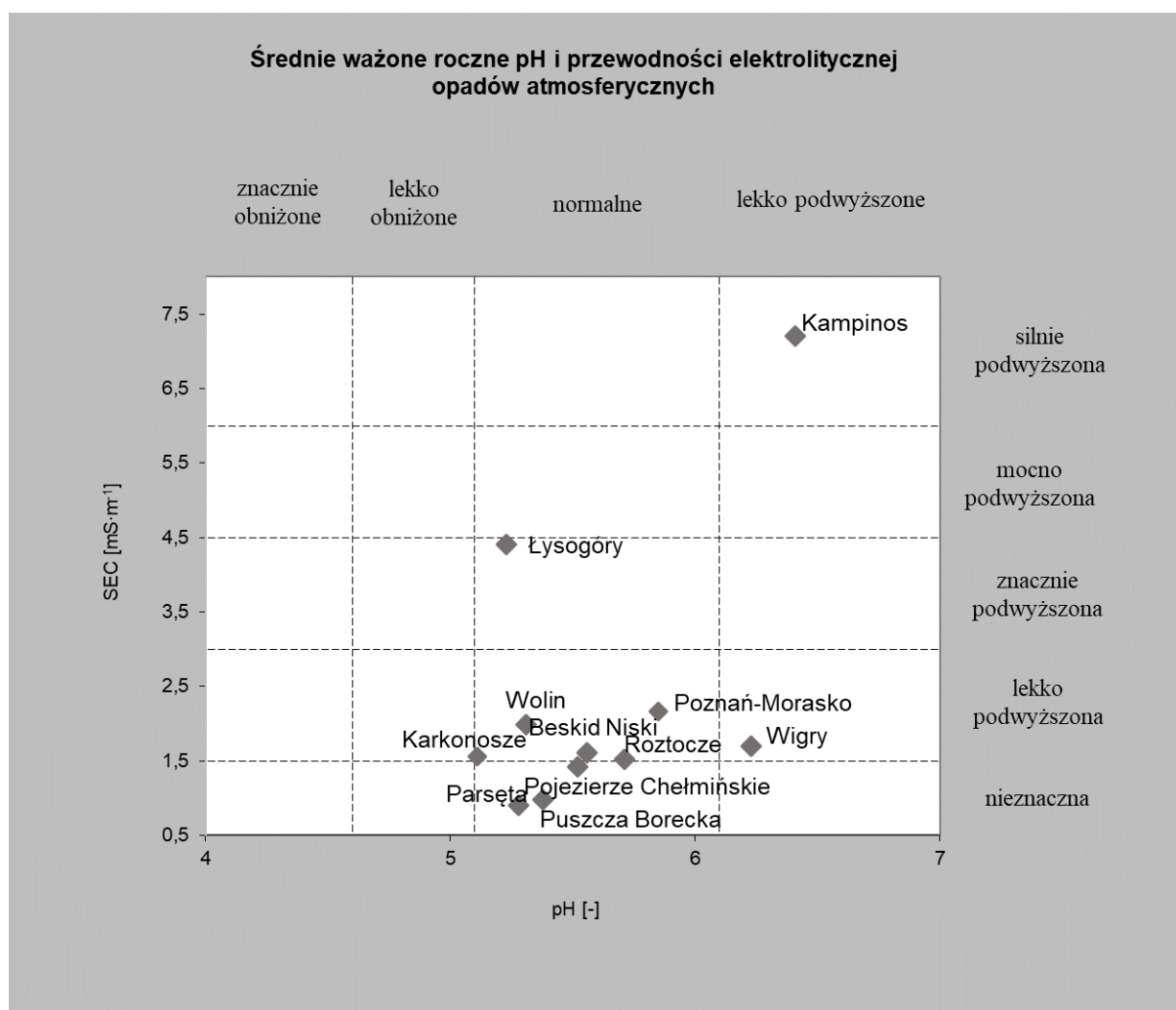
Wskaźnik ten został określony na podstawie tzw. klasyfikacji austriackiej jakości opadów atmosferycznych (Jansen i in. 1988). Ze względu na jego dużą przydatność do oceny odczynu i przewodności elektrolitycznej opadów atmosferycznych został wprowadzony do obligatoryjnego stosowania w sprawozdaniach Stacji 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 2020 roku przedstawiono na rycinie 12.

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

średnia roczna ważona przewodność elektrolityczna SEC [$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$]	klasa przewodności wód opadowych
SEC $\leq$ 1,5	nieznaczną
1,5 < SEC $\leq$ 3,0	lekko podwyższona
3,0 < SEC $\leq$ 4,5	znacznie podwyższona
4,5 < SEC $\leq$ 6,0	mocno podwyższona
6,0 < SEC $\leq$ 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 $\leq$ 4,1	silnie obniżony
4,1 < pH $\leq$ 4,6	znacznie obniżony
4,6 < pH $\leq$ 5,1	lekko obniżony
5,1 < pH $\leq$ 6,1	normalny
6,1 < pH $\leq$ 6,5	lekko podwyższony
pH > 6,5	znacznie podwyższony



Ryc. 15. Klasyfikacja pH i SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku

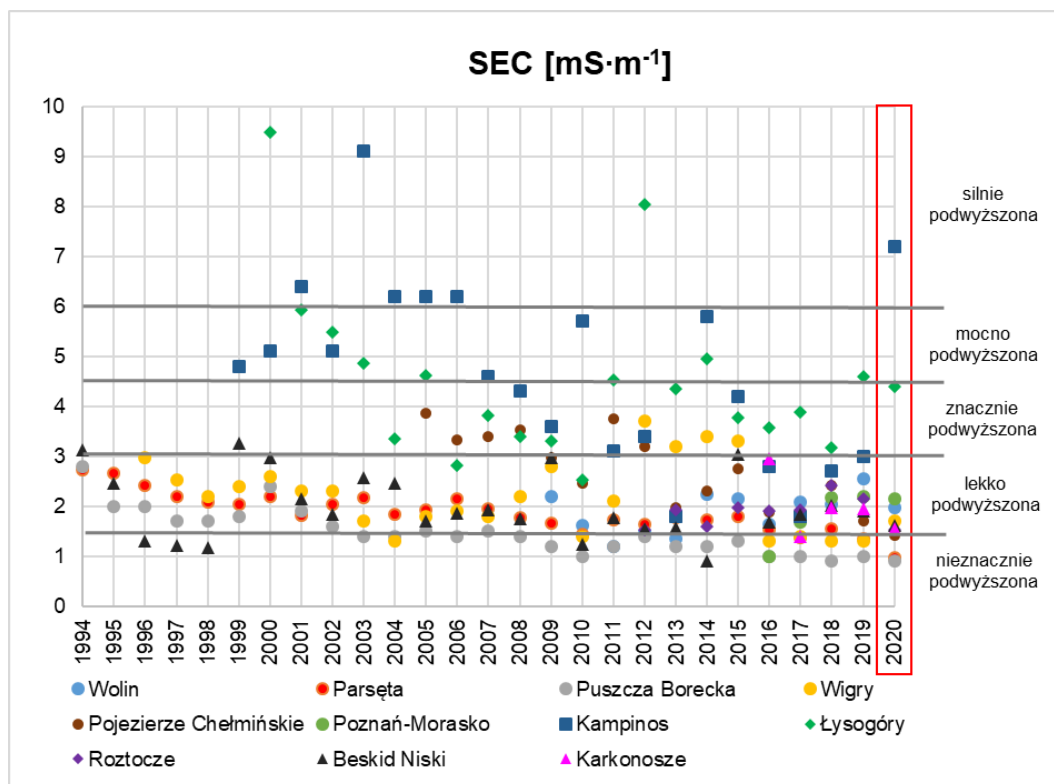
Wskaźnik klasyfikacji SEC opadów atmosferycznych w 2020 roku hydrologicznym w zakresie średniej ważonej przewodności elektrolitycznej (Ryc. 15) charakteryzował się następującymi właściwościami:

- przewodność nieznaczną stwierdzono w 3 Stacjach: Parsęta, Puszcza Borecka i Pojezierze Chełmińskie;
- przewodność lekko podwyższoną stwierdzono w 6 Stacjach: Wolin, Wigry, Poznań-Morasko, Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze;
- przewodność znacznie podwyższoną stwierdzono w Stacji Łysogóry;
- przewodność silnie podwyższoną stwierdzono w Stacji Kampinos.

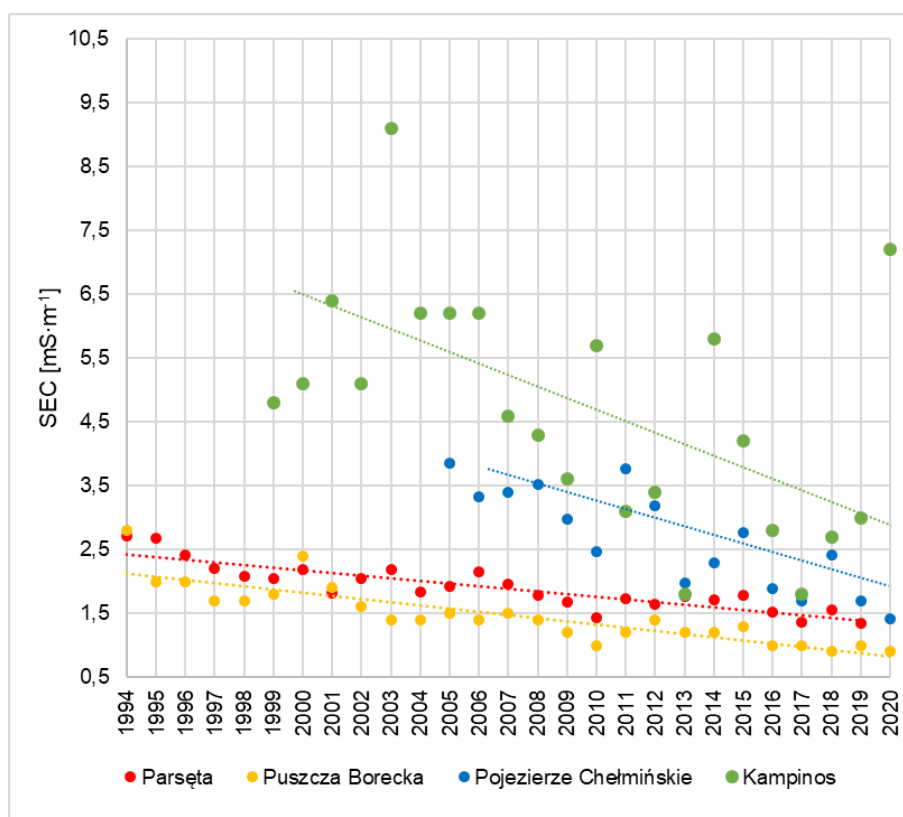
Jakość opadów atmosferycznych w 2020 roku pod względem wskaźnika SEC w porównaniu z ubiegłym rokiem w większości stacji pozostała na podobnym poziomie. Poprawie uległa jakość opadów w Stacji Pojezierze Chełmińskie (zakwalifikowana do klasy

nieznacznie podwyższonej przewodności), nieznacznemu pogorszeniu uległa jakość opadów w Wigrach (zakwalifikowana do klasy lekko podwyższonej przewodności). Jakość opadów atmosferycznych nieznacznie poprawiła się również w Stacji Łysogóry, która została zakwalifikowana do klasy znacznie podwyższonej (w roku 2019 była to klasa mocno podwyższona). Zdecydowanemu pogorszeniu uległa jakość opadów atmosferycznych w Kampinosie, gdzie po raz pierwszy od 2006 roku stwierdzono silnie podwyższoną przewodność. Z kolei biorąc pod uwagę wszystkie monitorowane zlewnie, przewodność silnie podwyższona wystąpiła po raz pierwszy od 2012 roku. 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. Na wyjątkowo wysoką przewodność w Kampinosie wpłynęła m.in. duża mineralizacja opadów w styczniu oraz maju. 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 (pomimo anormalnie wysokiej przewodności w 2020 roku). Trend 10. letni spadku SEC wynosi od $0,36 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ na Pojezierzu Drawskim (Parsęta) do $1,30 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ na Pojezierzu Chełmińskim (Ryc. 17).



Ryc. 16. Zmienność czasowa SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym na tle wielolecia



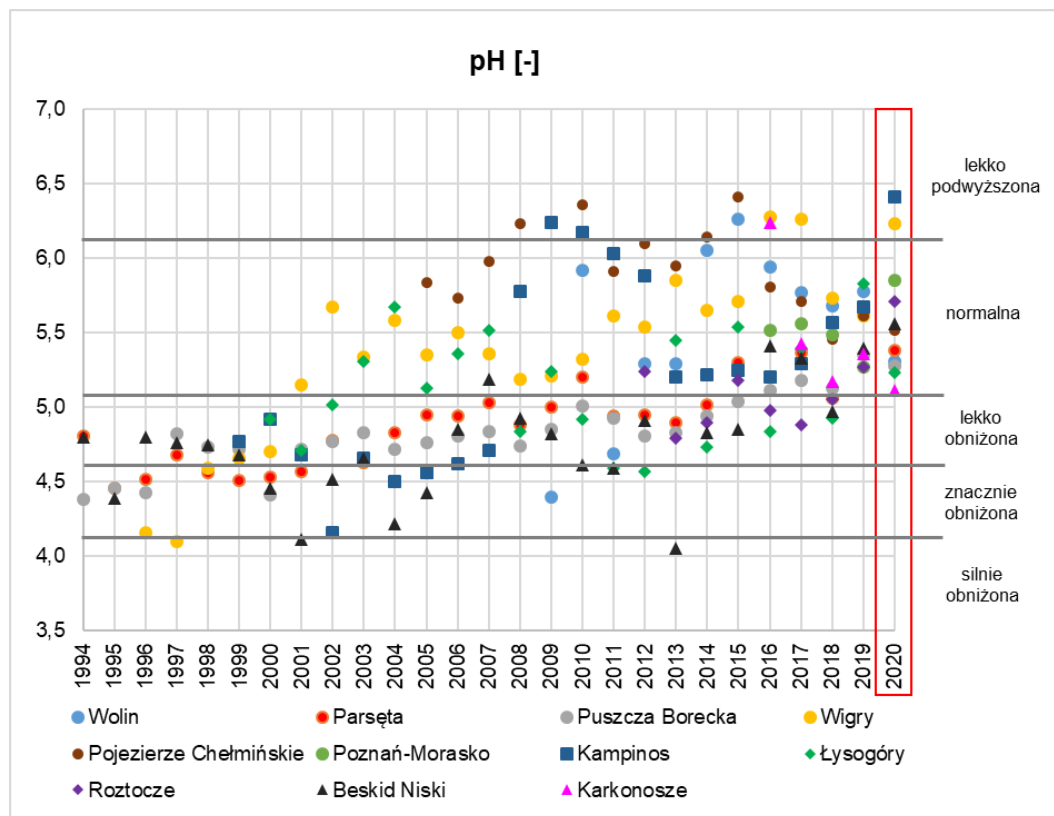
Ryc. 17. Istotne statystycznie trendy spadku SEC w opadach atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP – Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie i Kampinos

Klasyfikacja odczynu opadów atmosferycznych w 2020 roku hydrologicznym (Ryc. 15) charakteryzowała się następującymi właściwościami:

- pH lekko podwyższone stwierdzono w 2 Stacjach: Wigry i Kampinos;
- pH normalne stwierdzono w pozostałych 9 Stacjach: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko, Łysogóry, Roztocze, Beskid Niski i Karkonosze

W odniesieniu do 2019 roku odczyn opadów w 2020 roku uległ pewnemu pogorszeniu. W roku 2019 we wszystkich Stacjach ZMŚP stwierdzono pH normalne, a w 2020 pH lekko podwyższone stwierdzono w Wigrach i w Kampinosie. Jednak w porównaniu z latami wcześniejszymi, jakość opadów się poprawiła, ponieważ drugi rok z rzędu w żadnej stacji opady atmosferyczne nie zostały zaliczone do klasy lekko obniżonego pH (Ryc. 18).

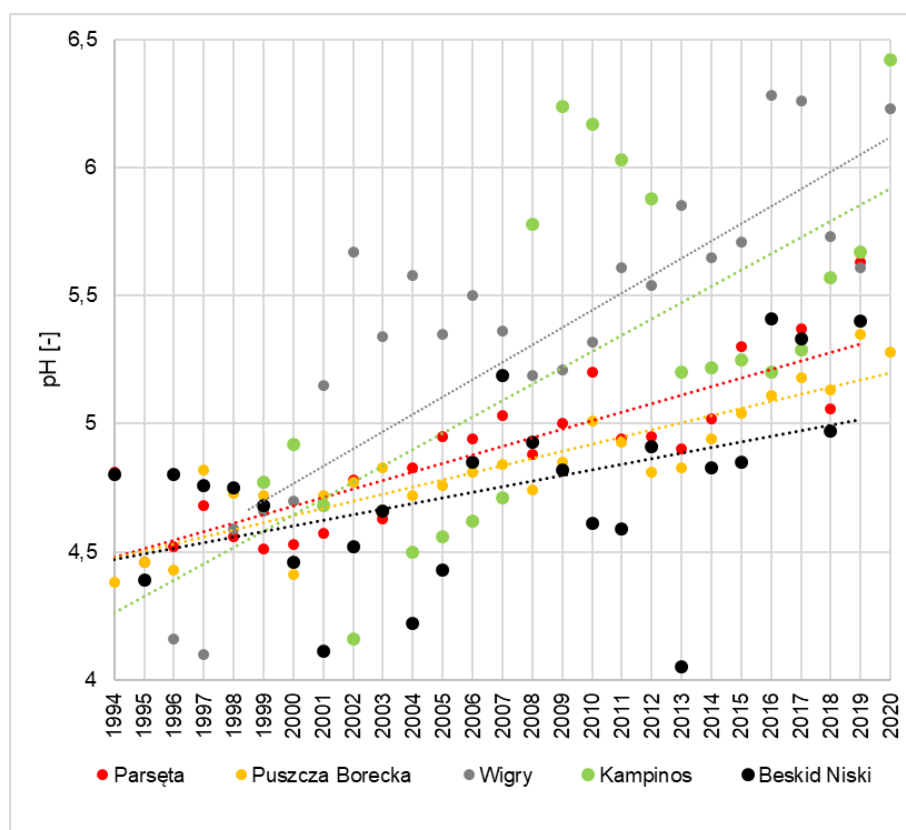
Zmienność czasowa odczynu wód opadowych wykazuje korzystną tendencję do zmniejszania zakwaszenia opadów – wzrostu wartości pH w Stacjach Bazowych ZMŚP. Istotny statystycznie trend wzrostu pH opadów ($p < 0,05$) odnotowano dla 5 Stacji Bazowych: Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Kampinos i Beskid Niski. Trend 10. letni spadku kwasowości wynosi od 0,22 pH w Beskidzie Niskim do 0,63 pH w Kampinosie (Ryc. 19).



Ryc. 18. Zmienność czasowa kwasowości opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 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 2020 roku jakość atmosferycznej dostawy wody do badanych zlewni była dobra. W 2020 roku opady miały raczej niską mineralizację i wysoki odczyn. Mała koncentracja substancji rozpuszczonych i niska kwasowość opadów w 2020 roku w większości geosystemów (poza położonymi w Polsce centralnej zlewniami Kanału Olszowieckiego i Wieńca) 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:

$$\text{WCK} = \text{SJ NO}_3^- / \text{SJ SO}_4^{2-} [-]$$

gdzie:

WCK – wskaźnik czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów;

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

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

Zmiany zachodzące w chemizmie wód opadowych, podziemnych i powierzchniowych upoważniają do wykorzystywania tego wskaźnika kwasogenności 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.

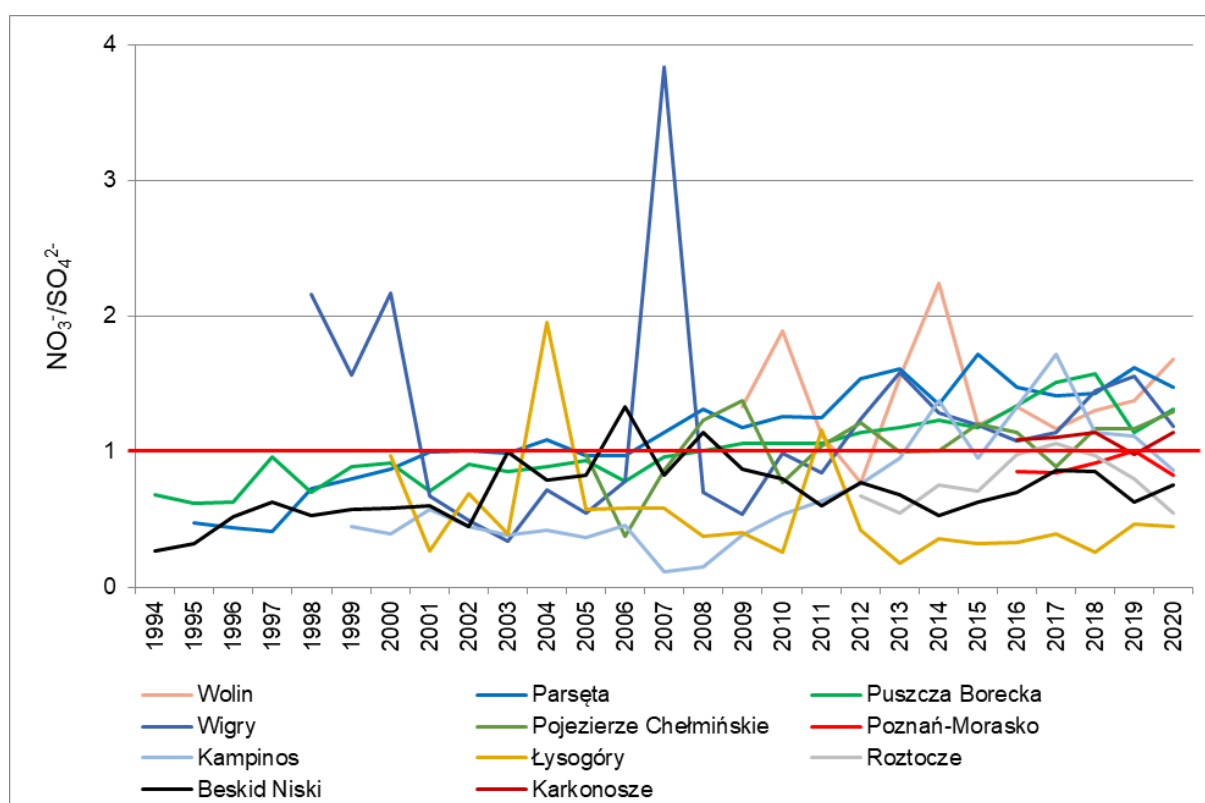
Za kwasowość opadów atmosferycznych w około 60-70% odpowiada dwutlenek siarki, zaś tlenki azotu za pozostałe 30-40% (Isidorow, Jaroszyńska 1998).

Zmienność czasowa wskaźnika udziału czynników kwasogennych dla Stacji Bazowych ZMŚP wykazuje w badanym wieloleciu 1994-2020 (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 2020 roku udział NO_3^- w zakwaszaniu opadów, który stwierdzono w 6 stacjach położonych w północnej i zachodniej Polsce: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie i Karkonosze;
- większy w 2020 roku udział SO_4^{2-} w zakwaszaniu opadów stwierdzono w 5 stacjach położonych w Polsce południowej i południowowschodniej: 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 południowowschodniej. W porównaniu z rokiem 2019, w roku 2020 zmiany nastąpiły na 3 stacjach. Wskaźnik obrał wartości poniżej 1 (większy udział SO_4^{2-} w zakwaszaniu opadów) w dwóch stacjach położonych w granicach lub pobliżu dużych aglomeracji miejskich: Poznań-Morasko i Kampinos. Odwrotna sytuacja miała miejsce w Karkonoszach, gdzie stwierdzono większy udział NO_3^- w zakwaszaniu opadów (wskaźnik obrał wartość nieznacznie poniżej 1). W przypadku Poznania i Karkonoszy jest to powrót do zależności z lat wcześniejszych (2016-2018). 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 1994-2020

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 chlorków i sodu. 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 chlorków i sodu jest stosunkowo małe (poniżej $5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$). 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 chlorku i sodu powinny występować w nadmorskiej strefie nizinnej, na pobrzeżu Bałtyku (Stacja Bazowa Wolin). Niższe stężenia Na^+ i Cl^- w opadach powinny cechować strefę pojezierną Nizy 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 chlorków i sodu w wodach opadowych w 2020 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 chlorków i sodu wyznaczono także w transekcie równoleżnikowym, w strefie młodoglacjalnej Nizy 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 2020 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 $1,57$ i $0,96 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$). W miarę oddalania się od strefy nadmorskiej stężenie

tych jonów mało i wynosiło: w strefie pojezierzy (Parsęta, Puszcza Borecka, Wigry, Pojezierze Chełmińskie i Poznań-Morasko) Cl^- 0,58 i Na^+ 0,31 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i w strefie nizin (Kampinos) Cl^- 0,50 i Na^+ 0,10 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W transekcie równoleżnikowym strefy młodoglacjalnej Niżu Polskiego występował spadek stężenia zarówno chlorków, jak i sodu w opadach – odpowiednio od 1,57 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i 0,96 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w Wolinie, poprzez 0,72 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i 0,43 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zlewni górnej Parsęty oraz 0,40 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i 0,15 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w Puszczy Boreckiej do 0,30 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i 0,13 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w Wigrach.

Średnie stężenia jonów chlorkowych i sodowych w strefie wyżynnej (1,76 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i 0,39 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) były wyższe od występujących w strefie nizinnej i pojeziernej. Stężenie jonów chlorkowych były nawet wyższe niż w regionie nadmorskim, dotyczy to zwłaszcza charakterystyki opadów w Górach Świętokrzyskich. 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 północnozachodniego 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 2020 roku

Stacja ZMŚP	Strefa krajobrazowa	S-SO ₀	N-NO ₃	N-NH ₄	Cl	Na	K	Mg	Ca
		[$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]							
Wolin	nadmorska	0,53	0,78	0,52	1,57	0,96	0,36	0,15	0,55
Parsęta	pojezierzy	0,21	0,27	0,39	0,72	0,43	0,07	0,06	0,31
Puszcza Borecka		0,27	0,31	0,53	0,40	0,15	0,06	0,04	0,18
Wigry		0,26	0,27	0,52	0,30	0,13	0,06	0,05	0,29
Pojezierze Chełmińskie		0,31	0,35	0,68	0,60	0,22	0,23	0,16	0,66
Poznań-Morasko		0,54	0,39	0,65	0,89	0,63	0,33	0,13	0,99
Kampinos	nizin	0,40	0,30	0,70	0,50	0,10	0,10	0,10	0,50
Łysogóry	wyżyn	2,98	1,16	1,38	4,35	1,34	1,18	0,88	3,18
Roztocze		0,50	0,24	0,21	0,44	0,10	0,11	0,07	1,75
Beskid Niski	gór średnich	1,11	0,73	0,40	0,79	0,54	0,40	0,24	1,42
Karkonosze		0,26	0,26	0,41	0,26	0,13	0,03	0,02	0,07

W zachodnim transekcie południkowym, podobnie jak w latach poprzednich, stwierdzono wyraźny spadek stężenia jonów sodowych i chlorkowych, od pasa nadmorskiego (Wolin $1,56 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,96 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$), poprzez pas pojezierzy (Parsęta $0,72 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,43 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$, Poznań-Morasko $0,89 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,63 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$) do pasa gór średnich (Karkonosze $0,26 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,13 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$). 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 $4,35 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $1,34 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$) i gór średnich (Beskid Niski $0,79 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,54 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$), a niższe w strefie pojezierzy (Pojezierze Chełmińskie $0,60 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,22 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$) i nizin (Kampinos $0,50 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,10 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$). We wschodnim transekcie południkowym, stężenia jonów chlorkowych i sodowych również były wyższe w pasie wyżyn (Roztocze $0,44 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,10 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$), a niższe w strefie pojezierzy (Wigry $0,30 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,13 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$ i Puszcza Borecka $0,40 \text{ mg Cl}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,15 \text{ mg Na}\cdot\text{dm}^{-3}$). Wyższe stężenia jonów chlorkowo-sodowych w Polsce południowo-wschodniej może 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, nawet stężenia chlorków w Stacji Łysogóry nie przekraczały wartości $5 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Analiza średniego stężenia substancji rozpuszczonych w wodach opadowych w 2020 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, sól, wapń, wodorowęglany).

W 2020 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 2020 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	I	I	I	I	I	I	I	I	III	I	zadowalająca	dobry
Puszcza Borecka	I	II	III	I	I	I	I	III	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	II	II	II	I	I	zadowalająca	dobry
Kampinos	I	II	III	I	I	I	I	II	I	I	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). Generalna poprawa jakości wód podziemnych w roku 2019 (w stosunku do roku 2018) była krótkotrwała, ponieważ w roku 2020 (w porównaniu z 2019 rokiem) zmniejszyła się liczba zlewni, w których jakość wód podziemnych oceniono jako dobrą, a zwiększyła się liczba zlewni, w których jakość wód podziemnych oceniono jako zadowalającą. W związku z większym stężeniem jonów azotanowych w zlewni górnej Parsęty oraz większym stężeniem jonów wodorowęglanowych w zlewni Strugi Toruńskiej, wody podziemne w tych zlewniach zakwalifikowano do niższej klasy jakości wody niż 2019 r. Pogorszeniu uległy również wody na Wolinie (NO₃), w Wigrach (SO₄) oraz w Beskidzie Niskim (NO₃). Z kolei poprawiły się wody w Kampinosie (HCO₃), nie wpłynęło to jednak na klasyfikację wód w tych zlewniach.

6.3. Wody powierzchniowe

Stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych i klasyfikacja elementów fizykochemicznych wód powierzchniowych

W 2020 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. Ponadto w Kanale Olszowieckim nie zanotowano przepływu, a próbki pobierano z wody stojącej, co skutkowało zagęszczeniem niektórych składników, a przede wszystkim wyższą przewodnością elektrolityczną i słabym natlenieniem. Z tego powodu w analizie składu chemicznego i jakości wód powierzchniowych pominięto również Kanał Olszowiecki.

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 2020 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 (Parsęta, Struga Toruńska, Świerszcz);
- wodorowęglanowo-siarczanowo-wapniowo-magnezowy (Bystrzanka);
- wodorowęglanowo-wapniowych (Lewińska Struga);
- wodorowęglanowo-wapniowo-sodowych (Czarna Hańcza);
- wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowych (Różany Strumień);
- siarczanowo-wapniowych (Wieniec w Górach Świętokrzyskich);
- siarczanowo-wodorowęglanowo-wapniowo-sodowych (Wrzosówka w Karkonoszach).

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 2020 roku cechowała się dużym zróżnicowaniem przestrzennym (Tab. 23). Mineralizacja wody w 2020 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 geosystemach. Najwyższa przewodność elektrolityczna właściwa występowała w Różanym Strumieniu 90,01 mS·m⁻¹ i Strudze Toruńskiej 77,30 mS·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 2,40 mS·m⁻¹. W strefie wyżynnej (średnia mineralizacja 16,87 mS·m⁻¹) i górskiej (średnia mineralizacja 14,60 mS·m⁻¹) odpływ wody ze zlewni jest szybszy i udział nisko zmineralizowanych wód opadowych w systemie rzeczonym jest największy. W pozostałych monitorowanych ciekach nizinnych (Lewińska Struga, Parsęta i Czarna Hańcza) wartość SEC wynosiła od 34,79 do 59,65 mS·m⁻¹ (Tab. 23). Zmienność przestrzenna wartości SEC w 2020 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 2020 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 cieki górskie (Wrzosówka i Wieniec) posiadały odczyn bardziej kwaśny, poniżej 6 pH. Kwaśny odczyn w tych ciekach nie był jednak wynikiem zanieczyszczenia antropogenicznego, ale był efektem specyficznej 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 niektórych zlewniach (np. Lewińska Struga, Wieniec).

Tab. 23. Średnie stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych w zlewniach ZMŚP w 2020 roku

Stacja (zlewnia)	Strefa krajobrazowa	S-SO ₄	N-NO ₃	N-NH ₄	Cl	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	SEC	pH
		[mg·dm ⁻³]									[mS·m ⁻¹]	[-]
Wolin (Lewińska Struga)	nadmorska	11,06	0,10	0,15	17,18	12,02	2,58	6,28	55,10	160,43	34,79	7,84
Parsęta (Parsęta)	pojezierzy	10,73	1,58	0,29	7,18	5,88	2,10	5,15	73,72	204,63	39,10	8,07
Wigry (Czarna Hańcza)		9,30	1,46	0,09	30,33	25,98	8,11	14,77	79,04	289,46	59,65	8,37
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)		33,10	0,61	0,13	59,30	27,20	8,75	18,40	115,00	258,00	77,30	7,90
Poznań-Morasko (Różany Strumień)		27,39	0,94	0,04	76,55	44,09	4,67	13,02	130,30	329,98	90,01	7,88
Kampinos (Kanał Olszowiecki)	nizin	brak odpływu										
Łysogóry (Wieniec)	wyżyn	18,80	0,71	0,34	14,64	11,34	8,73	1,02	21,46	8,21	8,59	5,83
Roztocze (Świerszcz)		4,35	0,13	0,08	2,71	1,96	1,11	1,46	50,83	135,30	25,15	7,38
Beskid Niski (Bystrzanka)	gór średnich	12,07	1,51	0,04	9,42	15,00	4,71	6,64	51,20	165,40	26,80	7,52
Karkonosze (Wrzosówka)		1,86	0,17	0,05	0,92	1,53	0,28	0,36	1,54	2,67	2,40	5,69

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 Podgórznej 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 sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. W zlewniach ZMŚP w 2020 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. W 2020 roku dla pięciu cieków (dwóch górskich – Bystrzanka i Wrzosówka; dwóch nizinnych – Lewińska Struga i Parsęta oraz jednego położonego w strefie wyżyn – Wieniec) stwierdzono bardzo dobrą jakość wody (I klasa). Dobłą jakością (II klasa) charakteryzował się Świerszcz położony na Roztoczu. Pozostałe trzy cieki (Czarna Hańcza, Struga Toruńska i Różany Strumień) 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. 2021).

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 2020 roku pozwoliła na zakwalifikowanie jezior: Gardno (Stacja Wolin), Czarne (Stacja Parsęta), Łękek (Stacja Puszcza Borecka) oraz Kamionkowskiego (Stacja Pojezierze Chełmińskie) do bardzo dobrej klasy jakości wody (Tab. 25).

Tab. 24. Jakość wód płynących w 2020 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-NO ₃	N-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	III-V	III-V	III-V	III-V	1	III-V	I	2	1	III-V	poniżej dobrego
Pojezierze Chełmińskie (Struga Toruńska)	1	1	1	1	III-V	III-V	III-V	2	III-V	III-V	III-V	2	III-V	poniżej dobrego
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	1	1	1	1	III-V	III-V	1	1	III-V	1	1	1	III-V	poniżej dobrego
Łysogóry (Wieniec)	1	1	1	III-V	1	1	1	1	1	1	1	1	1 bardzo 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	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1 bardzo dobra	dobry
Karkonosze (Wrzosówka)	1	1	1	III-V	1	1	1	1	1	1	1	1	1 bardzo dobra	dobry

Tab. 25. Jakość wód stojących w 2020 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. Chelmińskie 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. 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 2020 roku w żadnym z monitorowanych cieków nie stwierdzono przekroczenia progowej wartości stężenia fosforu ogólnego P_{og} , $0,25 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (Tab. 26). W przypadku azotu azotanowego N-NO_3 , utrzymała się pozytywna sytuacja z 2019 roku, kiedy to zanotowano niższe niż w poprzednich latach stężenia w dwóch zlewniach podlegających silniejszej antropopresji (Strugi Toruńskiej i Różanego Strumienia). W związku z powyższym, w żadnym monitorowanym cieku dopuszczalne stężenia ($2,2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) nie zostały przekroczone.

Tab. 26. Wskaźniki eutrofizacji rzek w Stacjach ZMŚP w 2020 roku

Stacja – ciek	P_{og} [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$]	N-NO_3^- [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$]	NO_3^- [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$]
Wolin – Lewińska Struga	0,005	0,10	0,44
Parsęta – Parsęta	0,052	1,58	6,95
Wigry – Czarna Hańcza Ujście	0,235	1,46	6,42
Poj. Chełmińskie – Struga Toruńska	0,033	0,61	2,68
Poznań-Morasko – Różany Strumień	0,025	0,94	4,14
Łysogóry – Wieniec	0,002	0,71	3,12
Roztocze – Świerszcz Malowany Most	0,046	0,13	0,57
Beskid Niski – Bystrzanka	0,088	1,51	6,64
Karkonosze – Wrzosówka	0,006	0,17	0,75

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 stężenia fosforu ogólnego P_{og} powyżej $0,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Powyższa wartość progowa, podobnie jak w latach wcześniejszych, w 2020 roku nie została przekroczona w żadnym z badanych jezior (Tab. 27), a zatem nie stwierdzono zagrożenia eutrofizacją badanych jezior.

Tab. 27. Wskaźniki eutrofizacji jezior w Stacjach ZMŚP w 2020 roku

Stacja jezioro	P _{og.} [mg·dm ⁻³]
Wolin – Jezioro Gardno	0,005
Parsęta – Jezioro Czarne	0,008
Puszcza Borecka – Jezioro Łękuk	0,031
Pojezierze Chełmińskie – Jezioro Kamionkowskie	0,017

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, sól, 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. 1994; 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 rzecznej jest przybliżonym odbiciem aktualnych procesów geochemicznych zachodzących na obszarze zlewni (Froehlich 1982; Kostrzewski, Pulina 1992; Kostrzewski i in. 1994; Tylkowski 2005; Szpikowska, Tylkowski 2006).

Bilans denudacyjny uwzględniający 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 2020 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 (SO₄, Cl, Na, Mg,

Ca) oraz dostawa biogeniczna (NO_3 , NH_4 , K). Analiza bilansu denudacyjnego została przeprowadzona dla zlewni eksperymentalnych od źródła cieków 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, a w roku 2020 w Kampinosie do całkowitego braku odpływu, dlatego bilans jonów denudacyjnych cechował się bilansem dodatnim, co było sytuacją anormalną.

Dla jonów biogenych 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 nutrieny wykorzystywane były w procesach związanych z rozwojem roślin i w niewielkim stopniu dostarczane były do wód gruntowych i dalej do cieków.

W 2020 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 denudacyjnych wystąpił również w zlewni Kanału Olszowieckiego w Kampinosie, co związane jest z brakiem odpływu fluwialnego w 2020 roku. Dodatni bilans jonów biogennych wystąpił w większości zlewni (np. Różany Strumień 10,0 kg·ha⁻¹, Świerszcz 12,3 kg·ha⁻¹, Wrzosówka 10,6 kg·ha⁻¹), poza zlewnią górnej Parsęty, w której dostawa biogenów z opadami atmosferycznymi była niższa niż ich odpływ systemem rzeczny (bilans -9,2 kg·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.

Tab. 28. Bilans jonów denudacyjnych i biogenicznych w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku

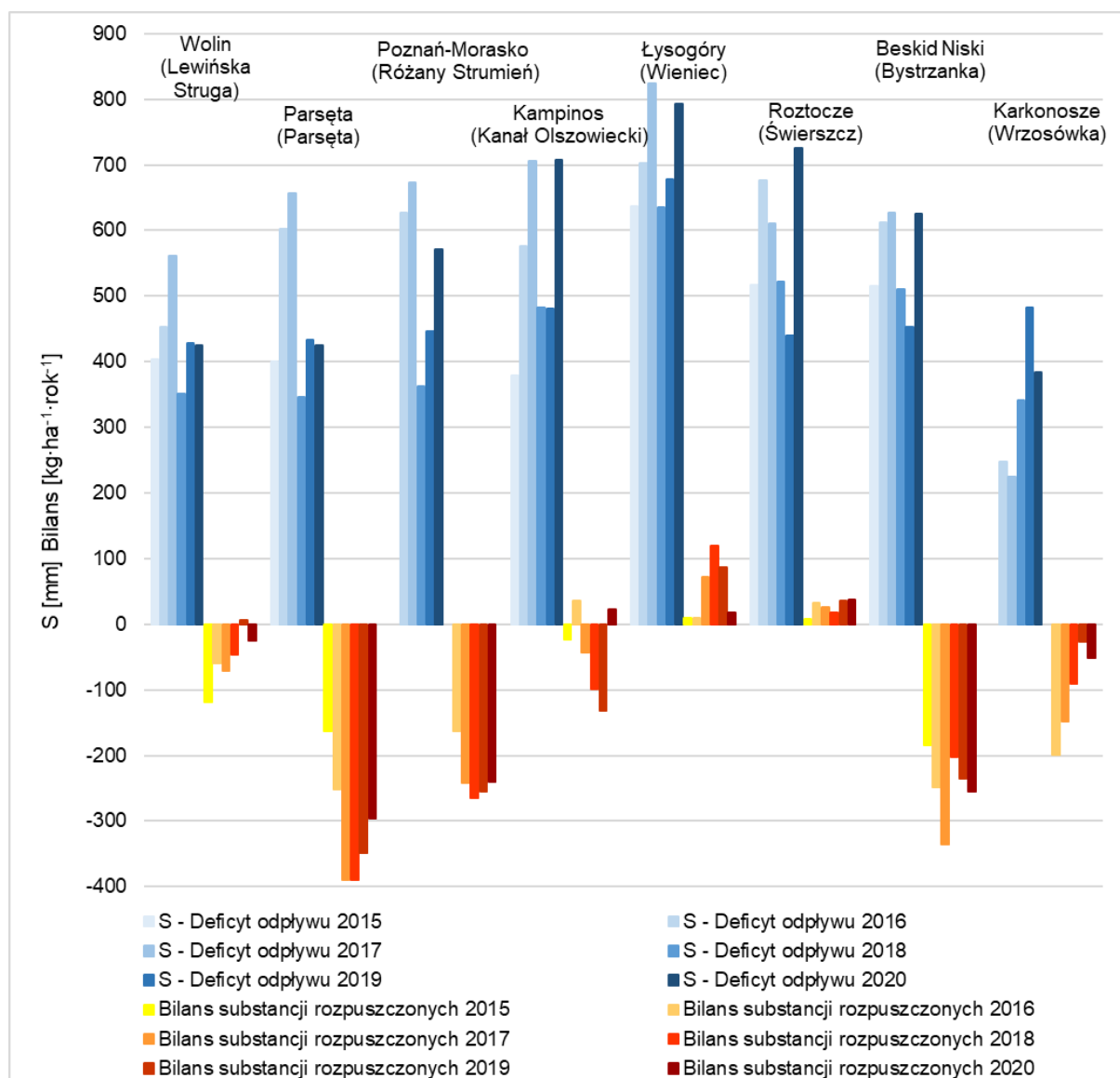
Stacja (zlewnia)	Wolin (Lewińska Struga)	Parsęta (Parsęta)	Poznań-Morasko (Różany Strumień)	Kampinos (Kanał Olszowiecki)	Łysogóry (Wieniec)	Roztocze (Świerszcz)	Beskid Niski (Bystrzanka)	Karkonosze (Wrzosówka)
Składowe obiegu wody [mm]								
P – Opad atmosferyczny	477,5	656,6	592,8	707,2	811,6	737,4	894,6	1123,6
H _{pow} – Odpływ powierzchniowy	52,7	230,9	20,9	0,0	18,5	11,9	268,5	740,2
S – Deficyt odpływu	425,2	425,7	571,9	707,2	793,1	725,5	626,1	383,4
Bilans jonów denudacyjnych [kg·ha⁻¹]								
SO ₄ ²⁻	-0,9	-74,2	-57,6	4,3	4,3	11,6	-67,7	-34,5
Cl ⁻	-0,1	-16,6	-56,3	2,2	3,4	3,5	-18,2	-4,2
Ca ²⁺	-24,6	-170,2	-95,6	2,6	4,8	9,3	-124,8	-11,1
Mg ²⁺	-2,3	-11,9	-9,6	0,4	0,2	0,5	-15,7	-2,6
Na ⁺	-0,9	-13,6	-30,6	0,7	2,6	0,6	-35,6	-10,3
Bilans JD	-28,8	-286,5	-249,7	10,2	15,3	25,4	-262,0	-62,7
Bilans jonów biogennych [kg·ha⁻¹]								
NO ₃ ⁻	0,9	-3,7	6,6	6,7	0,3	9,1	11,0	6,9
NH ₄ ⁺	2,0	-0,7	4,9	4,8	0,1	2,4	4,4	5,5
K ⁺	0,7	-4,8	-1,5	0,4	2,0	0,8	-9,0	-1,8
Bilans JB	3,6	-9,2	10,0	11,9	2,4	12,3	6,4	10,6
Bilans materii rozpuszczonej [kg·ha⁻¹]								
Bilans JD+JB	-25,2	-295,6	-239,7	22,1	17,7	37,7	-255,6	-52,1

Najniższe wartości całkowitego bilansu materii rozpuszczonej w 2020 r. (Tab. 28) stwierdzono w zlewniach podlegających największej dynamice energii (woda) i materii (substancje rozpuszczone): Parsęta $-295,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, Poznań Morasko $-239,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ i Beskid Niski $-255,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. W tych zlewniach obieg energii (wody) i materii (substancji rozpuszczonych) w 2020 roku był najmniej zaburzony w odniesieniu do prawidłowości wieloletniej. Odmierna, anormalna sytuacja wystąpiła w Kampinosie ($22,1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), Łysogórach ($17,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) i na Roztoczu ($37,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), gdzie całkowity bilans obiegu materii był dodatni. Dodatni bilans materii rozpuszczonej w tych zlewniach był skutkiem niskiego (lub jego braku) odpływu rzeczno, gdzie większość wody opadowej nie uczestniczyła w odpływie rzeczno. 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 rzeczno w okresie letnim. Niektóre zlewnie (np. Lewińska Struga, Różany Strumień), pomimo okresowego braku odpływu fluwialnego w półroczu letnim, posiadały ujemny bilans denudacyjny.

Analiza deficytu odpływu i dodatnia lub ujemna wartość bilansu denudacyjnego z ostatnich sześciu lat ukazuje geoeosystemy „stabilne” i „niestabilne” w zakresie obiegu energii (woda) i materii (substancje rozpuszczone) (Ryc. 21).

Za stabilne geoeosystemy uznano zlewnie o ujemnym kierunku bilansu denudacyjnego: Parsęta, Różany Strumień, Bystrzanka i Wrzosówka. W tych geoeosystemach pomimo różnych uwarunkowań meteorologicznych (lata 2015, 2018, 2019 suche, rok 2016 normalny lub wilgotny, rok 2017 wilgotny, a rok 2020 ponownie normalny lub wilgotny) ujemny kierunek bilansu denudacyjnego był zachowany, a coroczne różnice ilościowe nie były drastyczne. Z kolei za niestabilne uznano zlewnie o dodatnim bądź zmiennym kierunku bilansu denudacyjnego: Lewińska Struga, Kanał Olszowiecki, Wieniec i Świerszcz. W geoeosystemach 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 ciek. Natomiast w przypadku Świerszcza o relatywnie niskim odpływie wody decydowała duża „chłonność” zlewni (znaczna powierzchnię zajmują torfowiska) oraz działalność bobrów i obecność wielu zbiorników przepływowych (stawów) na ciek. W pozostałych geoeosystemach uznanych za niestabilne kierunek bilansu denudacyjnego w latach 2015-2020 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 jedynie w 2016 roku, w kolejnych trzech latach bilans systematycznie się zmniejszał, jednak w związku z brakiem odpływu fluwialnego w 2020 roku ponownie wystąpił bilans dodatni.



Ryc. 21. Deficyt odpływu wody i bilans substancji rozpuszczonych w zlewniach ZMŚP w latach 2015-2020

Wśród badanych geokosystemów można dokonać pewnej waloryzacji względnej, gdzie za wysokoenergetyczne można uznać zlewnie o średnim bilansie denudacyjnym $\geq \pm 100$ $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Do tych geokosystemów można zakwalifikować zlewnie: Parzęty, Bystrzanki i Różanego Strumienia. Zlewnię Wrzosówki można zaliczyć do typu umiarkowanego $\geq \pm 50$

$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, a zlewnie Świerszcza i Wieńca można zaliczyć do geoekosystemów niskoenergetycznych $\leq \pm 50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Z kolei zlewnie Lewińskiej Strugi i Kanału Olszowieckiego, ze względu na znaczną dynamikę rocznego bilansu materii rozpuszczonej, balansują na granicy geoekosystemu umiarkowanego ($\pm 50\text{-}100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) 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.

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 geoeekosystemów) na potencjalny stan przyrody ożywionej obejmuje charakterystykę m.in. występowania w 2020 roku termicznych pór roku i sezonu wegetacyjnego. Przedstawiono także syntetyczne wyniki realizacji programów ZMŚP w 2020 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

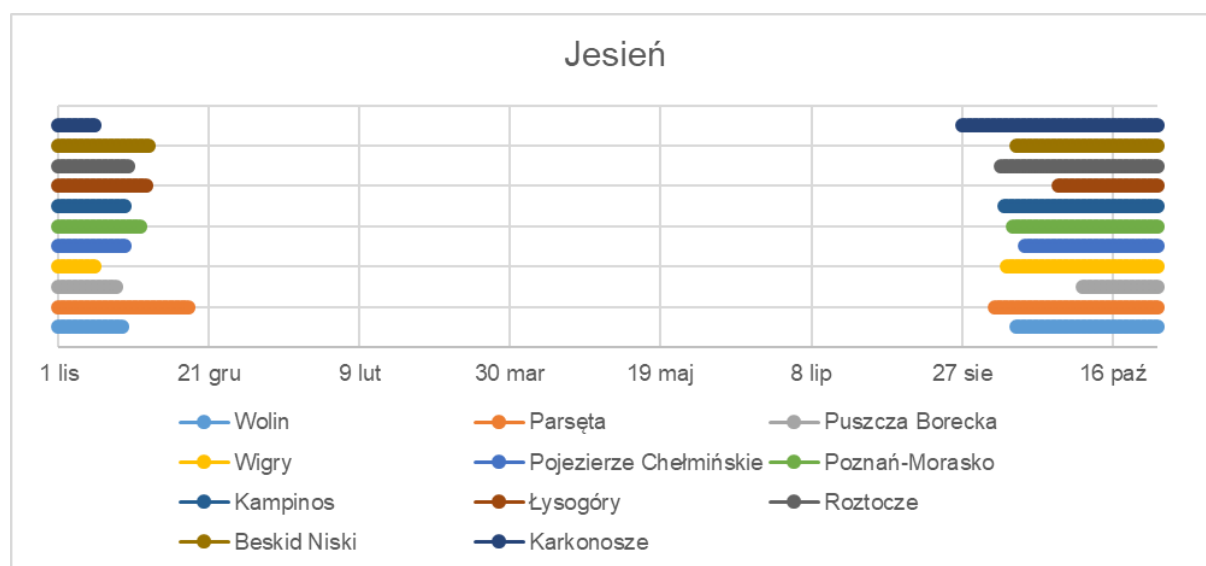
Wyjątkowe na tle wielolecia warunki cieplne w 2020 roku znalazły odzwierciedlenie w długości trwania poszczególnych termicznych pór roku. W ostatnich latach zauważalny był trend skracania czasu trwania termicznej zimy, a w roku 2019 termiczna zima nawet nie wystąpiła w dwóch stacjach (Wolin i Parsęta). Jednak w roku 2020 miała miejsce anomalna sytuacja, ponieważ występowanie termicznej zimy odnotowano w zaledwie dwóch stacjach (Puszcza Borecka i Łysogóry). Tylko w tych dwóch zlewniach stwierdzono występowanie wszystkich 6 termicznych pór roku. W pozostałych zlewniach ZMŚP stwierdzono występowanie 5 termicznych pór roku (Ryc. 22). Zdecydowanie najdłużej trwającą porą roku było lato (102 dni), jednak warto zwrócić uwagę, że było ono krótsze niż w roku 2019 (113 dni) i w roku 2018 (135 dni). Poza zimą, najkrócej trwającymi termicznymi porami roku były przedzime (52 dni) i przedwiosnie (62 dni). W porównaniu z latami wcześniejszymi długość trwania tych pór roku się wydłużyła, co jednak spowodowane jest brakiem zimy w większości zlewni.

W 2020 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 północnowschodniej – 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

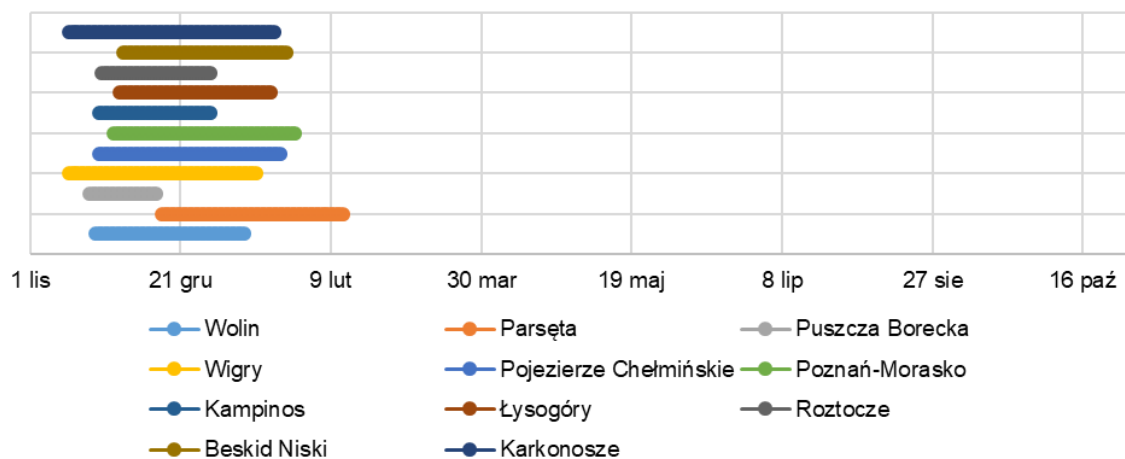
termicznych pór roku i terminach ich występowania. W Karkonoszach było najkrótsze lato (53 dni). Z kolei chłodne pory roku, z temperaturą niższą bądź równą 5°C (przedzimy, zima i przedwiośnie) łącznie najdłużej trwały w Wigrach (140 dni), Puszczy Boreckiej (137 dni), Karkonoszach (137 dni) i Łysogórach (128 dni) (Ryc. 23).

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 większości badanych zlewni (poza Parsętą, i Łysogórami) termiczna wiosna rozpoczęła się w marcu. Na Wolinie wiosna rozpoczęła się najwcześniej, 8 marca, z kolei najpóźniej rozpoczęła się w Puszczy Boreckiej (8 kwietnia) i w zlewni górnej Parsęty (15 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. W poprzednich latach stwierdzono ponad dwukrotnie dłuższy średni czas trwania termicznego lata niż średni czas trwania zimy. W roku 2020 lata średnio trwało (102 dni) niewiele krócej niż przedzimy, zima i wiosna razem (123 dni). Jednakże w ostatnich latach taka sytuacja jest typowa dla klimatu Polski.

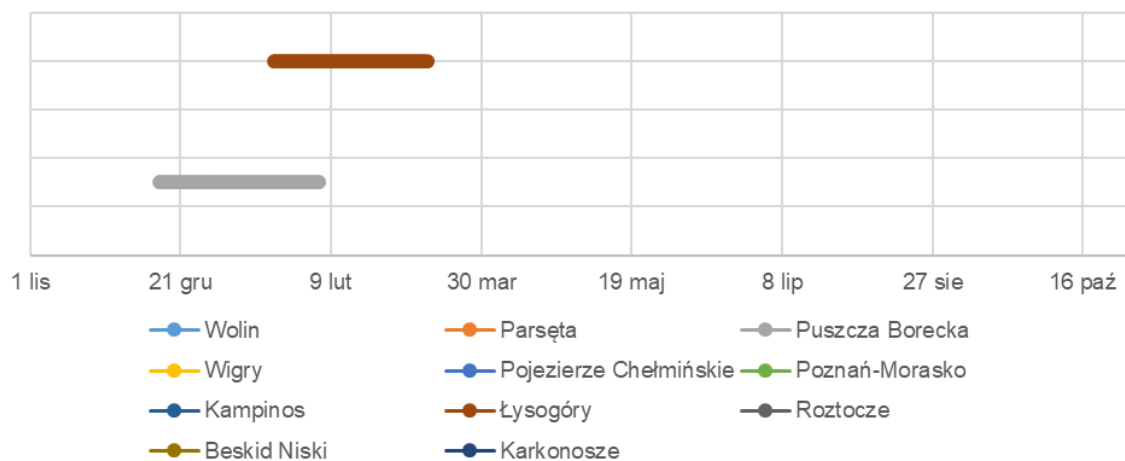
Reasumując, można stwierdzić, że występowanie termicznych pór roku (czas trwania, daty początku wiosny i końca jesieni) były sprzyjające dla przyrody ożywionej oraz przełożyły się na dogodne warunki występowania sezonu wegetacyjnego i okresu dojrzewania roślin.



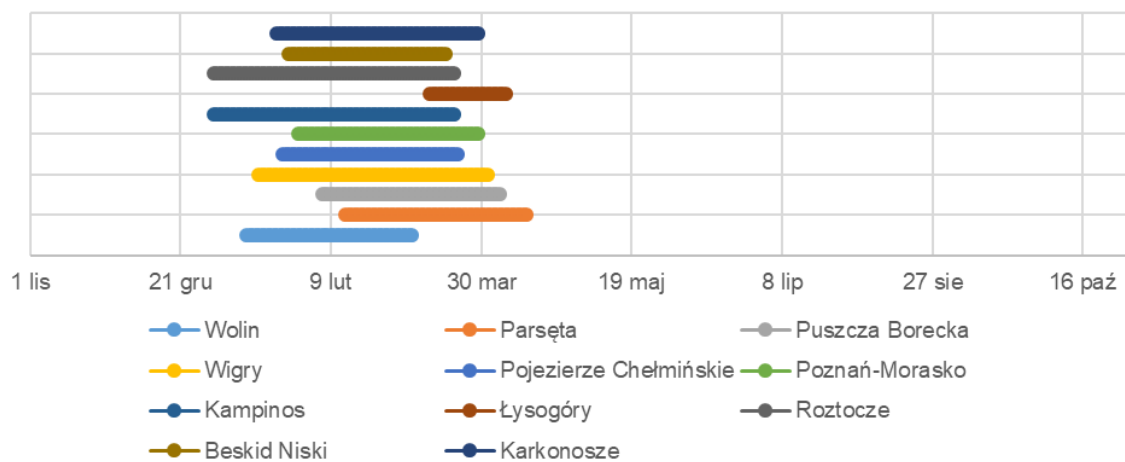
Przedzimie

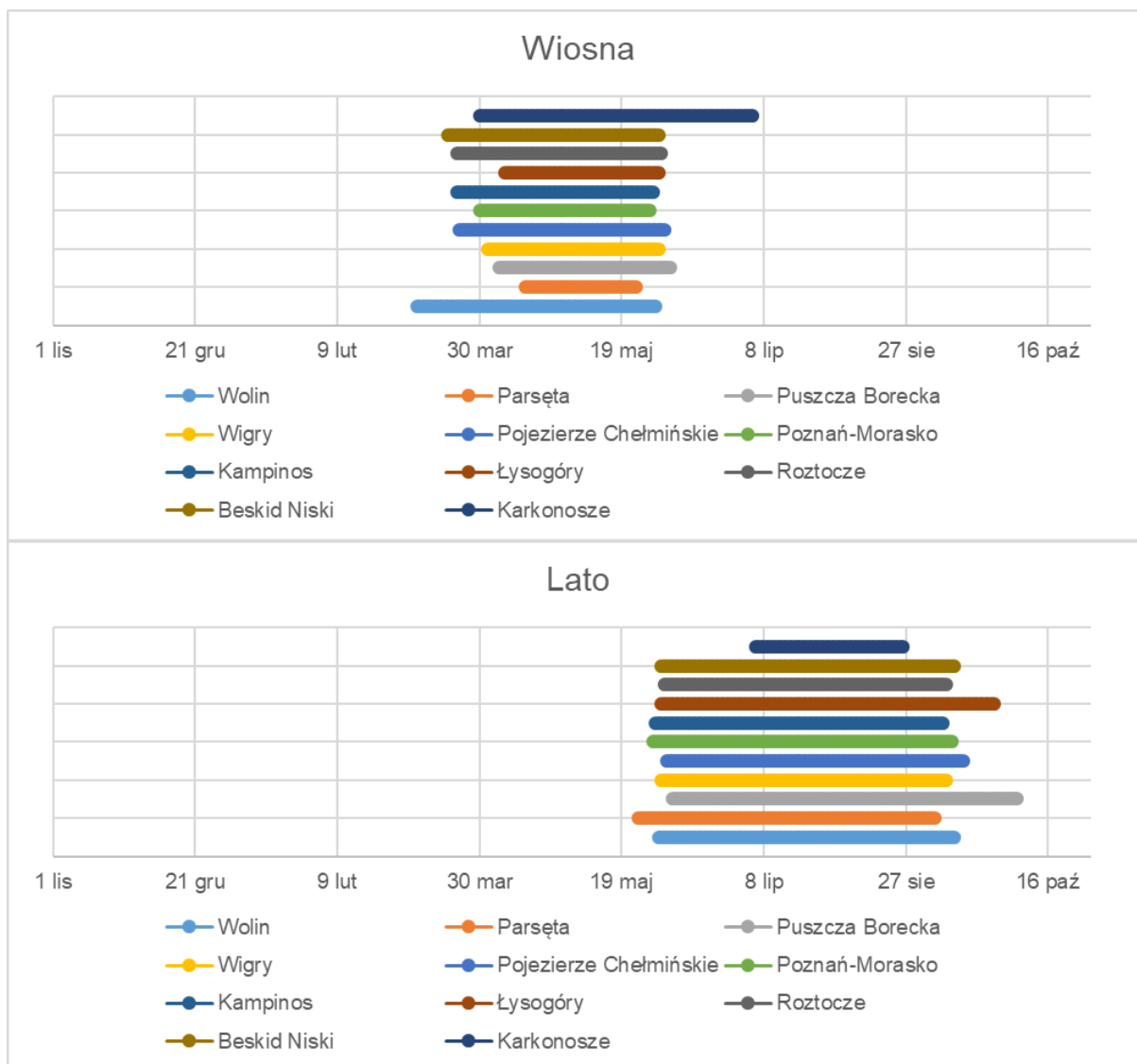


Zima

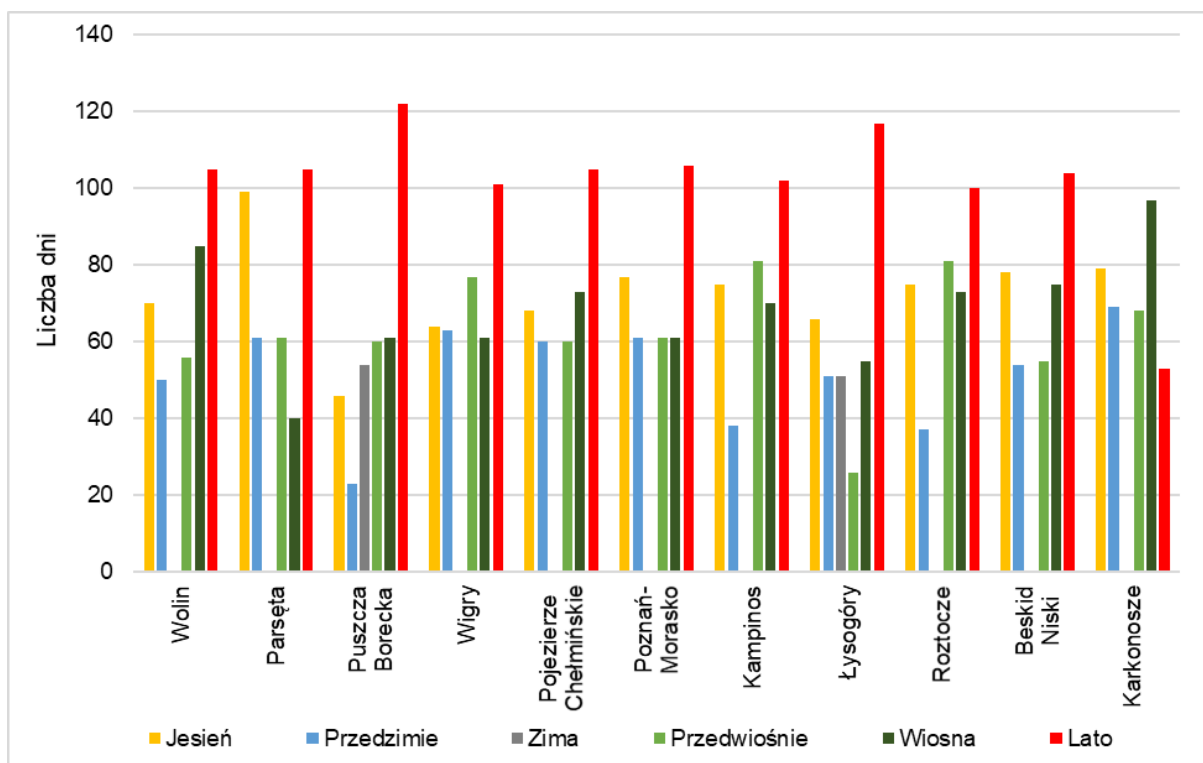


Przedwiośnie





Ryc. 22. Przebieg termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku



Ryc. 23. Czas trwania termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku

7.2. Sezon wegetacyjny

Utrzymujący się trend wzrostu średniej rocznej temperatury spowodował, że rok 2020 był jeszcze cieplejszy niż lata poprzednie, co skutkowało długim czasem trwania sezonu wegetacyjnego (Tab. 29), co przy relatywnie wysokich opadach atmosferycznych, mogło sprzyjać rozwojowi roślinności. Okres wegetacyjny trwał średnio 234 dni, od 210 dni na Pojezierzu Drawskim (Parsęta) do 261 dni na Wolinie. Czas trwania sezonu intensywnej wegetacji o średniej dobowej temperaturze powietrza $\geq 10^{\circ}\text{C}$ był najkrótszy również na Pojezierzu Drawskim (146 dni), z kolei najdłuższy w Karkonoszach (201 dni). Ciekawa sytuacja miała miejsce w Karkonoszach, gdzie okres intensywnej wegetacji był krótszy od okresu wegetacji zaledwie o 21 dni. W 2020 roku czas trwania sezonu wegetacyjnego był zbliżony w poszczególnych strefach krajobrazowych, z wyjątkiem strefy nadmorskiej (Wolin), gdzie trwał najdłużej – 261 dni. Z kolei najkrócej trwał w strefie nizin środkowopolskich – 228 dni i w strefie górskiej – 231 dni. Rok 2020 był ciepły, bardzo ciepły, a nawet anomalnie ciepły (Wigry, Poznań-Morasko, Roztocze i Karkonosze) i ekstremalnie ciepły (Wolin), co miało swoje odzwierciedlenie w długości trwania okresu wegetacyjnego. Pomimo wyższej średniej temperatury powietrza, okres wegetacyjny trwał krócej niż w 2019 roku, na co wpłynął brak występowania termicznej zimy i dłuższy czas

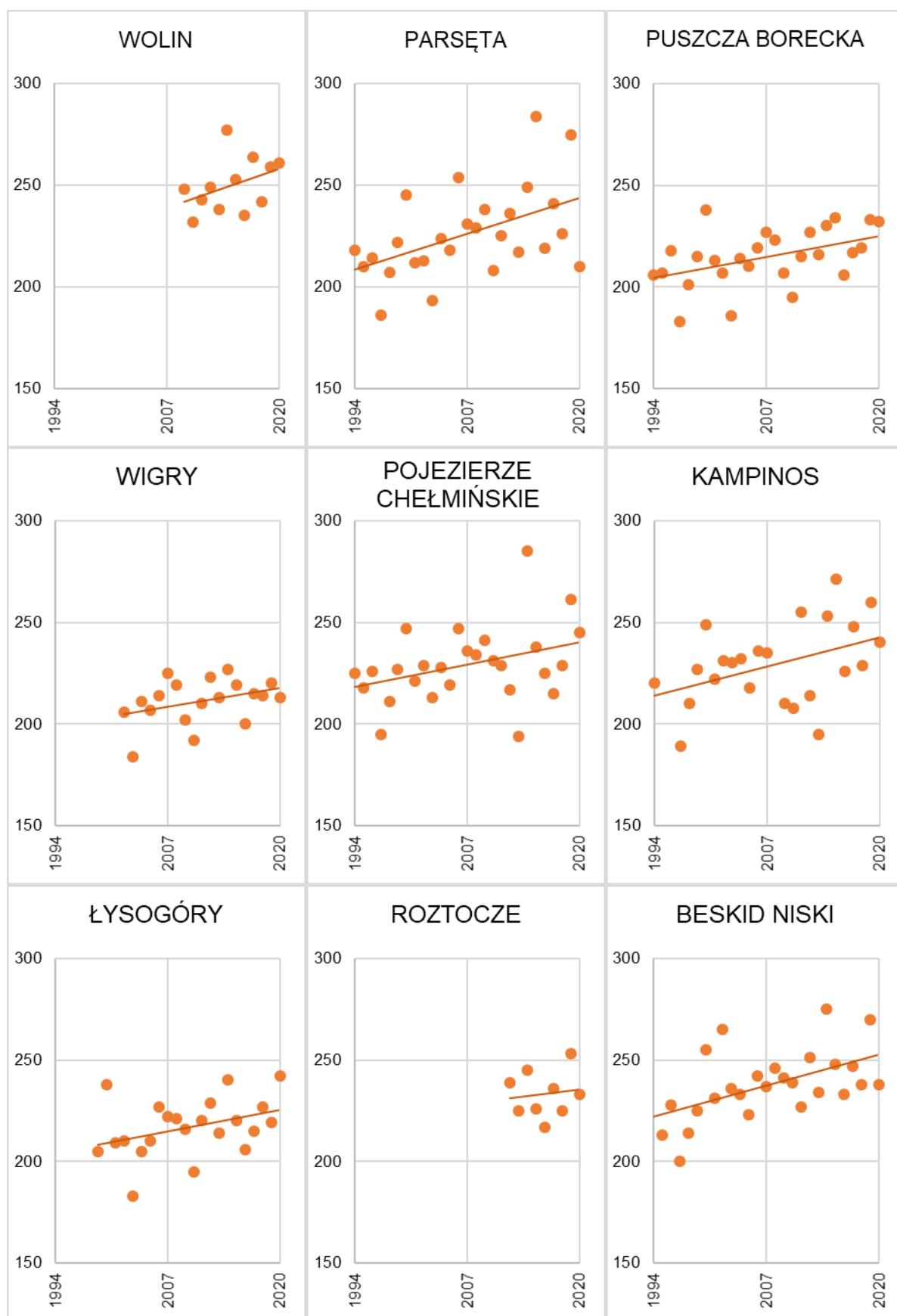
trwania przedzimia i przedwiośnia w większości stacji. Jednocześnie sezon wegetacyjny w 2020 roku był o 10 dni dłuższy od średniej wieloletniej (od 1994 roku). Czas trwania okresu intensywnej wegetacji również był krótszy niż w latach 2018 (187 dni) i 2019 (184 dni), a był na poziomie z 2017 roku (171 dni).

Tab. 29. Sezon wegetacyjny w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku

Stacja	Strefa krajobrazowa	Okres wegetacyjny	Okres intensywnej wegetacji
Wolin	nadmorska	261	187
Parsęta	pojezierzy	210	146
Puszcza Borecka		232	189
Wigry		213	156
Pojezierze Chełmińskie		245	165
Poznań-Morasko		240	186
Kampinos	nizin	240	165
Łysogóry	wyżyn	242	176
Roztocze		233	163
Beskid Niski	gór średnich	238	168
Karkonosze		223	201

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 4 Stacji: Parsęty, Puszczy Boreckiej, Kampinosu i Beskidu Niskiego. Średni trend 20-letni wydłużenia trwania okresu wegetacyjnego w wymienionych zlewniach wynosi od: 24 dni w Puszczy Boreckiej, przez 31 dni w Beskidzie Niskim, 36 dni w Kampinosie do 40 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 2020 roku (podobnie jak sumy roczne opadów atmosferycznych) były zatem korzystne dla rozwoju roślinności. Jednak należy zwrócić uwagę na zarejestrowanie w większości monitorowanych zlewni przynajmniej jednej suszy meteorologicznej (okresu bezdeszczowego trwającego przynajmniej 15 dni), 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: $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ SO_2 dla roku i pory zimowej (od 1 X do 31 III) oraz $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ NO_2 dla roku. We wszystkich zlewniach średnie roczne stężenia dwutlenku azotu i dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym w 2020 roku hydrologicznym były zbliżone do wartości z wielolecia 2003-2019, a dopuszczalne stężenia nie zostały przekroczone w żadnej Stacji Bazowej (Tab. 30, Ryc. 25, Ryc. 26).

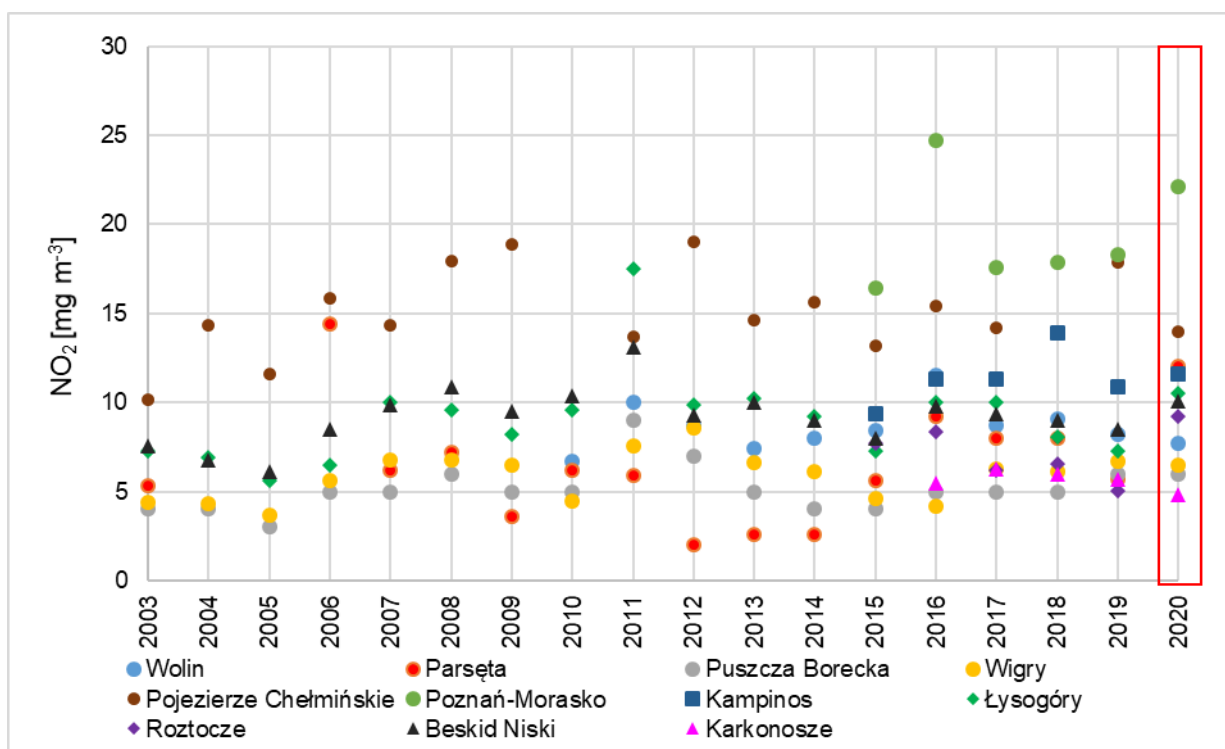
Tab. 30. Zanieczyszczenie powietrza - średnie roczne stężenie SO_2 i NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku

Stacja	Strefa krajobrazowa	NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	SO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
Wolin	nadmorska	7,7	3,5
Parsęta	pojezierzy	12,0	8,3
Puszcza Borecka		6,0	3,0
Wigry		6,5	3,1
Pojezierze Chełmińskie		14,0	8,4
Poznań-Morasko		22,1	9,0
Kampinos	nizin	11,6	8,3
Łysogóry	wyżyn	10,5	5,7
Roztocze		9,2	5,0
Beskid Niski	gór średnich	10,1	7,1
Karkonosze		4,8	5,4

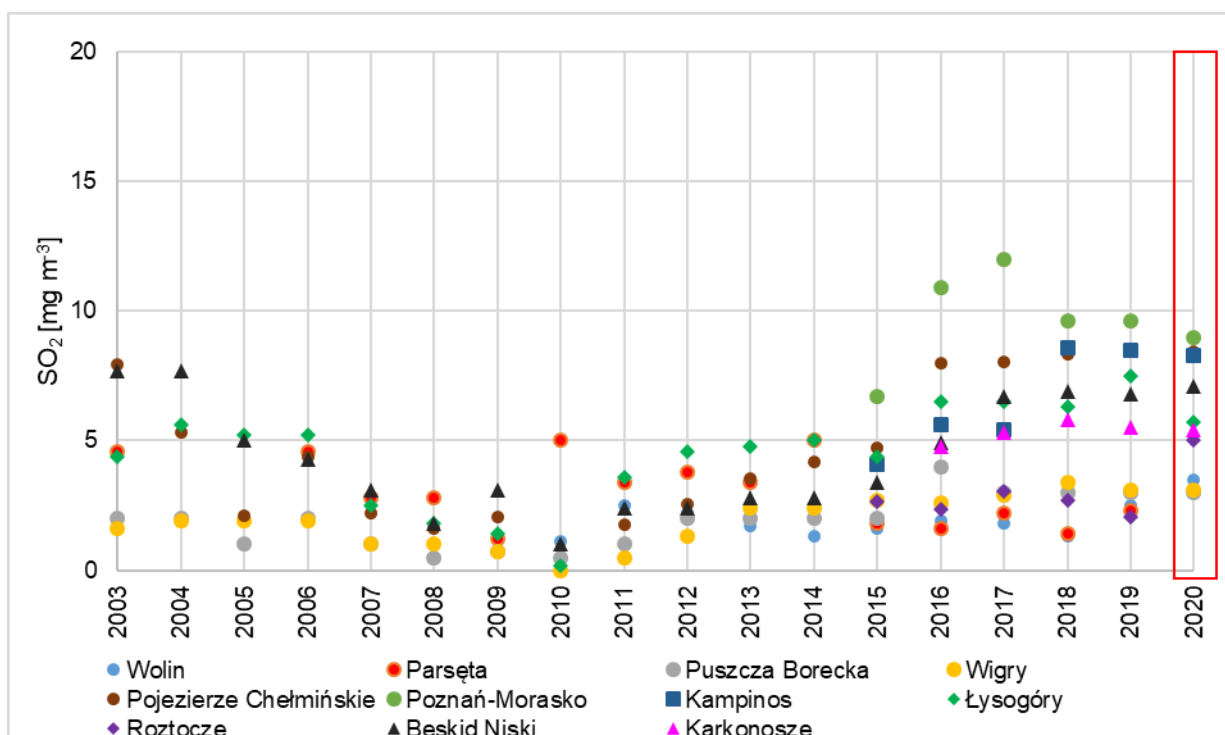
Dobry stan jakości powietrza wpływał pozytywnie na stan przyrody ożywionej. Najwyższe stężenia NO_2 i SO_2 , sporadycznie zbliżające się do wartości normatywnych stwierdzono w Stacji Poznań-Morasko położonej w sąsiedztwie miasta Poznania, w Stacji Pojezierze Chełmińskie położonej w sąsiedztwie Torunia oraz w Stacji Kampinos położonej w pobliżu Warszawy. W przypadku pierwszych trzech stacji, na stan powietrza atmosferycznego niekiedy negatywnie oddziaływały miasta (Poznań, Toruń i Warszawa).

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, Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry), a dwutlenku azotu – w Polsce północnej (Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry) oraz w Karkonoszach. Roczny przebieg stężeń dwutlenku siarki

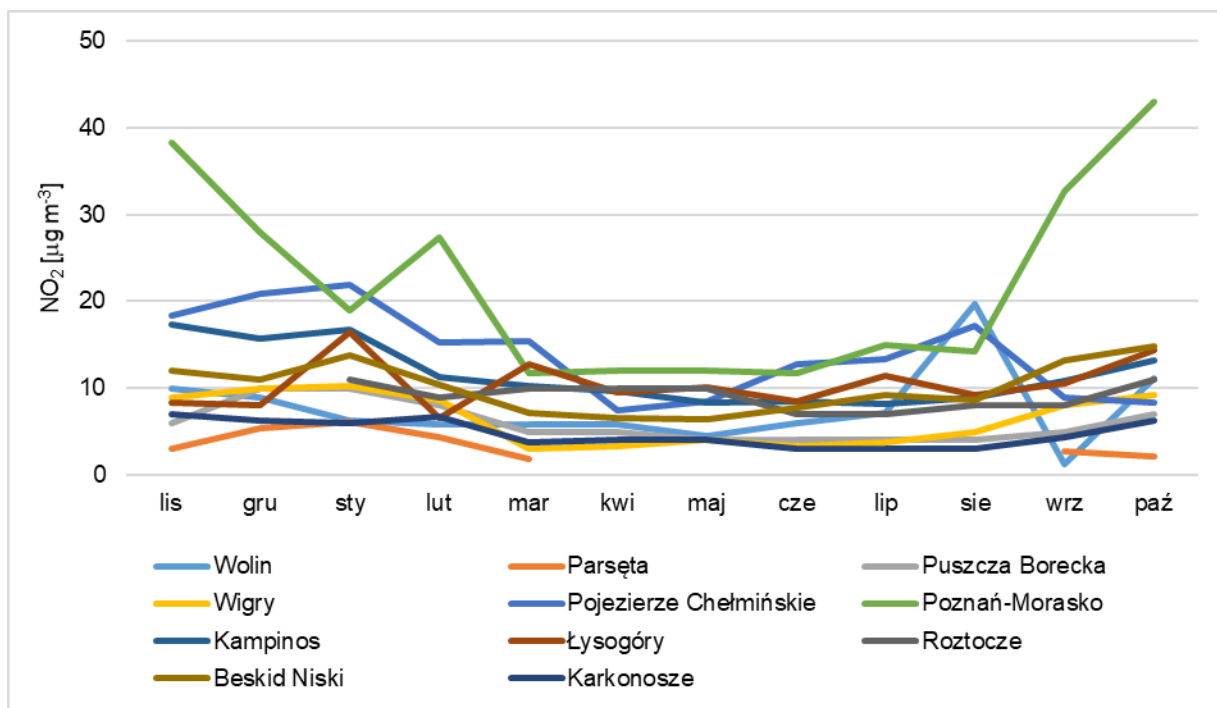
oraz dwutlenku azotu charakteryzował się występowaniem wyższych wartości w półroczu zimowym, w trakcie trwania sezonu grzewczego (Ryc. 27, Ryc. 28).



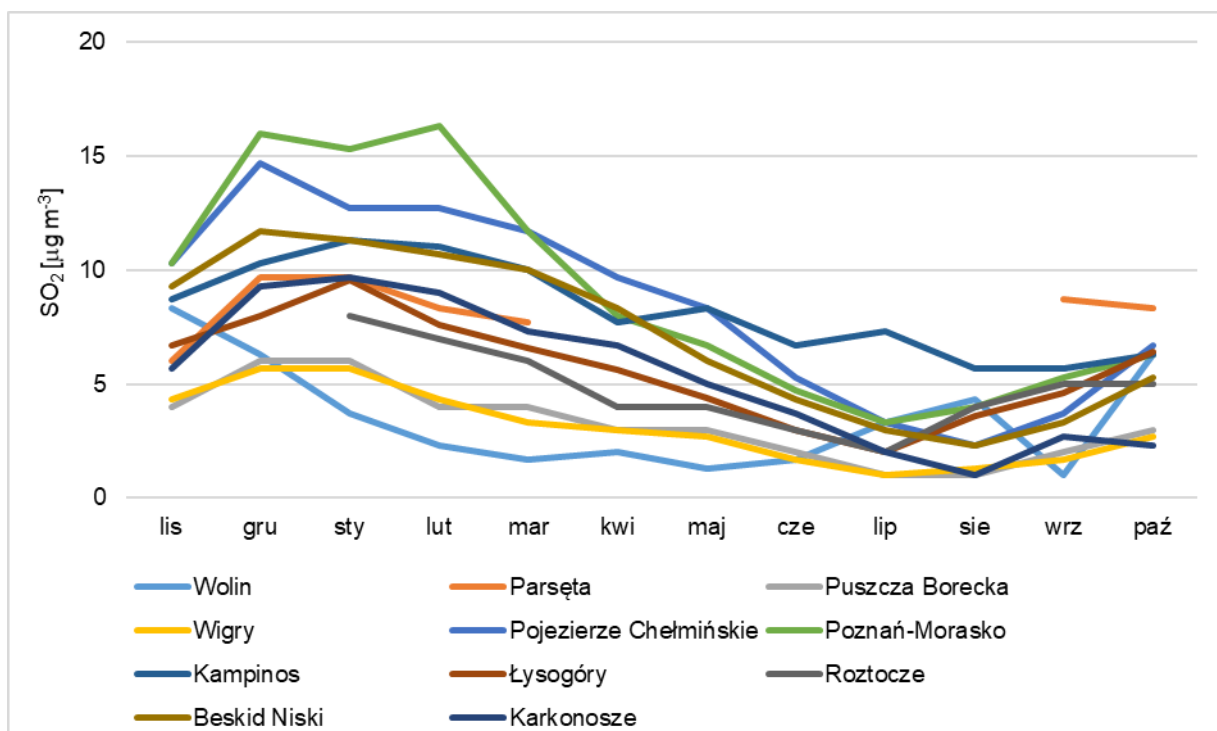
Ryc. 25. Średnie roczne stężenia NO_2 w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2020



Ryc. 26. Średnie roczne stężenia SO_2 w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2020



Ryc. 27. Średnie miesięczne stężenia NO_2 w 2020 roku w zlewniach badawczych ZMŚP



Ryc. 28. Średnie miesięczne stężenia SO_2 w 2020 roku w zlewniach badawczych ZMŚP

7.4. Uszkodzenia drzew i drzewostanów

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 2020 roku w monitorowanych zlewniach utrzymał się na podobnym poziomie jak w latach wcześniejszych. W porównaniu

z rokiem 2019, defoliacja i odbarwienie były wyższe w czterech Stacjach (Parsęta, Wigry, Poznań-Morasko oraz Karkonosze), niższe również w 4 Stacjach (Kampinos, Łysogóry, Roztocze i Beskid Niski). Na Wolinie i w Puszczy Boreckiej defoliacja i odbarwienia utrzymały się na tym samym poziomie. Należy jednak podkreślić, że zmiany nie były znaczące. Badania zależności przyczynowo-skutkowych (warunki pogodowe danego roku na zdrowotność drzewostanów) wykazują duże opóźnienie w czasie. W większości badanych geoeosystemów 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 2020 roku zarejestrowano lekką defoliację (11-25%, poziom ostrzegawczy). Wyjątkiem jest zlewnia Wrzosówki w Karkonoszach, gdzie defoliacja wyniosła zaledwie 5,5% i zaklasyfikowano ją do pierwszej klasy (0-10%, drzewostany zdrowe) oraz zlewnie Lewińskiej Strugi, jeziora Łękuk, Kanału Olszowieckiego, Wieńca oraz Świerszcza, gdzie wystąpiła średnia defoliacja (26-60%, drzewostany uszkodzone). W przypadku zlewni Lewińskiej Strugi i Świerszcza, próg 26% został nieznacznie przekroczony (Tab. 31).

Tab. 31. Średnia defoliacja w zlewniach ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym

Stacja	Defoliacja [%]
Wolin	27,0
Parsęta	18,3
Puszcza Borecka	30,0
Wigry	20,3
Poznań-Morasko	15,0
Kampinos	33,3
Łysogóry	48,5
Roztocze	28,8
Beskid Niski	21,3
Karkonosze	5,5

Analiza przestrzenna zdrowotności drzewostanów posiadała w 2020 roku wymiar regionalny, czego potwierdzeniem były wartości średniej defoliacji sosen w zlewni górnej Parsęty (18,3%), które były zbliżone, w porównaniu z rokiem 2019, dla sosny w wieku powyżej 60 lat z terenu RDLP Szczecinek – 18,3%, czy dla województwa zachodniopomorskiego – 19,7% (Stan zdrowotny lasów w Polsce, 2020). 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 południowowschodniej części województwa zachodniopomorskiego, w zlewni górnej Parsęty średnia defoliacja sosny wyniosła w 2017 roku 17%, ale w północnozachodniej 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% w Stacji Wolin), a w 2020 roku defoliacja była już znacząco wyższa na Wolinie (27%) niż na Pojezierzu Drawskim (18,3%). 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 rzecznyymi i szlakami komunikacyjnymi (Czyryca 2017).

W 2020 roku zrealizowano badania patrolowe (obserwacje sprawdzające) występowania roślinnych gatunków inwazyjnych na obszarze całych zlewni badawczych w ramach monitoringu ogólnego oraz badania na stałych powierzchniach testowych w ramach monitoringu szczegółowego. 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).

Liczba gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia na stałych powierzchniach była podobna, jak podczas poprzednich kartowań w roku 2016 i 2018. Podobnie jak w przypadku monitoringu ogólnego, najwięcej gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia zidentyfikowano w zlewniach bardziej poddanych antropopresji (zlewnia Różanego Strumienia i zlewnia górnej Parsęty).

Tab. 32. Występowanie roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia w zlewniach ZMŚP w latach 2016-2020 roku

ENST - W latach 2016-2020 Polska

Stacja Bazowa	Liczba gatunków w zlewni										Zagrożenie
	monitoring ogólny						monitoring szczegółowy				
	2016	2017	2018	2019	2020	średnio	2016	2018	2020	średnio	
Wolin	5	7	7	7	5	6	2	2	2	2	małe
Parsęta	18	18	19	43	18	23	21	16	22	20	duże
Puszcza Borecka	3	5	6	6	6	5	2	2	2	2	małe
Wigry	23	3	14	14	14	14	2	2	2	2	duże
Pojezierze Chełmińskie	68	68	8	8	7	32	2	5	9	5	duże
Poznań-Morasko	23	17	13	5	7	13	32	19	23	25	duże
Kampinos	-	20	20	16	19	19	3	3	3	3	duże
Łysogóry	8	8	7	7	6	7	-	-	-	-	małe
Roztocze	38	38	38	38	28	36	10	9	9	9	duże
Beskid Niski	-	2	2	6	10	5	1	4	4	3	małe
Karkonosze	5	7	7	5	18	8	8	7	8	8	małe

7.6. Hydrobiologia rzek – makrofity i hydromorfologiczna ocena koryt rzecznych

Warunki hydrometeorologiczne w 2020 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 2020 roku przeprowadzono w trzech Stacjach

Bazowych (w każdej zlewni na 3 stanowiskach): Poznań-Morasko (Różany Strumień), Beskid Niski (Bystrzanka) oraz Karkonosze (Wrzosówka). W ocenie hydrobiologii rzek wykorzystano opracowania Szoszkiewicza i in. (2020).

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 39,5 na stanowisku Różany Strumień dolny odcinek do 97,5 na stanowisku Wrzosówka górny odcinek. Cztery stanowiska zaklasyfikowano do bardzo dobrego stanu ekologicznego, trzy do dobrego a dwa do umiarkowanego stanu ekologicznego. W obrębie dwóch Stacji występuje duża zgodność klas stanu ekologicznego, związana z niewielką zmiennością wartości wskaźnika MIR w obrębie całych zlewni. Odchylenie standardowe indeksu MIR w Różanym Strumieniu wynosi jedynie 1,56 a we Wrzosówce 2,91. Duże różnice indeksu MIR pomiędzy odcinkami badawczymi zaobserwowano w rzece Bystrzance. Odchylenie standardowe indeksu MIR wynosi aż 18,06 i skutkuje różnicą dwóch klas stanu ekologicznego pomiędzy odcinkiem górnym i dwoma pozostałymi. Wynika to z narastającej presji hydromorfologicznej wzdłuż biegu rzeki, związanej z regulacją koryta oraz bliskiej obecności zabudowy mieszkaniowej. Wyniki oceny stanu ekologicznego rzek były dość zbieżne z poprzednim cyklem badawczym (w roku 2017). Wartości wskaźnika MIR zmieniły się w zakresie od 0,1 do 19,6%, średnio 6,0% (w 4 przypadkach wzrosły a w 5 zmniejszyły się). Poskutkowało to pogorszeniem klasy stanu ekologicznego z dobrej na umiarkowaną na środkowym oraz dolnym odcinku Bystrzanki. Największy spadek wartości wskaźnika MIR zanotowano w środkowym odcinku Bystrzanki, prawdopodobnie ze względu na eutrofizację spowodowaną dopływem nieoczyszczonych ścieków bytowych z zabudowy mieszkaniowej i związanego z tym intensywnego rozwoju glonów nitkowatych, obniżających ocenę (głównie *Cladophora* sp.) (Szoszkiewicz i in. 2020).

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 rzecznej oraz w mniejszym stopniu doliny rzecznej. Dzięki temu możliwa jest ocena stopnia naturalności i przekształcenia morfologicznego cieków (Szozkiewicz i in. 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 (9 odcinków w 3 zlewniach ZMŚP: Różanego Strumienia, Bystrzanki i Wrzosówki). Pod względem tego wskaźnika, 3 odcinki zlokalizowane na Wrzosówce zaklasyfikowano do pierwszej klasy. Wartość wskaźnika HMS dla wszystkich 3 odcinków wyniósł 0, co wskazuje na brak jakichkolwiek przekształceń w obrębie badanych odcinków, co można uznać za charakterystyczne dla rzek płynących przez tereny naturalne i seminaturalne. Dwie pozostałe badane rzeki (Bystrzanka i Różany Strumień) były bardziej przekształcone. Bystrzanka w górnym odcinku była przekształcona w mniejszym stopniu w porównaniu z dwoma pozostałymi odcinkami, a przekształcenia były związane z regulacjami na krótkich odcinkach rzeki oraz budowlą poprzeczną. Pomimo tego górny odcinek został zaklasyfikowany do drugiej klasy przekształceń. Środkowy odcinek charakteryzował się umiarkowanym przekształceniem (obecność przepraw, punktowych umocnień brzegu) i na tej podstawie odcinek zaliczono do 3 klasy przekształceń. Odcinek dolny był dużo bardziej przekształcony przede wszystkim na skutek rozciągającego się na niemal całej długości odcinka badawczego umocnienia lewego brzegu, które tylko częściowo uległy degradacji na skutek dużych wezbrań oraz licznych budowli poprzecznych (także częściowo zdegradowanych), co w efekcie spowodowało zaklasyfikowanie do 4 klasy przekształceń. Różany Strumień także charakteryzował się znacznym przekształceniem siedliska, a wszystkie odcinki zaklasyfikowano do 4 lub 5 klasy przekształceń. Najniższą wartość HMS otrzymano dla odcinka środkowego, który mimo to został zaklasyfikowany do 4 klasy. Było to efektem dawnych regulacji tego odcinka, które w dużym stopniu są cały czas dobrze widoczne. Pozostałe dwa odcinki były przekształcone pod względem głównie profilowania koryta oraz obecności różnych budowli wodnych, głównie mostów. Na tej podstawie oba odcinki zaliczono do 4 klasy przekształceń. Porównanie uzyskanych wyników z poprzednimi badaniami przeprowadzonymi w 2017 roku wskazuje na zmianę klasyfikacji stanu dwóch odcinków rzecznych. W obu przypadkach ocena uległa podwyższeniu o jedną klasę: odcinek górny Różanego Strumienia z klasy piątej na czwartą oraz odcinek górny Bystrzanki z klasy

trzeciej do drugiej. Zmiany klas nastąpiły pomimo stosunkowo niewielkich zmian w wartościach wskaźników. W przypadku dolnego odcinka Różanego Strumienia wartość HQA zwiększyła się o 4 przy jednoczesnym wzroście HMS o 5. Dla górnego odcinka Bystrzanki wzrost wartości HQA wyniósł 8, a spadek HMS 4. W efekcie klasa stanu hydromorfologicznego uległa podwyższeniu o jeden. W obu przypadkach zmiany te można uznać za naturalne i wynikające z naturalnej dynamiki środowiska rzecznej oraz degradacji antropogenicznych elementów znajdujących się w korycie rzecznej. Najwyższa zmiana wskaźnika HQA dotyczyła środkowego odcinka Wrzosówki, dla którego odnotowano wzrost o 12. Sytuacja ta nie przełożyła się na zmianę klasy stanu hydromorfologicznego, ponieważ wszystkie odcinki na Wrzosówce w obu cyklach badawczych zostały zaklasyfikowane do pierwszej klasy stanu. Największa zmiana wskaźnika HMS tymczasem została odnotowana dla odcinka dolnego Bystrzanki, co było efektem zniszczenia części umocnień i sztucznych progów w korycie w trakcie wezbrań. Zmiany wartości obu wskaźników hydromorfologicznych odnotowano we wszystkich odcinkach badawczych jednak poza dwoma pierwszymi wyżej opisanymi przypadkami nie spowodowały one zmiany klas stanu hydromorfologicznego (Szczepanik i in. 2020).

Stan geokologiczny badanych geosystemów określono na podstawie niższej wartości otrzymanych wskaźników MIR i RHS. Do bardzo dobrego stanu geokologicznego (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 geokologiczny koryt rzecznych w zlewniach ZMŚP (2020)

Stacja ZMŚP (ciek)	MIR	RHS	Stan geokologiczny
Poznań-Morasko (Różany Strumień)	2	4	zły
Beskid Niski (Bystrzanka)	3	3	umiarkowany
Karkonosze (Wrzosówka)	1	1	bardzo dobry

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

Stan środowiska przyrodniczego badanych geoeekosystemów 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 geoeekologiczny geoeekosystemu oznacza rozpoznanie i określenie stanu przyrody ożywionej i nieożywionej w zasięgu monitorowanej zlewni rzecznej (lub jeziornej), w określonym czasie (doba, dekada, miesiąc, rok, wielolecie), 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 geoeekologiczny roku 2020 został określony na podstawie wyników realizacji corocznego programu ZMŚP w Stacjach Bazowych w 2020 roku z uwzględnieniem stanu z roku poprzedniego (z 2019 roku na 2020 rok). Do oceny dynamiki rocznej stanu geoeekologicznego wykorzystano programy: meteorologia, zanieczyszczenie powietrza, chemizm opadów atmosferycznych, chemizm opadu podkoronowego, chemizm spływu po pniach, chemizm roztworów glebowych, wody podziemne, wody powierzchniowe – rzeki i jeziora, opad organiczny, gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny, uszkodzenia drzew i drzewostanów; epifity nadrzewne (Tab. 35).

Uzupełnieniem oceny geoeekologicznej w 2020 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 geoeekosystemów. Biorąc pod uwagę krótkookresową (z roku na rok) zmienność tych komponentów środowiska przyrodniczego można założyć, że wyniki z 2018 i 2019 roku są aktualne także dla 2020 roku.

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

8.1. Potencjał środowiska przyrodniczego w oparciu o ocenę usług geoeekosystemów

Potencjał środowiska przyrodniczego badanych geoeekosystemów określono na podstawie realizacji programu „Ocena usług geoeekosystemów”. 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 Stępniewskiej (2020). 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;
- zapylenie 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 2020 roku program „Ocena usług geoeosystemów” był realizowany w trzech Stacjach Bazowych: Łysogóry, Roztocze i Beskid Niski. W ocenie usług geoeosystemów wzięto pod uwagę dominację klasy potencjału środowiska przyrodniczego (największy udział procentowy) dla danej usługi. Potencjał środowiska badanych geoeosystemów 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 geoeosystemów (2020)

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	zapylenie i rozprzestrzenianie nasion	kontrola szkodników i przeciwdziałanie plagom	produkcja żywności	produkcja pasz		
Łysogóry												42	wysoki
Roztocze												41	wysoki
Beskid Niski												25	średni

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 2 analizowane zlewnie ZMŚP, o względnie małych przekształceniach antropogenicznych (Stacje: Łysogóry i Roztocze). Natomiast średni potencjał stwierdzono w zlewni Bystrzanki (Stacja Beskid Niski), podlegającej większej antropopresji. Stwierdzona w latach wcześniejszych pewna dysproporcja w zakresie waloryzacji usług regulacyjnych stan środowiska przyrodniczego, a usługami zaopatrującymi ludność została zachowana w 2020 roku. Zlewnie o wysokich i średnim potencjale usług regulacyjnych nie posiadały żadnych usług zaopatrujących.

8.2. Stan geoekologiczny

W oparciu o realizowany program ZMŚP dokonano waloryzacji stanu geoekologicznego badanych geoeosystemów w oparciu o wyniki z lat 2018-2020 (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 2020 roku w odniesieniu do roku 2019; lub zachowanie dobrego stanu z poprzedniego roku;
- **stan przeciętny 0 pkt** - brak zmiany ilościowej lub jakościowej danego komponentu w 2020 roku na tle roku 2019; lub zachowanie przeciętnego stanu z poprzedniego roku;
- **stan słaby -1 pkt** - negatywna zmiana ilościowa lub jakościowa danego komponentu w 2020 roku na tle roku 2019; 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 2018-2020 (Tab. 35). Dla programów realizowanych corocznie była możliwość odniesienia stanu poszczególnych komponentów środowiska przyrodniczego w 2020 roku do roku ubiegłego. Natomiast dla programów realizowanych w cyklu trzyletnim odniesiono się do wyników badań z obecnego cyklu pomiarowego (lata 2018-2020) w porównaniu do wcześniejszego cyklu pomiarowego (2015-2017).

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 między sobą badanych geoeosystemów oraz porównanie z rokiem poprzednim (Tylkowski, Kostrzewski 2018).

Tab. 35. Stan geoekologiczny zlewni badawczych ZMŚP w 2020 roku (na podstawie programów o rocznym i trzyletnim interwale czasowym)

Program ZMŚP	Rok	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chelmińskie	Poznań-Morasko	Kampinos	Lysogóry	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	2020	-1	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	-1
	2019	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1
Zanieczyszczenie powietrza	2020	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0	0	+1	+1	+1
	2019	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0	0	+1	+1	+1
Chemizm opadów atmosferycznych	2020	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
	2019	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
Chemizm opadu podkoronowego	2020	+1	+1	+1	+1		+1	+1	+1	+1	+1	+1
	2019	+1	+1	+1	+1		+1	+1	+1	+1	+1	+1
Chemizm spływu po pniach	2020	+1		+1					+1	+1	+1	+1
	2019	0		+1					+1	+1	+1	+1
Chemizm roztworów glebowych	2020	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
	2019	0	0	+1	0	-1	0	0	0	0	+1	0
Wody podziemne	2020	-1	+1	0	+1	0	0	-1	+1	-1	0	0
	2019	-1	+1	0	+1	0	0	-1	+1	-1	0	+1
Opad organiczny	2020	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
	2019	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
Wody powierzchniowe - rzeki	2020	-1	+1		-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
	2019	-1	+1		-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
Wody powierzchniowe - jeziora	2020	+1	+1	+1		+1						
	2019	+1	+1	+1		+1						
Gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny	2020	+1	-1	+1	0	0	-1	-1	+1	-1	+1	+1
	2019	+1	-1	+1	0	0	-1	-1	+1	-1	+1	+1
Uszkodzenia drzew i drzewostanów	2020	0	+1	0	+1		+1	0	0	0	+1	+1
	2019	+1	+1	0	+1		+1	0	0	0	+1	+1
Epifity nadrzewne	2020	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	+1	+1
	2019	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	+1	+1
Program 1 raz/2 lata [+1 pkt stan dobry, 0 pkt stan przeciętny, -1 pkt stan słaby]												
Metale ciężkie i siarka w porostach	2020	+1	+1	0	0	-1	-1	-1	-1	+1	0	+1
	2018	+1	+1	0	0	-1	-1	-1	-1	+1	0	+1

Program ZMŚP	Rok	Wolin	Parsęta	Puszcza Borecka	Wigry	Pojezierze Chelmińskie	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	2020											
	2019											
	2018											
Ocena usług geoeosystemów	2020											
	2019											
	2018											
Stan geoeologiczny	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 geoeologiczny w głównej mierze określany był na podstawie obiegu wody w poszczególnych geoeosystemach. 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 geoeologiczny 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 geoeologicznym 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 geoeologicznym 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 2020 roku charakteryzowała się zlewnia Wrzosówki w Karkonoszach, w której niekorzystne warunki meteorologiczne nie przełożyły się na pogorszenie stanu ilościowego i jakościowego wód powierzchniowych i podziemnych. Przeciętnym stanem odznaczały się geoekosystemy znajdujące się w Polsce północnej (Stacje: Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka i Wigry) oraz strefie wyżynno-górskiej (Stacje: Łysogóry, Roztocze i Beskid Niski). Z kolei najgorszym stanem charakteryzowały się geoekosystemy poddane silnej antropopresji rolniczej i urbanizacyjnej (Stacje: Pojezierze Chełmińskie i Poznań Morasko) oraz zlewnia Kanału Olszowieckiego (Stacja Kampinos). 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 geokologiczny monitorowanych zlewni nie uległ zmianie i utrzymał się na najniższym poziomie od początku analiz stanu geoekologicznego zlewni ZMŚP, czyli od 2016 roku. W głównej mierze wpłynęły na to niekorzystne uwarunkowania hydrometeorologiczne, a w ich konsekwencji występowanie suszy meteorologicznej i hydrologicznej (Tab. 35).

9. MODELOWANIE ZMIAN BILANSU WODNEGO I BIOGEOCHEMICZNEGO EKSPERYMENTALNYCH ZLEWNI ZMŚP

Modelowanie hydrochemiczne zlewni zostało przeprowadzone za pomocą modelu Soil and Water Assessment Tool (SWAT) dla zlewni dla podstawowego okresu symulacji: 2005-2019 (dodatkowe dwa lata wstecz, od 2003 r. – okres dostosowywania modelu, ang. *warm-up period*) z wykorzystaniem dostępnego dla każdej stacji indywidualnego okresu danych. W Stacjach z krótszym okresem badań w ZMŚP wykonano symulacje dla dostępnych lat pomiarów, do 2019 roku włącznie (z krótszym okresem dostosowywania modelu). Okres symulacji podzielono na lata objęte kalibracją (2/3 okresu symulacji) i lata objęte walidacją (1/3 okresu symulacji). Do przeprowadzenia modelowania wykorzystano oprogramowanie ArcGIS/ArcSWAT z wykorzystaniem bazy danych SWAT 2009. W bazie tej zapisano rekordy zawierające parametry gleb oraz generator pogody. Kalibrację wyników symulacji przeprowadzono w oprogramowaniu SWAT Calibration and Uncertainty Program (SWAT-CUP) (Abbaspour i in., 2007) z wykorzystaniem algorytmu Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2) (Abbaspour i in., 2004, 2007). Dane wejściowe do modelu obejmowały dane przestrzenne (cyfrowy model wysokościowy, granica zlewni i sieć drenażu, pokrycie terenu i użytkowanie ziemi, gleby, spadki terenu) oraz dane klimatyczne pozyskane z bazy danych ZMŚP lub, dla Stacji z krótszym okresem pomiarowym z IMGW.

Symulacje bilansu wodnego i biogeochemicznego zostały przeprowadzone dla całego okresu danych, które były bardzo zróżnicowane w poszczególnych zlewniach badawczych (od kilku do ponad 20 lat). Im większy zakres danych tym dopasowanie modelu, kalibracja i walidacja w odniesieniu do wartości rzeczywistych było lepsze. Do wykonania symulacji zastosowano m. in. następujące metody: szacowanie opadu efektywnego (metoda SCS-CN), szacowanie ewapotranspiracji (metoda Penmana-Monteitha). Symulacje wykonano dla miesięcznego kroku danych wyjściowych. Uzyskane wyniki symulacji każdego parametru wykazywały odchylenia od wartości pochodzących z bezpośrednich pomiarów. Niezbędnym było przeprowadzenie procesu kalibracji uzyskanych wyników. Kalibracja jest procesem wyznaczania wartości parametrów modelu na podstawie analizy danych rzeczywistych i metod optymalizacyjnych, w celu osiągnięcia możliwie najlepszej zgodności między danymi rzeczywistymi i wygenerowanymi przez model. Analiza wrażliwości (*Sensitive Analysis*), przeprowadzana po symulacji, umożliwiła wybór najważniejszych parametrów morfologicznych, glebowych i roślinnych, wpływających na wielkość symulowanych parametrów, na których zmiany model jest najbardziej czuły (Sorooshian, Gupta 1995).

Kalibrację przeprowadzono w programie SWAT-CUP w oparciu o algorytm kalibracji SUFI2. Do kalibracji modelu wykorzystano następujące parametry: ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, CN2, ESCO, SOL_AWC, CANMX. Wykonano kilka iteracji (najczęściej 4), a każda iteracja obejmowała kilkaset symulacji (najczęściej 500). Na podstawie wykonanych iteracji określono optymalne wartości parametrów dla każdej zlewni. Wyznaczone parametry zostały następnie zastosowane do obliczeń bilansu wodnego i biogeochemicznego w okresie walidacji modelu.

Pewne odstępstwa w okresach kalibracji i walidacji miały miejsce w Górach Świętokrzyskich i w Puszczy Boreckiej. W zlewni Wieńca (Stacja Łysogóry), cały badany okres (2008-2019) potraktowano jako okres kalibracji. Zrezygnowano z wyodrębnienia w wieloletnim okresie walidacji z powodu braku do porównań wiarygodnych danych odpływu, z powodu bardzo intensywnego poboru wody (od 2010 roku) do celów gospodarczych (rolniczych) przez mieszkańców zabudowań położonych w dolnej części badanej zlewni, skutkujący znikomym odpływem wody, szczególnie w półroczu letnim (Jóźwiak i in. 2021). Uniemożliwiło to zatem dokonanie porównania „obserwowanych” (zmienionych antropogenicznie) i symulowanych wartości przepływu w profilu zamykającym zlewnię. Z kolei w zlewni jeziora Łękuk (Stacja Puszcza Borecka), aktywność bobrów od roku 2009 spowodowała wielokrotne zmiany w geometrii przekroju pomiarowego odpływu wody z jeziora, a nawet w skrajnych przypadkach zmianę lokalizacji koryta odpływowego. Zważywszy na powyższe dane na potrzeby kalibracji i walidacji natężenia przepływu pochodziły z okresu 2005-2008 (Degórska i in. 2021).

Uzyskane wyniki symulowanych wartości średnich miesięcznych przepływu wody poddano ocenie wg trzech parametrów: współczynnika determinacji R^2 , współczynnika efektywności modelu Nasha-Sutcliffea (NSE) oraz współczynnika odchylenia procentowego PBIAS (Tab. 36).

W oparciu o analizę statystyk dla opracowanych modeli obiegu wody (opad-odpływ) stwierdzono dobre dopasowanie modelu pod względem wszystkich trzech współczynników dla zlewni: górnej Parsęty (Parsęta), jeziora Łękuk (Puszcza Borecka), Czarnej Hańczy (Wigry), Bystrzanki (Beskid Niski) oraz Wrzosówki (Karkonosze). Współczynniki determinacji R^2 , efektywności NSE i odchylenia PBIAS w tych geoelementach są przynajmniej zadowalające dla okresu kalibracji. W przypadku okresu walidacji dobre współczynniki stwierdzono w Puszczy Boreckiej, Roztoczu i Beskidzie Niskim. Dla pozostałych zlewni: Lewińskiej Strugi (Wolin), Czarnej Hańczy (Wigry), Różanego Strumienia (Poznań-Morasko), Świerszcza (Roztocze), Wrzosówki (Karkonosze) uzyskano

zadowalające i dobre dopasowanie modelu pod względem wskaźnika R^2 i PBIAS. Współczynnik NSE uzyskał słabsze oceny. Najgorsze dopasowanie miało miejsce w zlewni Strugi Toruńskiej (Pojezierze Chełmińskie), w której naturalnie kształtowany odpływ jest zaburzony przez zlewnie drenarskie oraz Kanału Olszowieckiego (Kampinos), gdzie stwierdzono długotrwałe występowanie tam bobrów. Ponadto, kryteria oceny wypracowane zostały na podstawie symulacji w dużych zlewniach rzecznych, których bezwładność jest znacznie większa niż zlewni małych, którymi są zlewnie eksperymentalne ZMŚP. Poprawa jakości modeli może być uzyskana poprzez zebranie dłuższych serii obserwacyjnych, uwzględnienie bilansu wodnego zbiorników wodnych (brak danych pomiarowych) oraz weryfikację wielkości poboru wody w zlewniach.

Tab. 36. Statystyki oceny symulowanych średnich miesięcznych wartości przepływu

Stacja	Okres kalibracji	R^2	NSE	PBIAS	Okres walidacji	R^2	NSE	PBIAS
Wolin	2011-2016	0,38	-0,10	-13,20	2017-2019	0,30	-0,07	-16,20
Parsęta	2005-2014	0,38	0,63	20,27	2015-2019	0,34	0,64	15,75
Puszcza Borecka	2005-2006	0,81	0,64	7,53	2007-2008	0,84	0,69	3,51
Wigry	2005-2014	0,12	-0,29	-0,60	2015-2019	0,16	-0,27	-16,20
Pojezierze Chełmińskie	2005-2012	0,44	0,14	48,20	2017-2019	0,38	-1,27	7,50
	2013-2016	0,03	-0,15	28,90				
Poznań-Morasko	2017-2019	0,63	0,48	17,40	2017-2019	0,63	0,48	17,40
Kampinos	2005-2011	0,43	0,43	12,60	2017-2019	0,41	-0,33	-151,20
	2012-2016	0,22	0,22	10,70				
Łysogóry	2009	0,74	0,61	29,40	-	-	-	-
Roztocze	2016-2017	0,38	0,33	13,10	2018-2019	0,57	0,52	6,30
Beskid Niski	2005-2012	0,75	0,70	20,90	2017-2019	0,66	0,66	-6,40
	2013-2013	0,76	0,74	-7,40				
Karkonosze	2018	0,82	0,78	-14,50	2019	0,50	-0,38	-16,8

Klasa wskaźnika	R^2	NSE	PBIAS
niezadowalający	$R^2 \leq 0,36$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS > \pm 25$
zadowalający	$0,36 < R^2 \leq 0,49$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$
dobry	$0,49 < R^2 \leq 0,64$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$
bardzo dobry	$R^2 > 0,64$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS \leq \pm 10$

Na podstawie wyników symulacji dla poszczególnych zlewni zestawiono średnie roczne wartości podstawowych elementów bilansu wodnego i biogeochemicznego, m.in.: odpływ, odprowadzane ze zlewni ładunki azotu azotanowego i fosforu ogólnego. Porównanie symulowanych i obserwowanych wartości podstawowych składników obiegu wody wskazuje w większości na przeszacowanie przez model odpływu w stosunku do wartości pomiarowych w większości zlewni. Symulacje wskazują również znacznie wyższe wartości ładunku azotu azotanowego i fosforu w stosunku do wyników obserwowanych (Tab. 37). Dla każdej zlewni zestawiono także wartości miesięczne wysokości warstwy opadu i odpływu [mm] z analizowanego okresu kalibracji oraz okresu walidacji.

Przebieg zmienności czasowej symulowanych wartości przepływu wody w zestawieniu z danymi pomiarowymi (hydrogramy odpływu) przedstawiono w oparciu o wartości średnie miesięczne dla okresu kalibracji oraz walidacji modeli. Przykład dobrego dopasowania modelu w górskiej zlewni Bystrzanki przedstawiono na Ryc. 29.

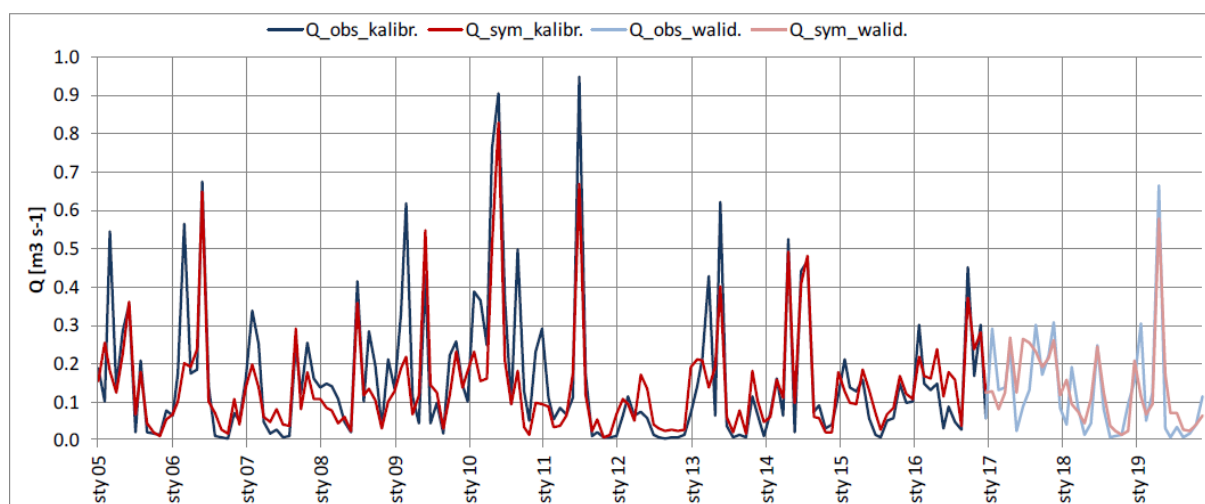
Tab. 37. Przebieg średnich rocznych obserwowanych i symulowanych (po kalibracji) sum odpływu ze zlewni, ładunków azotu azotanowego i fosforu ogólnego w zlewniach ZMŚP

Stacja	Odpływ [mm]			Ładunek N-NO ₂ [kg]			Ładunek P _{og.} [kg]		
	O	S	S-O	O	S	S-O	O	S	S-O
Wolin	142,5	160,7	18,2	419,0	1601,0	1182,0	22,5	8,1	-14,4
Parsęta	335,7	246,8	-88,9	258,0	3009,0	2751,0	215,0	1016,0	801,0
Puszcza Borecka	170,7	192,1	21,3	735,7	462,4	-273,3	149,0	94,3	-54,7
Wigry	256,9	269,9	13	686,1	1940,9	1254,8	116,2	91,6	-24,6
Pojezierze Chełmińskie	212,1	97,2	-114,9	32311,0	8527,0	-23784,0	246,0	1474,0	1228,0
Poznań-Morasko	51,8	43,7	-8,2	127,0	1494,0	1367,0	123,9	21,1	-102,8
Kampinos	109,7	117	7,3	128,0	3840,0	3712,0	105,9	12,3	-93,6
Łysogóry	45,7	228,5	182,8	0,064	0,285	0,221	-	-	-
Roztocze	212,9	227,1	14,2	176,5	43,2	-133,3	64,9	17,4	-47,5
Beskid Niski	375,6	340,2	-35,4	7255,0	8509,0	1254,0	437,0	1022,0	585,0
Karkonosze	479,5	557,7	78,2	1380,4	2631,7	1251,3	31,3	276,9	245,6

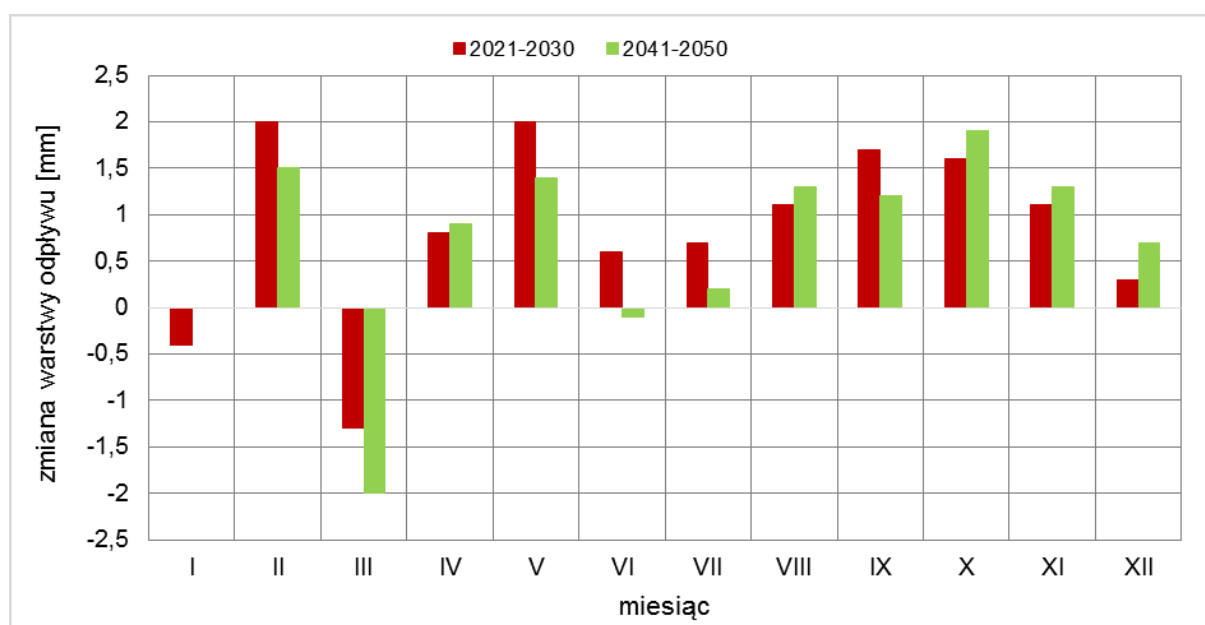
O – wartość obserwowana, S – wartość symulowana

Przeprowadzono również symulację odpływu w dwóch 10-letnich (dekadowych) okresach: 2021-2030 i 2041-2050 w oparciu o dane klimatyczne uzyskane z internetowego portalu KLIMADA 2.0. Zmiany średnich rocznych sum odpływu były zróżnicowane w poszczególnych zlewniach. Największy wzrost (ponad 10 mm) uzyskano na Wolinie,

w Wigrach, na Pojezierzu Chełmińskim i na Roztoczu, a jedyny znaczący spadek obliczono dla Karkonoszy (wynik może być niewiarygodny z powodu zbyt krótkiego okresu pomiarów). W niektórych zlewniach (np. Różany Strumień, Bystrzanka), różnice są bardzo małe (Tab. 38). Większą różnorodność uzyskano w przypadku zmian średnich miesięcznych odpływów. Przykładową prognozę zmian miesięcznej warstwy odpływu ze zlewni górnej Parsęty przedstawiono na Ryc. 30.



Ryc. 29. Średnie miesięczne natężenie przepływu obserwowanego i symulowanego w okresie kalibracji w zlewni Bystrzanki (Kijowska-Strugała i in. 2021)



Ryc. 30. Prognoza zmian miesięcznej warstwy odpływu ze zlewni górnej Parsęty w latach 2021-2030 i 2041-2050 w porównaniu z referencyjnym wieloleciem 2011-2020 (Szpikowski i in. 2021)

Tab. 38. Zmiany średnich rocznych sum odpływu ze zlewni ZMŚP dla okresów: 2021-2030 i 2041-2050 w odniesieniu do wielolecia 2011-2019 w oparciu o scenariusze zmian klimatu w Polsce (KLIMADA 2.0)

Stacja	Okres symulacji	KLIMADA 2.0		
		Okres referencyjny 2011-2020	Prognoza 2021-2030	Prognoza 2041-2050
		[mm]		
Wolin	160,7	218,0	228,4	234,1
Parsęta	246,7	254,4	264,6	262,7
Puszcza Borecka	192,1	195,2	296,6	254,3
Wigry	280,6	231,2	245,5	246,8
Pojezierze Chełmińskie	88,6	98,0	113,7	111,0
Poznań-Morasko	43,7	49,4	50,9	52,5
Kampinos	133,9	151,4	153,4	156,9
Łysogóry	213,4	201,2	201,7	197,9
Roztocze	231,2	231,2	245,6	254,4
Beskid Niski	324,0	347,8	346,8	346,0
Karkonosze	556,3	519,0	509,0	502,9

Podsumowując realizację modelowania zmian bilansu wodnego i biogeochemicznego w zlewniach ZMŚP, można przedstawić następujące wnioski:

- Ocena porównania obserwowanych i symulowanych przepływów w różnych zlewniach eksperymentalnych ZMŚP wskazuje na występowanie lepszego lub gorszego dopasowania i zależy od długości serii rzeczywistych danych pomiarowych. Ponadto istotny wpływ mają również czynniki „zakłócające” naturalny przebieg odpływu ze zlewni: tamy bobów, zlewnie drenarskie, nadmierny pobór wody przez ludność i inne. Bez uwzględnienia wyników pomiarów lub przynajmniej danych szacunkowych określających wpływ tych elementów na kształtowanie odpływu, nie możliwa jest właściwa interpretacja poprawności działania modelu SWAT.
- Cyfrowy model wysokości (DEM) sporządzony na podstawie zobrazowania LiDAR jest wystarczająco dokładny do przygotowania symulacji. Również pokrycie terenu i użytkowanie ziemi i jego zmiany wykonywane w 3-letnich interwałach czasowych stanowią wystarczającą informację wprowadzaną do modelu. Poprawy wymagają dane glebowe wprowadzane do modelu, np. wykorzystując szczegółowe mapy

glebowe, opracowywane przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy.

- Prognozy zmian odpływu, sporządzone na podstawie danych z serwisu KLIMADA 2.0, bardzo wzbogacają przeprowadzone modelowanie, wskazując na wpływ zmian klimatycznych na objętość i dostępność wody dla właściwego funkcjonowania geoeekosystemów badanych zlewni. Prognozowane wieloletnie oraz sezonowe (miesięczne) zmiany odpływu mogą stanowić informację o zagrożeniach dla siedlisk flory i fauny oraz dla rolniczej działalności człowieka.

10. PODSUMOWANIE STANU EKSPERYMENTALNYCH GEOEKOSYSTEMÓW ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH POLSKI W 2020 ROKU

W 2020 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.

Rok 2020 odznaczał się względnie małym zróżnicowaniem przestrzennym średniej rocznej temperatury powietrza i rocznej sumy opadów atmosferycznych. Warunki termiczne były niekorzystne, gdyż we wszystkich monitorowanych zlewniach rok 2020 był cieplejszy

od wartości normalnej. Wyższe temperatury w 2020 roku wpisują się w trend stale wzrastającej średniej rocznej temperatury powietrza. Dla 7 stacji stwierdzono istotny statystycznie trend wzrostowy temperatury, ponadto w 5 stacjach 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 2020 roku zmieniały się od najbardziej korzystnych w Polsce środkowej (rok wilgotny w Stacjach: Poznań-Morasko, Kampinos i Łysogóry), do niekorzystnych w Polsce zachodniej (rok suchy w Stacjach: Wolin i Karkonosze). W pozostałych stacjach rok był normalny pod względem opadowym. Klasyfikacja ilościowa opadów w 2020 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 geoeosystemów wpływał ładunek zanieczyszczeń dostarczony wraz z mokrą depozycją atmosferyczną. Jakość opadów atmosferycznych w 2020 roku pod względem wskaźnika odczynu i przewodności elektrolitycznej właściwej była bardzo dobra w większości badanych zlewni, poza Kampinosem i Łysogórami. Zakwalifikowanie tych zlewni do klasy przewodności znacznie i silnie podwyższonej zdecydowało o pogorszeniu jakości opadów atmosferycznych w stosunku do lat poprzednich pod względem wskaźnika SEC. Przewodność nieznaczna stwierdzono w 3 Stacjach Bazowych: Parsęta, Puszcza Borecka i Pojezierze Chełmińskie. W pozostałych stacjach mineralizacja opadów była lekko podwyższona. Odczyn opadów atmosferycznych w 2020 roku w porównaniu do 2019 roku, ponieważ pH lekko podwyższone stwierdzono w Wigrach i w Kampinosie. Jednak w porównaniu z latami wcześniejszymi, jakość opadów się poprawiła, ponieważ drugi rok z rzędu w żadnej stacji opady atmosferyczne nie zostały zaliczone do klasy lekko obniżonego pH. Należy podkreślić utrzymującą się pozytywną tendencję stabilizacji bądź obniżenia mineralizacji opadów atmosferycznych w większości badanych zlewni. Jakość atmosferycznej dostawy wody do geoeosystemów była dobra.

W 2020 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 południowowschodniej (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 południowowschodniej większy wpływ w zakwaszeniu opadów mają siarczany, których źródłem jest zwłaszcza spalanie paliw kopalnych.

W związku z niekorzystnymi warunkami hydrometeorologicznymi w latach 2018 i 2019 oraz z niewystarczającą wydajnością opadów w roku 2020, warunki hydrogeologiczne utrzymały się na złym poziomie, w szczególności w Polsce północnozachodniej (Wolin) i południowowschodniej (Roztocze, Beskid Niski), gdzie notowano występowanie płytkich i głębokich niżówek. 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. Pomimo niższych stanów, o dobrym stanie jakościowym wód podziemnych w zlewniach badawczych ZMŚP świadczy co najmniej zadowalająca klasa jakości wody i dobry stan chemiczny wód podziemnych. Taką sytuację stwierdzono we wszystkich analizowanych warstwach wodonośnych. Jednak zwiększyła się liczba zlewni zakwalifikowanych do zadowalającej jakości wód podziemnych (m.in. Parsęta i Pojezierze Chełmińskie).

W oparciu o badane wskaźniki hydrologiczne i fizykochemiczne można stwierdzić, że jakość wód rzecznych pozostaje na tym samym, przeciętnym poziomie od roku 2016. Większość badanych cieków (6) posiadała w 2020 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 3 ciekach (Czarna Hańcza, Struga Toruńska i Różany Strumień) stwierdzono stan chemiczny poniżej dobrego (III-V klasa). Kanał Olszowiecki, w związku z brakiem przepływu w roku 2020, nie był brany pod uwagę w analizach jakości wód powierzchniowych. 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 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 miasta Poznania, może być spowodowany dopływem ścieków i w efekcie podwyższeniem mineralizacji wody i wysokimi stężeniami jonów rozpuszczonych, np. chlorków. O relatywnej poprawie jakości wody może świadczyć podtrzymanie braku zagrożenia wzmożoną eutrofizacją w żadnym monitorowanym cieku w 2020 roku (drugi rok z rzędu). Ocena jakości wody w monitorowanych 4 jeziorach (Gardno, Czarne, Łękuk i Kamionkowskie) pozwoliła na zakwalifikowanie tych wód do najlepszej klasy jakości wody. Podobnie, jak w przypadku cieków, 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. 2021). 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 geosystemów 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 geoskaźników, 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 geosystemów są zarówno procesy naturalne (np. ekstremalne zdarzenia hydrometeorologiczne i geomorfologiczne) jak i antropogeniczne związane z dostawą zanieczyszczeń. W 2020 roku nie stwierdzono istotnych zagrożeń w funkcjonowaniu środowiska przyrodniczego badanych zlewni. Wśród naturalnych zjawisk ekstremalnych potencjalnie przekształcających środowisko przyrodnicze badanych geosystemów wyróżnić można występowanie suszy meteorologicznej w większości zlewni (poza Puszczą Borecką, Wigrami i Karkonoszami). 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, Rózanego Strumienia, Kanału Olszowieckiego i Wieńca. Ekstremalne zdarzenia hydrometeorologiczne z roku 2018, podtrzymane w 2019 istotnie wpłynęły na warunki hydrogeologiczne w większości zlewni w roku 2020. W kontekście wpływu ekstremalnych zjawisk przyrodniczych na funkcjonowanie badanych zlewni, bardzo istotne jest określenie bezwładności systemu (stanu równowagi dynamicznej) oraz ocena stanu środowiska w czasie poprzedzającym występowanie zjawisk ekstremalnych.

Istotna dla zachowania i oceny walorów przyrodniczych geosystemów Polski była realizacja w 2020 roku w Stacjach Bazowych programów biotycznych (uszkodzenia drzew i drzewostanów, bioindykacja dotycząca występowania roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia, epifity nadrzewne i hydrobiologia rzek), jak również programu ujmującego zmiany antropogeniczne (ocena usług geosystemów). Wartościowanie środowiska przyrodniczego w zlewniach ZMŚP pozwoliło na wypracowanie metodyki wyceny zasobów środowiska przyrodniczego w różnych geosystemach Polski oraz określenie potencjału środowiskowego badanych geosystemów.

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 $0,32^{\circ}\text{C}/10$ 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 się 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 jest uzyskanie informacji w zakresie kierunków rozwoju środowiska przyrodniczego monitorowanych zlewni.

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. 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. 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 2020 roku na tle wielolecia przedstawiono w raportach Stacji Bazowych ZMŚP, które stanowią załącznik do niniejszego opracowania.

11. LITERATURA

- Abbaspour K.C., Johnson A., Van Genuchten M.Th., 2004: Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4): 1340-1352.
- Abbaspour K.C., Vejdani M., Haghighat S., 2007: SWAT-CUP: Calibration and uncertainty programs for SWAT. [W:] MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, L. Oxley, D. Kulasiri (red.), Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 1596-1602.
- 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., Ulańczyk R., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Puszcza Borecka w 2020 roku. Warszawa, maszynopis.
- 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.
- Józwiak M., Józwiak M.A., Kozłowski R., Szwed M., Żelezik M., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Łysogóry w 2020 roku. Kielce, maszynopis.
- Kaczorowska Z., 1962: Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. *Prace Geogr. IG PAN* (33): 1-102.
- Kejna M., Bochenek W., Hildebrandt K., Nowak M., Pius B., Rutkowski L., Sobota I., Solarczyk A., Sulik S., Uscka-Kowalkowska J., Wojtczak H., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Pojezierze Chełmińskie w 2020 roku. Toruń, maszynopis.
- Kijowska-Strugała M., Bochenek W., Ptaszek E., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Beskid Niski w 2020 roku. Szymbark, maszynopis.
- Kolander R., 1999: Stan geosystemów Polski w 1998 roku. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/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., 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., 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., Szoszkiewicz, K., Dobrowolski M., Jusik, S., Gebler D., Bochenek W., Stanek M., Rachwalska P., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Karkonosze w 2020 roku. Jelenia Góra, maszynopis.
- Kruszyk R., 2003: Stan geoekosystemów Polski w 2002 roku. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2002.pdf
- Kruszyk R., 2004: Stan geoekosystemów Polski w roku 2003. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2003.pdf
- Kruszyk R., 2005: Stan geoekosystemów Polski w roku 2004. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2004.pdf
- Kruszyk R., 2006: Stan geoekosystemów Polski w roku 2005. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2005.pdf
- Kruszyk R., 2009: Raport o stanie geoekosystemów Polski w roku 2008. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2008.pdf
- Kruszyk R., 2010: Stan geoekosystemów Polski w roku 2009. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2009.pdf
- Krzysztofiak L., Mackiewicz A., Romański M., Danilczyk M., Krzysztofiak A., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Wigry w 2020 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 geoeekosystemów Polski*. IX Sympozjum ZMŚP, Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 113-119.
- 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 geoeekosystemów Polski w roku 2018. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2016/11/Raport_2018.pdf
- Majewski M., Kostrzewski A., 2020: Stan geoeekosystemów Polski w roku 2019. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2016/11/Raport_2019.pdf
- Major M., 2007: Stan geoeekosystemów Polski w roku 2006. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2006.pdf
- Major M., 2008: Stan geoeekosystemów Polski w roku 2007. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2007.pdf
- Major M., Chudzińska M., Kolendowicz L., Kruszyk R., Majewski M., Marciniak M., Pórolniczak M., Okońska M., Stefaniak M., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2020 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 geoeekosystemów Polski w świetle pomiarów monitoringowych w roku hydrologicznym 1999. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_1999.pdf
- Mazurek M., Zwoliński Z., 2001: Stan geoeekosystemów Polski w roku 2000. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2000.pdf
- Mazurek M., Zwoliński Z., 2002: Stan geoeekosystemów Polski w roku 2001. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2001.pdf
- Michalska G.M., Szpikowski J., 2000: Obieg wody w geoeekosystemie zlewni górnej Parsęty w roku hydrologicznym 2005. [W:] *Funkcjonowanie i monitoring geoeekosystemów 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., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Kampinos w 2020 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. w sprawie klasyfikacji zwykłych wód podziemnych dla potrzeb monitoringu środowiska. 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., Grzegorzczak 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.
- Sorooshian S., Gupta V.K., 1995: Model calibration. In: *Computers models of watershed hydrology*. [W:] V.P. Singh (red.), Highlands Ranch, CO. Water Resources Publication: 23-63.
- 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., Rawiak A., Smoła M., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Roztocze w 2020 roku. Zwierzyniec, maszynopis.
- Stan zdrowotny lasów Polski w 2019 roku, 2020. Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi, Sękocin Stary.
- Stępniewska M., 2020: Ocena usług geoekosystemów. Sprawozdanie z realizacji V etapu umowy nr 19/2018/F pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2018-2020”. Poznań, 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., Gebler D., Jusik S., 2020: Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzeczne. Sprawozdanie z realizacji V etapu umowy nr 19/2018/F pt. „Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2018-2020”. Poznań, maszynopis.
- 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 geosystemów 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 geosystemów 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 geosystemów Polski w roku 2010 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (z wykorzystaniem wybranych geindykatorów). http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2010b.pdf
- Szpikowski J., 2012: Stan geosystemów Polski w roku 2011 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (z wykorzystaniem wybranych geindykatorów). http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2011.pdf
- Szpikowski J., Borysiak J., Domańska M., Kostrzewski A., Kruszyk R., Majewski M., Stefaniak M., Szpikowska G., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Parsęta w 2020 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. GDOS Warszawa.
- Tylkowski J., 2005: Sezony transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania rzek Pobrzeża Bałtyku. [W:] Plejstoceńskie i holoceniowe przemiany środowiska przyrodniczego Polski, K. Borówka (Red.), US, INoM, PTG, Szczecin: 58-62.
- Tylkowski J., 2013: Stan geosystemów Polski w roku 2012 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (z wykorzystaniem wybranych geindykatorów). http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_2012.pdf
- Tylkowski J., 2014: Stan geosystemów Polski w roku 2013 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2014/12/raport_2013.pdf
- Tylkowski J., 2015a: Stan geosystemów Polski w roku 2014 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2015/12/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 geosystemów Polski w roku 2015 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2016/11/raport_2015.pdf
- Tylkowski J., Czyryca P., Winowski M., 2021: Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Wolin w 2020 roku. Biała Góra, maszynopis.
- Tylkowski J., Kostrzewski A., 2017: Stan geosystemów Polski w roku 2016 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2016/11/raport_2016.pdf

Tylkowski J., Kostrzewski A., 2018: Stan geoeosystemów Polski w roku 2016 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2016/11/raport_2017.pdf

Zwoliński Z., 1997: Stan geoeosystemów Polski w roku hydrologicznym 1996. http://zmsp.gios.gov.pl/wp-content/uploads/2013/11/raport_1996.pdf

Zwoliński Z., 1998: Geoindykatory w badaniach współczesnej dynamiki geoeosystemów. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego, Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoeosystemów 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 2020 roku hydrologicznym na tle wielolecia	36
Ryc. 7. Istotne statystycznie trendy wzrostu temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP – Wolin, Parsęta, Puszcza Borecka, Pojezierze Chełmińskie, Kampinos, Łysogóry i Beskid Niski	37
Ryc. 8. Sumy roczne opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym na tle wielolecia	38
Ryc. 9. Przebieg miesięczny temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku na tle wielolecia	40
Ryc. 10. Przebieg zmian liczby dni gorących ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP	42
Ryc. 11. Przebieg zmian liczby dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP	43
Ryc. 12. Przebieg zmian liczby dni mroźnych ($T_{sr} < 0^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP	43
Ryc. 13. Przebieg zmian liczby dni bardzo mroźnych ($T_{min} < -10^{\circ}\text{C}$) w latach 1994-2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP	44
Ryc. 14. Zmienność czasowa współczynników miesięcznych przepływu w roku hydrologicznym 2020 na tle zmienności czasowej wartości współczynników miesięcznych przepływu z wielolecia	61
Ryc. 15. Klasyfikacja pH i SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku	66
Ryc. 16. Zmienność czasowa SEC opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym na tle wielolecia	68
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 2020 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 1994-2020	72
Ryc. 21. Deficyt odpływu wody i bilans substancji rozpuszczonych w zlewniach ZMŚP w latach 2015-2020	89

Ryc. 22. Przebieg termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku	94
Ryc. 23. Czas trwania termicznych pór roku w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku	95
Ryc. 24. Zmienność czasu trwania okresu wegetacyjnego w Stacjach Bazowych ZMŚP dysponujących ponad 5-letnim okresem pomiarowym	97
Ryc. 25. Średnie roczne stężenia NO ₂ w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2020	99
Ryc. 26. Średnie roczne stężenia SO ₂ w zlewniach badawczych ZMŚP w latach 2003-2020	99
Ryc. 27. Średnie miesięczne stężenia NO ₂ w 2020 roku w zlewniach badawczych ZMŚP	100
Ryc. 28. Średnie miesięczne stężenia SO ₂ w 2020 roku w zlewniach badawczych ZMŚP	100
Ryc. 29. Średnie miesięczne natężenie przepływu obserwowanego i symulowanego w okresie kalibracji w zlewni Bystrzanki (Kijowska-Strugała i in. 2021)	118
Ryc. 30. Prognoza zmian miesięcznej warstwy odpływu ze zlewni górnej Parsęty w latach 2021-2030 i 2041-2050 w porównaniu z referencyjnym wieloleciem 2011-2020 (Szpikowski i in. 2021)	118

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 2020 roku	24
Tab. 4. Programy badawczo-pomiarowe ZMŚP zrealizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP przez Ekspertów ZMSP w 2020 roku	24
Tab. 5. Zakres programów i parametrów pomiarowych ZMŚP wykonanych w Stacjach Bazowych w 2020 roku	25
Tab. 6. Programy specjalistyczne realizowane w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku	33
Tab. 7. Średnia temperatura powietrza i suma opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku	35
Tab. 8. Liczba dni charakterystycznych temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2020 roku	45
Tab. 9. Klasyfikacja opadowa dla roku (Kaczorowska 1962, zmienione)	47
Tab. 10. Roczna klasyfikacja opadowa dla Stacji Bazowych ZMŚP	48
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 2020 roku	50
Tab. 14. Wartości maksymalne i minimalne temperatur w roku hydrologicznym 2020 w Stacjach Bazowych ZMŚP	51
Tab. 15. Wskaźnik miesięcznych zmian retencji RM dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym	53
Tab. 16. Wskaźnik zagrożenia niżówką hydrogeologiczną kn dla Stacji Bazowych ZMŚP w 2020 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 2020 roku hydrologicznym w Stacjach Bazowych ZMŚP	56
Tab. 18. Miesięczne wysokości warstwy opadu i odpływu [mm] oraz skróconego bilansu wodnego [mm] w 2020 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 2020 roku	74
Tab. 22. Klasy jakości wody i stan chemiczny wód podziemnych w zlewniach ZMŚP w 2020 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych	77
Tab. 23. Średnie stężenie substancji rozpuszczonych w wodach rzecznych w zlewniach ZMŚP w 2020 roku	80
Tab. 24. Jakość wód płynących w 2020 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b)	82
Tab. 25. Jakość wód stojących w 2020 roku wg wybranych elementów fizykochemicznych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019b)	83
Tab. 26. Wskaźniki eutrofizacji rzek w Stacjach ZMŚP w 2020 roku	84
Tab. 27. Wskaźniki eutrofizacji jezior w Stacjach ZMŚP w 2020 roku	85
Tab. 28. Bilans jonów denudacyjnych i biogenicznych w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku	87
Tab. 29. Sezon wegetacyjny w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku	96
Tab. 30. Zanieczyszczenie powietrza - średnie roczne stężenie SO ₂ i NO ₂ [µg·m ⁻³] w zlewniach badawczych ZMŚP w 2020 roku	98
Tab. 31. Średnia defoliacja w zlewniach ZMŚP w 2020 roku hydrologicznym	101
Tab. 32. Występowanie roślinnych gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia w zlewniach ZMŚP w latach 2016-2020 roku	103
Tab. 33. Wartości wskaźnika MIR, RHS i stan geoekologiczny koryt rzecznych w zlewniach ZMŚP (2020)	106
Tab. 34. Potencjał środowiskowy w zlewniach ZMŚP na podstawie programu oceny usług geoekosystemów (2020)	109
Tab. 35. Stan geoekologiczny zlewni badawczych ZMŚP w 2020 roku (na podstawie programów o rocznym i trzyletnim interwale czasowym)	111
Tab. 36. Statystyki oceny symulowanych średnich miesięcznych wartości przepływu	116
Tab. 37. Przebieg średnich rocznych obserwowanych i symulowanych (po kalibracji) sum odpływu ze zlewni, ładunków azotu azotanowego i fosforu ogólnego w zlewniach ZMŚP	117
Tab. 38. Zmiany średnich rocznych sum odpływu ze zlewni ZMŚP dla okresów: 2021-2030 i 2041-2050 w odniesieniu do wielolecia 2011-2019 w oparciu o scenariusze zmian klimatu w Polsce (KLIMADA 2.0)	119