PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 178, 2025, 77–102
doi: 10.4467/20833113PG.25.004.21633
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ
Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności
Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

ROLA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W MODELOWANIU ZMIAN ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO OBSZARÓW GÓRSKICH – W JAKI SPOSÓB MODELE KLIMATYCZNE DETERMINUJĄ WYNIKI? (PRZYKŁAD Z POLSKICH KARPAT)

Ewa Szalińska, *Agnieszka Wypych*, *Paweł Wilk*,
Paulina Orlińska-Woźniak, *Petr Skalák*

The role of precipitation in the modeling of natural environmental changes in mountain areas – How do climate models determine the results? (A case study from the Polish Carpathians)

Abstract: An increase in precipitation accelerates soil erosion and intensifies sediment transport, particularly in mountainous catchments. Given the changing climatic conditions, especially the increasing intensity of meteorological events coinciding with strong anthropopression, reliable projections of these changes at a local scale are a key issue, among other things, for sustainable ecosystem service management. Projections of future changes are typically conducted in two stages: in the first stage, climate models are used, while the actual assessment of the impact of these changes is carried out using environmental models. Both stages are usually conducted independently and by different expert groups. This study aims to assess the impact of selecting climate models and scenarios on the results of environmental modelling. Using the upper Raba River catchment as a case study, the sediment load delivered to the reservoir was estimated based on selected change scenarios.

Differences in the developed forecasts may reach up to 6000 t of suspended sediment annually. The results obtained demonstrate that the inappropriate selection of model variables (in this case, a poorly constructed set of climate models) can lead to extreme results and, consequently, to improper management of the natural environment.

Keywords: precipitation, climate models, environmental change scenarios, the Carpathians

Zarys treści: Wzrost opadów atmosferycznych przyspiesza erozję gleby, zwiększa też transport zawiesiny, zwłaszcza w zlewniach górskich. W obliczu zmieniających się warunków klimatycznych, w szczególności zwiększającej się intensywności zjawisk atmosferycznych, przy równocześnie silnej antropopresji, wiarygodna projekcja tych zmian w skali lokalnej jest kwestią kluczową m.in. dla zrównoważonego zarządzania usługami ekosystemowymi. Projekcje przyszłych zmian przeprowadzane są zazwyczaj dwuetapowo, gdzie w pierwszym etapie wykorzystywane są modele klimatyczne, a właściwa ocena wpływu tych zmian realizowana jest poprzez wykorzystanie modeli środowiskowych. Obydwa etapy przeprowadzane są zazwyczaj niezależnie i przez różne środowiska eksperckie. Celem pracy jest ocena wpływu, jaki wywiera dobór modeli i scenariuszy klimatycznych na wyniki modelowania środowiskowego. Na przykładzie zlewni górnej Raby dokonano szacowania ładunku zawiesiny dostarczanej do zbiornika z wykorzystaniem wybranych scenariuszy zmian. Różnice w opracowanych prognozach mogą sięgać nawet 6000 t zawiesiny rocznie. Uzyskane efekty udowadniają, że niewłaściwy dobór zmiennych modelu (w tym wypadku błędnie utworzona wiązka modeli klimatycznych) może prowadzić do skrajnych wyników i w rezultacie do niewłaściwego zarządzania środowiskiem przyrodniczym.

Słowa kluczowe: opady atmosferyczne, modele klimatyczne, scenariusze zmian środowiska przyrodniczego, Karpaty

Wstęp

Wzrost opadów atmosferycznych wpływa na erozję gleby i ładunek materiału wypłukiwanego ze zlewni, co obserwowane jest w wielu miejscach na całym świecie (IPCC 2022). Ponieważ przyspieszona erozja i sedymentacja mają poważne skutki dla środowiska i społeczeństwa, rośnie presja na dostarczanie wiarygodnych ocen tych zmian w skali poszczególnych zlewni w odniesieniu do przyszłych scenariuszy zmian klimatycznych (Halecki i in. 2018; Ramos i in. 2019; Borrelli i in. 2020; Panagos i in. 2021; Wang i in. 2021; Eekhout, de Vente 2022, Sentian i in. 2022). Wiele obszarów już teraz zmaga się ze wzrostem utraty gleby z powodu intensyfikacji opadów, zmniejszeniem pojemności zbiorników retencyjnych czy też innymi problemami związanymi m.in. z infrastrukturą w zlewni (Elba i in. 2017; Ali i in. 2018; Salas i in. 2018; Ranasinghe i in. 2019; Şen 2020; Toimil i in. 2020; Izaguirre i in. 2021; Randle i in. 2021; Patro i in. 2022; Xie i in. 2023). Prognozy zmian opadów sugerują ponadto, że intensywność tych zjawisk może się znacznie zwiększyć; dlatego pilne jest wprowadzenie w życie odpowiednich strategii zarządzania i łagodzenia ich skutków (Giorgi i in. 2019; Li i in. 2019; Borrelli i in. 2020; Szalińska i in. 2020; Li i in. 2021; Syvitski i in. 2022).

W ostatnich latach przeprowadzono liczne badania mające na celu ocenę przyszłych zmian w wielu parametrach zlewni odpowiedzialnych za zasoby wodne. Dotyczy to w szczególności zmian w przepływie m.in. rocznym i sezonowym, użytkowaniu gruntów, a także intensyfikacji erozji i związanych z nią ładunków zawiesiny (Gebrechorkos i in. 2020; Verma i in. 2022; Mahdian i in. 2023).

Większość z nich opierała się na połączeniu projekcji zmian klimatycznych i symulacji modeli środowiskowych. Projekcje ewolucji klimatu na skalę globalną lub kontynentalną są obecnie dostarczane przez licznie tworzone globalne modele klimatyczne (GCM). Aby uzyskać wgląd w skutki zmian klimatycznych na poziomie lokalnym lub regionalnym, konieczne jest stosowanie różnych technik poprawy rozdzielczości przestrzennej (ang. *downscalling*). Uruchamianie regionalnego modelu klimatycznego (ang. *regional climate model*, RCM) na ograniczonym obszarze jest podejściem zalecanym i szeroko wykorzystywanym. Naturalnie, wraz z tworzeniem coraz większej liczby par wyników GCM–RCM, powstaje szeroki wachlarz możliwych wartości prognozowanych. Pomimo postępu w odwzorowywaniu procesów atmosferycznych, dane zarówno z GCM, jak i RCM nadal obarczone są nieuniknionymi błędami modelowania i post-processingu (Maraun i in. 2017).

Aby uzyskać jak najlepsze informacje na temat przyszłych zmian klimatycznych oraz zredukować niepewność wynikającą z modelowania klimatu, zaleca się stosowanie tzw. wiązki modeli stanowiącej wypadkową modeli o różnych parametrach, jednakże we właściwy sposób oddających regionalne warunki klimatyczne (IPCC 2022). W celu usprawnienia procesu selekcji modeli, tworzone są różnorodne narzędzia interaktywne (Parding i in. 2020), ze względu jednak na powszechnie występujące ograniczenia, takie jak czas, koszty i moc obliczeniowa, zestawy te są często znacząco redukowane, co może prowadzić do błędnych wyników prognoz klimatycznych (McSweeney, Jones 2016; Samaniego i in. 2017).

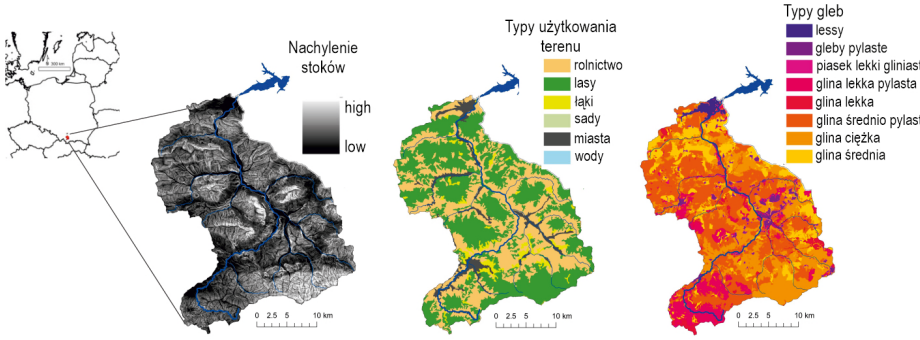
Z kolei rzeczywista ocena wpływu zmian klimatycznych na procesy zachodzące w zlewni jest wykonywana przez modelarzy środowiskowych, którzy, biorąc pod uwagę złożoność oryginalnych danych klimatycznych, często sięgają po gotowe już finalne projekcje pochodzące z różnych źródeł. Informacje te, będące niejednokrotnie wynikiem realizowanych projektów badawczych, są wykorzystywane jako gotowy produkt do tworzenia wariantowych scenariuszy w modelach zlewni (Mezghani i in. 2017).

Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu jaki wywiera dobór modeli i scenariuszy klimatycznych na wyniki modelowania transportu zawiesiny w karpackiej zlewni Raby. Reprezentuje ona specyfikę klimatu przejściowego Europy Środkowej, tj. o znacznej zmienności warunków pogodowych i klimatycznych. Opracowano szereg wariantów uwzględniających różne modele tworzące wiązki klimatyczne oraz wybrane scenariusze zmian, które następnie porównano, a wyniki poddano dyskusji.

Obszar badań

Górna Raba jest typowym przykładem zlewni górskiej w regionie Polskich Karpat Zachodnich. Od źródła położonego w Gorcach (780 m n.p.m.) płynie przez 60 km do zbiornika zaporowego w Dobczycach (265 m n.p.m.), który zaopatruje ludność w wodę pitną, chroni przed powodziami i suszami, wytwarza energię elektryczną i jest miejscem hodowli ryb. Powierzchnia zlewni wynosi 768 km^2 (Orlińska-Woźniak i in. 2020; Wilk i in. 2022), z czego prawie połowa (43%) ma nachylenia powyżej 25% i jest pokryta lasami (ryc. 1). Górski charakter tej zlewni przejawia się również szybką reakcją na opady. Rzeka charakteryzuje się bardzo dużymi amplitudami stanów wody i przepływów, z maksymalnymi wartościami odnotowywanymi w okresie topnienia śniegu oraz wczesnoletnimi długotrwałymi opadami deszczu (Bucała-Hrabia i in. 2020; Orlińska-Woźniak i in. 2020; Wilk i in. 2022). W kontekście długoterminowych zmian temperatury i opadów atmosferycznych w Karpatach (udział opadów stałych w rocznej strukturze opadów), pokrywa śnieżna wykazuje negatywne trendy. Obserwuje się zarówno zmniejszenie liczby dni z pokrywą śnieżną, jak i skrócenie jej zalegania, a maksymalna grubość pokrywy śnieżnej uległa zmniejszeniu w okresie referencyjnym, co ogranicza rolę śniegu w zasilaniu wodnym (Falarz, Bednorz 2021).

Badana zlewnia jest w większości pokryta glinami, a jej dolne stoki są wykorzystywane głównie do działalności rolniczej (ponad 40%). Cały obszar jest znany jako szczególnie podatny na erozję wodną (Kijowska-Strugała i in. 2017; Halecki i in. 2018). Zlewnia górnej Raby należy do karpackiego regionu klimatycznego Polski (Wypych i in. 2018; Kędra, Szczepanek 2019), gdzie ukształtowanie terenu ma duży wpływ na warunki klimatyczne



Ryc. 1. Rzeźba oraz użytkowanie terenu oraz typy gleb w zlewni górnej Raby

Fig. 1. Relief, land use, and soil types in the upper Raba River catchment

Źródło: opracowanie własne.

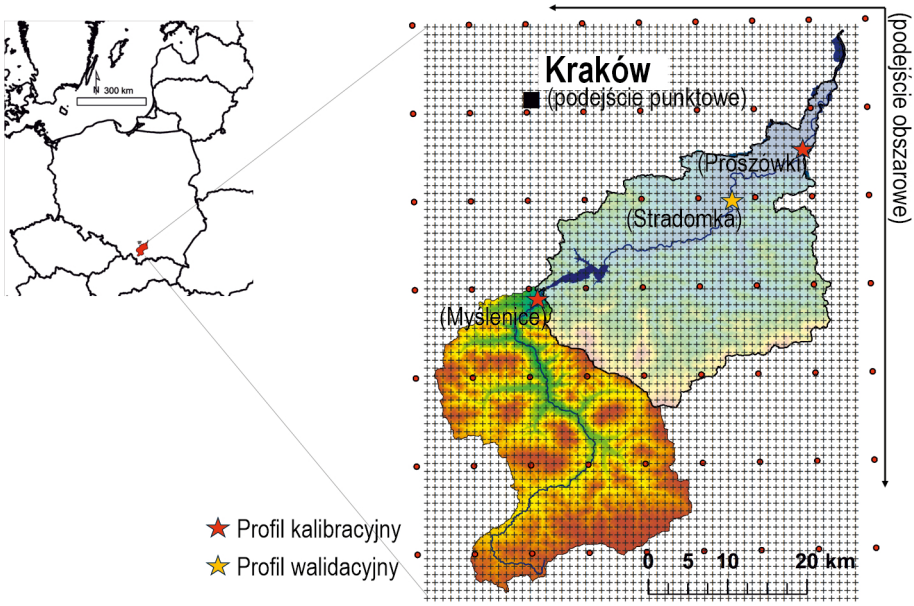
Source: own elaboration.

(Wypych i in. 2017; Wilk i in. 2022). Średnia roczna temperatura powietrza wynosi ok. 7°C, a roczna amplituda temperatury sięga 21°C. Zróżnicowana rzeźba terenu sprawia, że obszar ten cechuje się bardzo dużą zmiennością czasową i przestrzenną opadów, które wahają się od ok. 700 mm do ok. 1600 mm na wyższych wysokościach (Kędra 2017; Gorczyca i in. 2018; Twardosz, Cebulska 2020; Walanus i in. 2021). Okres wegetacyjny trwa ok. 200–210 dni (od kwietnia do połowy października).

Metody badań

Dane klimatyczne

W analizie uwzględniono historyczne dane pomiarowe temperatury powietrza (średnia dobowa) i opadów atmosferycznych (suma dobowa) z dwóch okresów: 10-letniego (2006–2015) i 30-letniego (1981–2010). Przed przystąpieniem do analizy dokonano oceny



Ryc. 2. Źródła danych meteorologicznych dla podejść punktowego i obszarowego
Fig. 2. Sources of meteorological data for point-based and area-based approaches
Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.

jakości danych oraz przeprowadzono testy jednorodności (Štěpánek 2006). 10-letni okres odniesienia został pierwotnie wykorzystany przy opracowywaniu Miejskich Planów Adaptacji (MPA) dla miast o liczbie mieszkańców powyżej 100 000 w Polsce, które obejmowały scenariusze zmian klimatycznych dla Polski na podstawie danych z pojedynczych stacji meteorologicznych (Dumieński i in. 2019; MPA 2020). W niniejszym opracowaniu okres ten został użyty ze względu na dotychczas uzyskane wyniki badań, w celu ich porównania z powszechnie zalecanym okresem 30-letnim.

Projekcje klimatyczne zostały obliczone dla dwóch horyzontów czasowych: bliskiego (2026–2035) i dalekiego (2046–2055) oraz dla dwóch reprezentatywnych ścieżek koncentracji gazów cieplarnianych: RCP 4,5 i RCP 8,5, aby nawiązać do wyników uzyskanych w ramach prac związanych z działaniami adaptacji do zmian klimatu w Polsce (MPA 2020).

W opracowaniu wykorzystano dwa różne podejścia: punktowe (P), które było stosowane we wcześniejszych badaniach modelowych dla tego obszaru (Szalińska i in. 2021; Wilk i in. 2022) i obszarowe (A), co zdeterminowało dobór danych meteorologicznych (ryc. 2) i dalszą ich analizę, w tym opracowanie projekcji klimatu.

Podejście punktowe

W analizie wykorzystano dane ze stacji synoptycznej zlokalizowanej najbliżej obszaru badań, tj. Kraków-Balice (12566 WMO, 19°47′42″E, 50°04′40″N), pochodzące z bazy danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB, https://danepubliczne.imgw.pl/). Odległość między miastem a ujściem górnej Raby do zbiornika zaporowego (25 km) oraz różnica wysokości (150 m) umożliwiły wykorzystanie tych danych bez konieczności transpozycji; zgodnie z zaleceniami Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO) oraz IMGW-PIB (Derek i in. 2014; WMO 2017; WMO 2021).

Podejście obszarowe

Analiza obszarowa uwzględnia zróżnicowanie przestrzenne temperatury powietrza i opadów atmosferycznych. Wykorzystano dane E-OBS o rozdzielczości przestrzennej 0,1° w regularnej siatce długości i szerokości geograficznej (v26e, https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access_eobs.php) dla obszaru 19,75°–20,55°E i 49,45°–50,15°N, obejmującego zlewnię górnej Raby. Obliczone miesięczne wartości temperatury powietrza i opadów atmosferycznych zostały przeskalowane do rozdzielczości 1 km przy użyciu odpowiednio modeli regresji wielokrotnej oraz interpolacji biliniowej i posłużyły do obliczenia średnich obszarowych dla zlewni Raby dla dwóch historycznych okresów odniesienia (1981–2010 oraz 2006–2015).

Projekcje zmian klimatu

Projekcje klimatyczne pozyskano z regionalnego modelu klimatycznego CORDEX dla obszaru europejskiego o rozdzielczości poziomej 0,11° × 0,11° (https://cds.climate.copernicus.eu). Uwzględniono 14 par modeli GCM–RCM najlepiej odzwierciedlających roczny cykl zarówno opadów, jak i temperatury powietrza (Kotlarski i in. 2014), dostępnych w repozytorium Euro-CORDEX (tab. 1). Projekcje zmian klimatycznych dla podejścia punktowego zostały zaczerpnięte z opracowania Miejskich Planów Adaptacji (MPA) dla miast powyżej 100 000 mieszkańców w Polsce (MPA 2020). Do ich obliczenia zastosowano przeskalowanie statystyczne (ang. *statistical downscalling*), wykorzystując narzędzia dostępne w środowisku R. Projekcje te zostały zweryfikowane przy użyciu okresu odniesienia 2006–2015. Końcowe analizy przeprowadzono, stosując wybrane wiązki (por. podrozdział *Scenariusze zmian*, s. 88) dla każdego scenariusza (RCP 4,5 i RCP 8,5) i każdego horyzontu czasowego (2026–2035 i 2046–2055) oddzielnie: P10e451, P10e452, P10e851, P10e852 (tab. 2).

Tab. 1. Wybrane pary modeli GCM-RCM
Table 1. Selected GCM–RCM model pairs

Nazwa modelu GSM (pochodzenie) Name of GCM model (origin)	Nazwa modelu RCM Name of RCM model	Skrót nazwy GCM-RCM* GCM–RCM acronym*
CNRM-CERFACS-CM5 (Francja)	CCLM4-8-17	CNRM_CLM
	ALADIN53	CNRM_AL
	RCA4	CNRM_SMHI
ICHEC-EC-EARTH (Irlandia)	RACMO22E (r1, r12)	ICHEC_KNMI ICHEC_KNMI2
	HIRHAM5	ICHEC_DMI
	CCLM4-8-17	ICHEC_CLM
	RCA4	ICHEC_SMHI
IPSL-CM5A-MR (Francja)	WRF331F	IPSL_WRF
NCC-NorESM1-M (Norwegia)	HIRHAM5	NCC_DMI
MPI-M-MPI-ESM-LR (Niemcy)	CCLM4-8-17	MPI_CLM
	REMO2009	MPI_MPI
	RCA4	MPI_SMHI
	WRF361H	MPI_WRF

* wykorzystywany w tym opracowaniu / used in this study

Źródło: opracowanie własne. / *Source:* own elaboration.

Tab. 2. Zastosowane scenariusze wariantowe
Table 2. Applied scenario variants

Podejście Approach	Okres referencyjny Reference period	Typ modelu Model type	RCP RCP	Okres projekcji Projection period	Scenariusz Scenario
P	10	e	45	1	P10e451
				2	P10e452
			85	1	P10e851
				2	P10e852
A			45	1	A10e451
				2	A10e452
			85	1	A10e851
				2	A10e852
	30		45	1	A30e451
				2	A30e452
			85	1	A30e851
				2	A30e852
		d	45	1	A30d451
				2	A30d452
			85	1	A30d851
				2	A30d852
		w	45	1	A30w451
				2	A30w452
			85	1	A30w851
				2	A30w852

Objaśnienia: Podejście: punktowe (P) / obszarowe (A); Okres referencyjny: 10 lat (10) / 30 lat (30); typ modelu: wiązkowy (e), wiązka sucha (d), wiązka mokra (w); RCP: scenariusz RCP 4,5 (45) / scenariusz RCP 8,5 (85); Okres projekcji: 2026–2035 (1) / 2046–2055 (2) (przykład: scenariusz A10e451 – podejście obszarowe, okres referencyjny 10 lat, model wiązkowy, RCP 4,5, projekcja 2026–2035).
Explanations: Approach: point (P) / areal (A); Reference period: 10-years (10) / 30-years (30); Model type: ensemble (e) / dry subset (d) / wet subset (w); RCP: RCP 4.5 (45) / RCP 8.5 (85); Projection period: 2026–2035 (1) / 2046–2055 (2) (i.e. A10e451 scenario – areal approach, 10-year reference period, ensemble model, RCP 4.5, projection for 2026–2035).

Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.

W przypadku podejścia obszarowego wszystkie modele RCM zostały przeskalowane do wyższej rozdzielczości z wykorzystaniem metody tzw. *delta change* (Anandhi i in. 2011), która minimalizuje wpływ błędów modelowania (Luo 2016; Eum, Cannon 2017; Vannitsem i in. 2018). Wieloletnie średnie miesięczne temperatury powietrza i sumy opadów atmosferycznych obliczono dla okresu odniesienia (1981–2005 – eksperyment

historyczny wszystkich modeli klimatycznych) oraz dla okresów przyszłych 2026–2035 i 2046–2055). Wszystkie prognozowane wartości miesięczne były obliczane jako anomalie względem okresu bazowego. Zastosowano model addytywny dla temperatury i multiplikatywny dla opadów. Ostatecznie anomalie zostały biliniowo interpolowane do rozdzielczości 1 km. Końcowe analizy przeprowadzono, stosując wiązki modeli dla każdego scenariusza (RCP 4,5 i RCP 8,5) i każdego horyzontu czasowego (2026–2035 i 2046–2055) osobno oraz dla dwóch okresów odniesienia, tj. 2006–2015 i 1981–2010: A10e451, A10e452, A10e851 i A10e852; oraz (ii) dla 30-letniego okresu odniesienia: A30e451, A30e452, A30e851 i A30e852 (tab. 2).

Model zlewni

Do odtworzenia zlewni Raby w przestrzeni cyfrowej wykorzystano model SWAT (Soil and Water Assessment Tool, wersja 2012.10_2.19) (Orlińska-Woźniak i in. 2020; Wilk i in. 2022).

W pierwszej kolejności zbudowano model dla całej zlewni Raby (1537 km^2) podzielonej przez Zbiornik Dobczycki na część górną i dolną. Wykorzystano rozległą i wieloźródłową bazę danych, obejmującą m.in. ukształtowanie i pokrycie terenu, podział hydrologiczny Polski, historyczne dane meteorologiczne i hydrologiczne, powłokę glebową, użytkowanie ziemi (Szalińska i in. 2024).

Zarówno dane meteorologiczne, jak i hydrologiczne zostały wprowadzone do modelu na okres 27 lat (1991–2017). Informacje o opadach, temperaturze, wilgotności powietrza, prędkości wiatru i całkowitym promieniowaniu pochodziły z 75 stacji zlokalizowanych bezpośrednio w zlewni i w promieniu 20 km od jej granic. Ze względu na fakt, że dane z oczyszczalni ścieków i jakości wód powierzchniowych w Polsce są dostępne dopiero od 2005 r., kalibrację i walidację modelu, uwzględniającą osad, można było przeprowadzić na okres 13 lat (2005–2017). Kalibrację, weryfikację i walidację modelu rzeki Raby przeprowadzono przy użyciu SWAT–CUP (Abbaspour 2013; Hosseini, Khaleghi 2020) oraz algorytmu SUFI–2 (Houshmand i in. 2017; Brighenti i in. 2019) dla profili obliczeniowych zamykających obie części zlewni (górna Raba – Myślenice, dolna Raba – Proszówki, walidacja – Stradomka) z wykorzystaniem danych o przepływie uzyskanych z IMGW–PIB (IMGW 2021) oraz stężeń całkowitych osadów zawieszonych z polskiego Państwowego Systemu Monitoringu Środowiska (PSMS 2021). Ze względu na stosunkowo niską częstotliwość monitoringu państwowego (12 razy w roku) wykorzystano program LOAD ESTimator (LOADEST) w celu pomocy w opracowaniu modelu regresji w celu wiarygodnego oszacowania ładunku składowych (kalibracja). Walidację modelu przeprowadzono dla jednego z prawobrzeżnych dopływów Raby, który jest również poddawany pomiarom monitoringu przepływu i osadów zawieszonych. Aby ocenić dopasowanie modelu do wyników monitorowania, wykorzystano cztery miary statystyczne: współczynnik determinacji (R2) (Chicco i in. 2021), współczynnik efektywności modelu

Nasha-Sutcliffe'a (NSE) (Knoben i in. 2019), procent obciążenia (PBIAS) (Berhanu i in. 2016) oraz efektywność Klinga-Gupty (KGE) (Knoben i in. 2019), których odpowiednie zakresy wartości przedstawiono w tab 3.

Dla kalibracji przepływu miary statystyczne R^2, NSE i KGE sklasyfikowały wydajność modelu jako dobrą i bardzo dobrą, a PBIAS uzyskał wartości satysfakcjonujące (tab. 4). Kalibracja osadów dla zlewni górnej Raby wskazała na satysfakcjonującą wydajność modelu według R^2 i NSE oraz bardzo dobrą i dobrą według PBIAS i KGE. Lepsze wyniki uzyskano dla dolnej części zlewni, gdzie wydajność modelu można uznać za bardzo dobrą (R^2) i dobrą (NSE, PBIAS i KGE). Walidacja modelu przepływu (według R^2, PBIAS i KGE) wykazała dobrą wydajność modelu, natomiast tylko NSE uzyskało wartość satysfakcjonującą. Dla zawiesiny, według R^2, NSE i KGE, wydajność modelu można uznać za satysfakcjonującą, a według PBIAS – dobrą (tab. 4).

Skalibrowany i zweryfikowany model nazwano scenariuszem bazowym. Całkowity ładunek zawiesiny dostarczany z górnej rzeki Raby do zbiornika zaporowego (wartości dla przekroju symulacji modelu) oszacowano w tym scenariuszu na ok. 6000 t rocznie (ryc. 3). Miesięczne ładunki wykazywały ogromną zmienność od 64 t rocznie do 1444 t rocznie (odpowiednio grudzień i czerwiec), przy czym maksimum odpowiadało wzrostowi opadów późną wiosną i wczesnym latem (maj–lipiec), gdy średnie miesięczne sumy opadów przekraczają 70 mm.

Tab. 3. Klasyfikacja zakresów wartości dla miar statystycznych stosowanych podczas kalibracji, weryfikacji i walidacji

Table 3. Classification of value ranges for statistical measures used in calibration, verification, and validation

Ocena dopasowania Assessment of fit	R^2 Przepływ/zawiesina Flow/sediment	NSE Przepływ/zawiesina Flow/sediment	PBIAS (%)		KGE Przepływ/zawiesina Flow/sediment
			Zawiesina Sediment	Przepływ Flow	
Bardzo dobra	>0,65	0,75<NSE≤1,00	<±25	<±10	>0,75
Dobra	0,51–0,65	0,50<NSE≤0,75	±25≤PBIAS<±40	±10≤PBIAS<±15	0,51–0,75
Satysfakcjonująca	0,20–0,50	0,00<NSE≤0,50	±40≤PBIAS<±70	±15≤PBIAS<±25	0,00–0,50
Niesatysfakcjonująca	<0,20	NSE≤0,00	PBIAS≥±70	PBIAS≥±25	<0,00

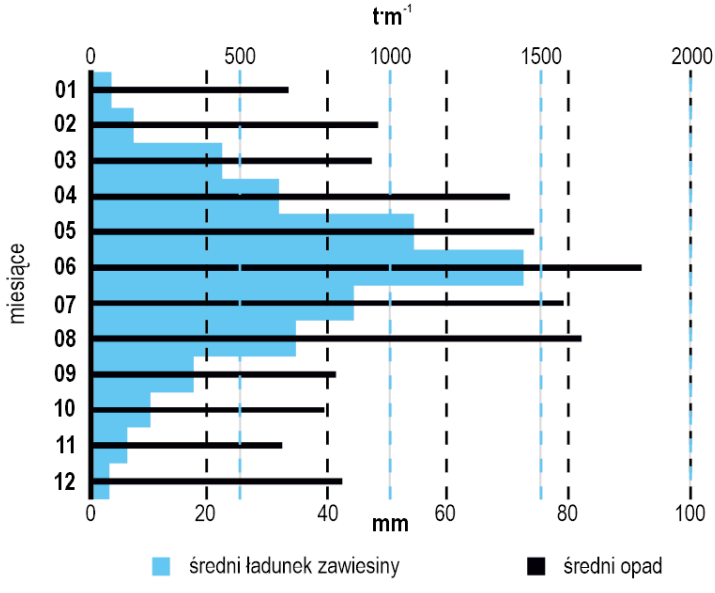
Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

Tab. 4. Wyniki kalibracji i walidacji dla symulacji miesięcznych w profilach Raby
Table 4. Calibration and validation results for monthly simulations at profiles along the Raba River

Profil / Profile	Typ / Type	R^2	NSE	PBIAS	KGE
Kalibracja / Calibration					
Górna Raba (Myślenice)	przepływ	0,62	0,51	21%	0,70
	osad	0,34	0,10	–2%	0,58
Dolna Raba (Proszówki)	przepływ	0,73	0,73	4%	0,80
	osad	0,77	0,71	27%	0,69
Walidacja / Validation					
Dolna Raba (Stradomka)	przepływ	0,57	0,46	–14%	0,72
	osad	0,45	0,35	39%	0,19

Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.



Ryc. 3. Rozkład roczny średnich miesięcznych opadów atmosferycznych oraz ładunków osadów zawieszonych dla scenariusza bazowego
Fig. 3. Annual distribution of average precipitation and suspended sediment loads for the baseline scenario
Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.

Scenariusze zmian

Wcześniejsze badania wykazały, że opady oraz ich prognozowane zmiany mają decydujący wpływ na inicjację i transport cząstek gleby zarówno w fazie lądowej, jak i w korycie rzeki (np. Vercruysse i in. 2017; Gholami i in. 2018; Shrestha, Wang 2018). Dlatego, choć w symulacjach ładunku osadów zawieszonych uwzględniono projekcje zmian zarówno opadów, jak i temperatury, szczegółowo analizowano wyłącznie wyniki scenariuszy opadów atmosferycznych. Ponadto, aby wyjaśnić wpływ ilości opadów na analizy ładunku, wyróżniono dwie skrajne podgrupy modeli: suche i mokre, w oparciu o już wybrane pary modeli GCM–RCM (tab. 1). Do wyboru modeli suchych i mokrych w celu stworzenia wiązek uwzględniono względną miesięczną zmianę obliczoną na podstawie historycznych symulacji modeli (M_H) oraz danych referencyjnych E-OBS ($M_{E\text{-}OBS}$) zgodnie z równaniem 1.

$$RR = 100\left(\frac{M_H}{M_{E-OBS}} - 1\right) \tag{1}$$

Stosując metodę probabilistyczną, dla każdego modelu wskazano anomalnie suche miesiące (RR < 25 percentyl, tj. 1,1%) i mokre (RR > 75 percentyl, tj. 39,2%), a następnie obliczono roczną średnią wartość odchyleń (tab. 5). Ostatecznie wyodrębniono 4 ekstremalne modele suche i 4 mokre, które posłużyły do stworzenia wiązki suchej i mokrej. Należy podkreślić, że modele o szerokim zakresie odchyleń w ciągu zostały wykluczone z ostatecznego wyboru (CNRM_CLM – bliski modelowi suchemu oraz IPSL_WRF – wartość w zakresie modeli mokrych).

Wyniki

Zmiany opadów atmosferycznych w scenariuszach wariantowych

Zmiany opadów we wszystkich przyjętych scenariuszach są przedstawione jako względne (%) i absolutne (mm) zmiany miesięczne w porównaniu ze średnimi wartościami miesięcznymi dla 10- i 30-letnich okresów referencyjnych (2006–2015 i 1981–2010). Wartości absolutne zostały wprowadzone do modelu jako miesięczne wskaźniki zmian zgodnie z zastosowaną metodą *delta change*. Pełne dane wyjściowe dotyczące opadów, uzyskane z symulacji modelu SWAT dla wszystkich wariantowych scenariuszy jest dostępny online (Szalińska i in. 2024).

Dla podejścia punktowego, niezależnie od wybranego scenariusza i horyzontu czasowego, największych zmian można oczekiwać w grudniu i kwietniu (wzrost o nawet

Tab. 5. Odchylenia prognozowanych miesięcznych sum opadów od wartości referencyjnych (RR w %) (1981–2010, średnia obszarowa). Symulacje mokre i suche oraz podzbiory oznaczone kolorami: niebieskim i żółtym, odpowiednio (na podstawie Szalińska i in. 2024)
Table 5. Deviations of projected monthly precipitation totals from the reference values (RR in %) (1981–2010, area average). Wet and dry simulations, with sub-ensembles marked in blue and yellow, respectively (based on Szalińska et al. 2024)

Miesiąc Month	ICHEC_KNMI	ICHEC_CLM	ICHEC_KNMI2	CNRM-AL	CNRM_CLM	ICHEC_SMHI	MPI_MPI	CNRM_SMHI	MPI_WRF	IPSL_WRF	MPI_SMHI	MPI_CLM	ICHEC_DMI	NCC_DMI
STY	37,4	39,9	38,9	14,7	50,8	39,1	56,1	32,2	44,3	70,8	50,4	70,6	75,0	111,7
LUT	31,7	25,9	25,0	18,3	49,9	12,0	50,8	25,9	29,2	63,6	28,8	59,8	27,5	67,6
MAR	-18,2	25,0	-0,8	41,6	32,9	11,4	49,7	45,1	31,9	39,5	35,6	53,2	52,0	85,7
KWI	-17,0	12,5	-16,9	38,0	33,9	21,7	25,9	53,5	24,2	30,7	57,8	51,5	19,8	72,1
MAJ	-0,4	-5,3	7,1	26,7	-4,9	44,4	0,3	27,0	17,4	49,7	33,9	-4,1	30,0	33,6
CZE	-5,4	-14,0	-6,0	1,0	-29,0	29,7	-4,6	28,7	30,9	22,5	12,7	3,9	23,2	1,9
LIP	-25,0	-34,5	-12,2	-0,1	-46,3	-4,5	-4,8	8,3	19,0	-14,8	0,0	16,9	16,6	7,2
SIE	-13,7	-20,9	-3,6	-6,9	-32,0	-10,6	4,4	-1,8	33,4	-28,6	10,7	7,1	28,6	17,3
WRZ	-6,4	-19,4	-12,1	1,0	1,1	1,0	-12,9	8,1	-16,3	-2,6	8,6	3,7	43,4	11,9
PAŹ	18,8	25,3	16,6	11,8	37,3	42,3	35,9	33,3	43,9	24,0	50,2	49,4	73,0	61,6
LIS	10,1	7,9	17,8	17,6	39,8	-3,2	21,7	15,7	11,9	51,7	24,1	35,9	35,3	68,6
GRU	12,9	6,8	2,6	-8,8	23,1	-10,1	42,1	-0,4	16,4	54,3	23,5	45,8	55,8	56,8
ŚREDNIA	2,1	4,1	4,7	12,9	13,0	14,4	22,1	23,0	23,9	30,1	28,0	32,8	40,0	49,7
WIĄZKA	SUCHA										MOKRA			

Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.

70–80% – średnio ok. 22 mm). Jednocześnie od maja do września oczekiwany jest spadek opadów, który w sierpniu wyniesie ponad 25% (średnio ponad 8 mm) (ryc. 4A).

Analiza obszarowa przy tym samym okresie referencyjnym wykazuje większe prognozowane zmiany sum opadów we wszystkich miesiącach roku; w kwietniu i grudniu o prawie 15 i 40% w porównaniu z podejściem punktowym, tj. odpowiednio ok. 25 i 21 mm (ryc. 4B). Jednocześnie jedynie w maju i wrześniu nadal można oczekiwać niewielkich spadków opadów, maksymalnie o ponad 6% – ok. 8 mm.

Wydłużenie okresu referencyjnego powoduje znaczącą zmianę w miesięcznym rozkładzie prognozowanych zmian sum opadów. Najwyższe wartości charakteryzują miesiące jesienne i zimowe (maksymalnie nieco ponad 67% – 28 mm w styczniu) (ryc. 4C). Z kolei od lipca do września, w zależności od scenariusza, opady zmniejszają się prawie o 6% – ok. 8 mm.

Wykorzystanie wyodrębnionych podzbiorów modeli, tj. wiązki mokrej i wiązki suchej, wybranych metodą probabilistyczną, wyraźnie pokazuje rozbieżności w wynikach. Podejście to skutkuje skrajnymi wartościami opadów, które różnią się średnio aż o 28% – 15 mm rocznie (ryc. 4D, 4E).

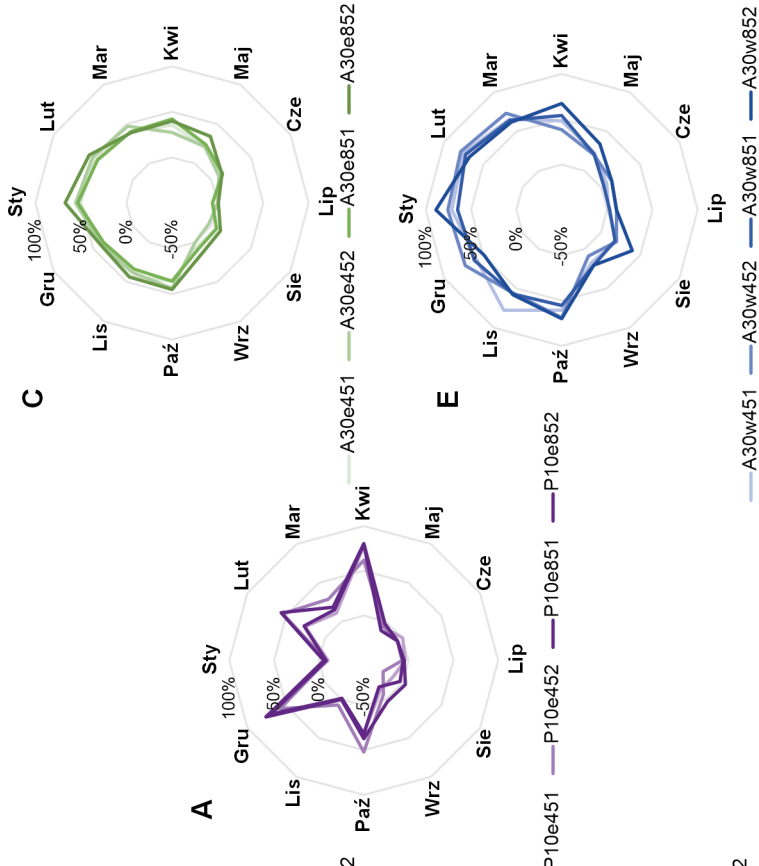
Zmiany transportu zawiesiny w scenariuszach wariantowych

Wyniki uzyskane dla obydwu podejść odnośnie do źródła danych (punktowe i obszarowe) pokazują przyszły wzrost rocznych ładunków zawiesiny w porównaniu do scenariusza bazowego (średnio ok. 2700 t na rok), większy wzrost przewiduje się jednak dla scenariuszy obszarowych (do 4277 t na rok) niż dla punktowych (do 2833 t na rok) (tab. 6).

W odniesieniu do miesięcznego rozkładu ładunku (ryc. 5) obydwa podejścia wskazują na możliwość nietypowego wzrostu ładunków dostarczanych do zbiornika w kwietniu, średnio o ponad 1700 t na miesiąc dla scenariuszy punktowych i prawie 1900 t na miesiąc dla obszarowych. Drugiego szczytu dostawy zawiesiny należy oczekiwać w miesiącach letnich (czerwiec–lipiec), co odzwierciedla zmienność opadów w tym obszarze, z wyraźnie wyższymi opadami w tych miesiącach (Gil i in. 2021; Walanus i in. 2021).

Choć trend miesięczny jest podobny dla obu podejść, wyższe ładunki letnie dla scenariuszy obszarowych powinny być zauważalne, wynikają bowiem z prognozowanych zmian opadów wyższych dla całej zlewni niż dla pojedynczej stacji meteorologicznej przyjętej pierwotnie. Dlatego też, zwłaszcza na obszarach górskich, należy wykorzystywać podejście obszarowe, jako lepiej odzwierciedlające charakterystykę zlewni, i stosować je, gdy tylko jest to możliwe.

Brak wyjaśnienia dla ekstremalnych ładunków zawiesiny w kwietniu w tej zlewni (niezależnie od podejścia), co również zaobserwowano w innych obszarach, gdzie projekcje zmian klimatycznych były przyjęte z tego samego źródła (MPA 2020; Bojanowski i in. 2023; Szalińska i in. 2023), wzbudził zainteresowanie wpływem okresu referencyjnego na symulacje osadów. Jako okres referencyjny klimatu zwykle przyjmuje się 30 lat,



Ryc. 4. Prognozowane zmiany miesięcznych sum opadów w odniesieniu do A) okresu 2006–2015 – podejście punktowe (P); B) okresu 2006–2015 i C) 1981–2010 – podejście obszarowe (A); okresu 1981–2010 – dane obszarowe dla podzbiorów wiązki D) suchej i E) mokrej

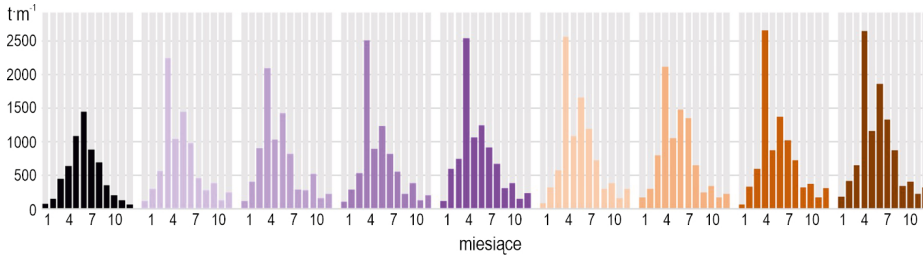
Fig. 4. Projected changes in monthly precipitation totals relative to: A) 2006–2015 – point approach (P); B) 2006–2015; and C) 1981–2010 – areal approach (A); areal data for 1981–2010: D) dry and E) wet sub-ensembles

Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.

Tab. 6. Miesięczne (t·m^{-1}) sumy ładunków zawiesiny dla wszystkich 20 wariantowych scenariuszy użytych w badaniu (na podstawie Szalińska i in. 2024)
Table 6. Monthly sediment loads (t·m^{-1}) for all 20 scenario variants used in the study (based on Szalińska et al. 2024)

Scenariusz bazowy	STY	LUT	MAR	KWI	MAJ	CZE	LIP	SIE	WRZ	PAŹ	LIS	GRU
Scenario variants	69	145	439	630	1080	1444	878	684	344	199	121	64
P10e451	46	149	117	1614	-42	0	96	-226	-66	176	0	173
P10e452	47	259	457	1466	-57	-20	-62	-397	-66	319	32	158
P10e851	31	141	90	1875	-189	-217	-61	-135	-129	178	0	136
P10e852	48	445	304	1909	-26	-204	32	-18	-36	177	28	172
A10e451	9	171	133	1927	-1	212	305	39	-47	175	35	228
A10e452	94	154	355	1479	-37	28	464	-41	-100	137	50	161
A10e851	-9	186	156	2022	-213	-79	137	39	-33	169	41	238
A10e852	108	270	203	2019	80	411	446	184	-3	206	103	247
A30e451	139	166	342	673	793	371	69	19	-11	180	160	69
A30e452	191	113	445	541	646	295	26	-170	-41	187	134	81
A30e851	93	112	247	679	648	503	26	-29	29	184	131	78
A30e852	379	355	425	817	939	298	152	105	67	249	172	74
A30d451	25	82	147	103	506	341	44	-48	-4	84	44	26
A30d452	115	65	151	198	1041	122	234	-121	-65	104	64	37
A30d851	22	59	45	454	1100	226	-103	100	-4	107	40	8
A30d852	181	75	153	208	877	267	-38	-127	23	134	135	65
A30w451	379	436	726	1075	594	-227	69	204	97	434	450	155
A30w452	514	363	1204	830	351	-58	307	300	-21	457	327	252
A30w851	269	467	788	1158	454	-182	122	147	123	361	315	167
A30w852	565	533	1035	1589	687	94	253	545	149	475	339	138

Źródło: opracowanie własne.
Source: own elaboration.



Ryc. 5. Miesięczny rozkład (t·m^{-1}) ładunków zawiesiny w profilu obliczeniowym dla podejścia punktowego i obszarowego oraz 10-letniego okresu referencyjnego dla scenariuszy RCP 4,5 i 8,5 dla bliskiej i dalekiej przyszłości (1:2026–2035 i 2:2046–2055) (kolory jak w tab. 2)

Fig. 5. Monthly distribution of sediment loads (t·month^{-1}) at the calculation profile for point and areal approaches, using a 10-year reference period, for RCP 4.5 and 8.5 scenarios in the near (1: 2026–2035) and far (2: 2046–2055) future (colours as in Table 2)

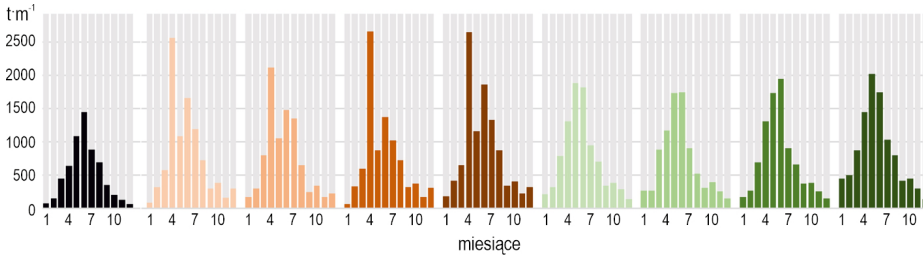
Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

zgodnie z zaleceniami WMO (2017). Taki okres jest wystarczająco długi, by zniwelować międzyroczne zmienności parametrów klimatycznych lub anomalie i wykazać trendy klimatyczne. Wiele dotychczasowych badań pokazuje jednak, że te wytyczne są stosowane w ograniczonym zakresie w prognozowaniu przyszłych zmian w ekosystemach zlewni. Niepełny dostęp do kontrolowanych pod względem jakości i zhomogenizowanych lokalnych danych meteorologicznych w niektórych obszarach często wymusza skrócenie okresu do 10–20 lat dla analiz środowiskowych (Ragettli i in. 2016; Ba i in. 2018; Andaryani i in. 2019b; Woolway, Merchant 2019; Singh, Saravanan 2020).

Porównanie ładunków osadów w podejściu obszarowym, oparte na 30-letnim okresie referencyjnym (1981–2010) oraz na dekadzie, obejmującej ten sam okres, co w podejściu punktowym (2006–2015), nie wykazało znaczących różnic w średnich rocznych ładunkach. W obu zestawach symulacji ładunki zawiesiny dostarczane do zbiornika były wyższe o ponad 4000 t rocznie w porównaniu z wartościami scenariusza bazowego, różniły się jedynie o ok. 2% (tab. 6). Miesięczny rozkład ładunków zawiesiny okazał się jednak wyraźnie inny w symulacjach opartych na obu okresach referencyjnych (ryc. 6), bez ekstremum dla kwietnia w przypadku dłuższego okresu referencyjnego.

Dopiero szczegółowa analiza miesięcznych wskaźników zmiany dla obu zestawów projekcji opadów pozwoliła zrozumieć mechanizm anomalii kwietniowej. Średnie opady w kwietniu w okresie 2006–2015 były niższe o prawie 42% w porównaniu z okresem 1981–2010. W związku z tym wskaźniki zmiany dla tego miesiąca również wyraźnie różniły się między okresami, osiągając odpowiednio 90% i 35% w prognozach na bliską



Ryc. 6. Miesięczny rozkład (t·m^{-1}) ładunków zawiesiny w profilu obliczeniowym dla podejścia obszarowego oraz 30-letniego okresu referencyjnego dla scenariuszy RCP 4,5 i 8,5 dla bliskiej i dalekiej przyszłości (1:2026–2035 i 2:2046–2055) (kolory jak w tab. 2)

Fig. 6. Monthly distribution of sediment loads (t·month^{-1}) at the calculation profile for the areal approach and a 30-year reference period, for RCP 4.5 and 8.5 scenarios in the near (1: 2026–2035) and far (2: 2046–2055) future (colours as in Table 2)

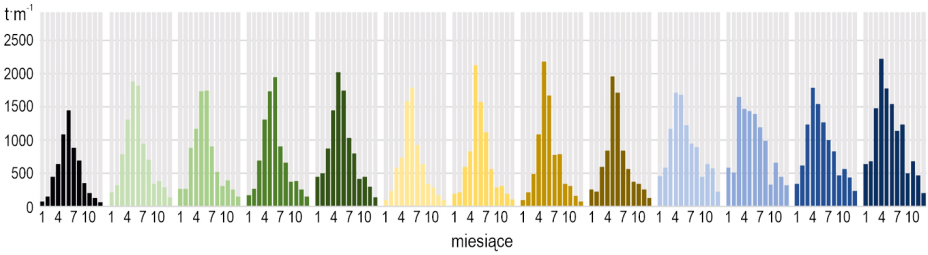
Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

i daleką przyszłość. To spowodowało znaczny wzrost opadów w symulacjach opartych na krótszym okresie referencyjnym (2006–2015). Taki wpływ niskich i wysokich zmian na parametry modelowane SWAT dla zlewni był obserwowany już wcześniej (zob. Andaryani i in. 2019a) i wówczas skutkował różnicą ok. 1185 t w ładunkach zawiesiny wprowadzonych do zbiornika w kwietniu.

Należy również zauważyć, że dla sum opadów, w przeciwieństwie do temperatury, nie obserwuje się statystycznie istotnych trendów związanych ze zmianami klimatycznymi w Europie Środkowej. Dlatego wybór krótkich okresów referencyjnych przy implementacji wariantowych scenariuszy modelowych bez ich dokładnej analizy może prowadzić do przypadkowego przeszacowania lub niedoszacowania ładunków osadów w poszczególnych miesiącach.

Wykazane wcześniej zależności – decydujący wpływ opadów atmosferycznych na transport zawiesiny, jak również przedstawione w podrozdziale *Zmiany opadów atmosferycznych w scenariuszach wariantowych* możliwe różnice w projekcjach opadów atmosferycznych w zależności od doboru modeli w wiązce – skłoniły autorów do oceny znaczenia także tego aspektu dla wyników modelowania środowiskowego. Wybór ostatecznego zestawu modeli dla tego obszaru był oparty na zdolności do symulacji obecnego i niedawnego klimatu lub zdolności do odzwierciedlenia wzorca powiązań klimatycznych w badanym regionie (Lutz i in. 2016; Khan i in. 2018). Dla badań środowiskowych najistotniejsza wydaje się zawartość wilgoci, aczkolwiek jej wpływ na parametry środowiskowe jest rzadko badany. W tej analizie wyodrębnione zostały zestawy modeli klimatycznych dające niższe (suche) i wyższe (mokre) niż obserwowane sumy opadów. Utworzone skrajne



Ryc. 7. Miesięczny rozkład (t·m^{-1}) ładunków zawiesiny w profilu obliczeniowym dla podejścia obszarowego oraz 30-letniego okresu referencyjnego dla scenariuszy RCP 4,5 i 8,5 dla bliskiej i dalekiej przyszłości (1:2026–2035 i 2:2046–2055); wiązka modeli (e), modele suche (d) i mokre (w) (kolory jak w tab. 2)

Fig. 7. Monthly distribution of sediment loads (t·month^{-1}) at the calculation profile for the areal approach and a 30-year reference period, for RCP 4.5 and 8.5 scenarios in the near (1: 2026–2035) and far (2: 2046–2055) future; model ensemble (e), dry (d), and wet (w) sub-ensembles (colours as in Table 2)

Źródło: opracowanie własne.

Source: own elaboration.

wiązki prognoz opadów zostały wprowadzone do modelu środowiskowego, następnie zaś oszacowano zakres możliwych wartości ekstremalnych ładunków zawiesiny. Zgodnie z oczekiwaniami wariantowe scenariusze oparte na wyodrębnionych podzbiorach modeli mokrych i suchych przełożyły się na odpowiednio wysokie i niskie przewidywane przyszłe roczne ładunki zawiesiny dostarczanej do zbiornika. Symulacje przeprowadzone z użyciem obu podzbiorów wykazały, że różnica w całkowitych ładunkach osadów może przekraczać 3000 t rocznie. Co ważniejsze, nasze wyniki pokazują, że zastosowanie jedynie modeli suchych lub mokrych znacząco zmienia wzorzec miesięcznych ładunków zawiesiny (ryc. 7). Dla suchych podzbiorów szczyt dostawy zawiesiny jest przewidywany na maj–czerwiec, podczas gdy dla mokrych podzbiorów okres wysokiego ładunku przesuwa się na wczesną wiosnę. Szczyt ten może trwać od marca do sierpnia, co wynika z prognozowanych zmian opadów.

Warto również zauważyć, że ekstremalne ładunki zawiesiny w podzbiorze suchym mogą w danym miesiącu przekraczać prognozy wiązki mokrej. Dlatego dobór zestawu modeli jest szczególnie istotny w przypadku analiz zanieczyszczeń transportowanych przez cząstki erodowane ze zlewni. Jeśli w wiązce uwzględniono by jedynie modele mokre, związany z tym szczyt ładunków osadów pojawiłby się wcześniej i zbiegał się z czasem, zanim jeszcze zaczyna się wegetacja, gdy stosuje się zwiększone nawożenie w analizowanej zlewni. Oznaczałoby to zwiększone ryzyko zanieczyszczenia zbiornika związkami biogenicznymi, a w konsekwencji wyższe ryzyko eutrofizacji.

Dyskusja i wnioski końcowe

Brak gotowych do użycia projekcji zmian klimatycznych w ujęciu regionalnym czy wręcz lokalnym (zlewnia rzeki górskiej) oraz, co oczywiste, brak odpowiedniej wiedzy do samodzielnego przygotowania scenariuszy klimatycznych większość ekspertów nauk o środowisku zajmujących się modelowaniem zmusza do korzystania z lokalnie dostępnych źródeł takich projekcji.

W zaprezentowanym artykule ukazano, jak istotną rolę odgrywa odpowiedni dobór takich projekcji zmian klimatycznych w analizach środowiskowych. Wykorzystany przykład górskiej zlewni Raby i wyniki uzyskane dla transportu ładunków zawiesiny wyraźnie pokazuje trzy możliwe podstawowe problemy pojawiające się w tego typu analizach: (i) wybór źródła danych o zmianach klimatycznych (pojedyncza stacja meteorologiczna – podejście punktowe, oraz sieć punktów tzw. węzłowych obejmująca cały obszar zlewni – podejście obszarowe); (ii) wybór okresów odniesienia (10- i 30-letnich) stosowanych w obu podejściach; (iii) wybór modeli klimatycznych uwzględnionych do tworzenia zalecanej projekcji wiązkowej.

Jak wskazano wcześniej, nadmiar prognoz zmian klimatycznych i brak jasnych informacji o reprezentatywności modeli dla konkretnych regionów i zastosowań z jednej strony, a brak specjalistycznej wiedzy lub odpowiednich źródeł danych z drugiej mogą prowadzić do znacznych przeszacowań lub niedoszacowań modelowanych parametrów środowiskowych.

Literatura

Abbaspour K.C., 2012, SWAT-CUP-2012.SWAT Calibration and Uncertainty program–A User Manual, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf.

Ali S.A., Aadhar S., Shah H.L., Mishra V., 2018, *Projected increase in hydropower production in India under climate change*, Scientific Reports, 8(1), 12450.

Anandhi A., Frei A., Pierson D.C., Schneiderman E.M., Zion M.S., Lounsbury D., Matonse A.H., 2011, *Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment*, Water Resources Research, 47, 03501.

Andaryani S., Nourani V., Trolle D., Dehghani M., Asl A.M., 2019a, *Assessment of land use and climate change effects on land subsidence using a hydrological model and radar technique*, Journal of Hydrology, 578, 124070.

Andaryani S., Trolle D., Nikjoo M.R., Moghadam M.R., Mokhtari D., 2019b, *Forecasting near-future impacts of land use and climate change on the Zilbier river hydrological regime, northwestern Iran*, Environmental Earth Sciences, 78, 1–14.

Ba W., Du P., Liu T., Bao A., Luo M., Hassan M., Qin C., 2018, *Simulating hydrological responses to climate change using dynamic and statistical downscaling methods: A case study in the Kaidu River Basin, Xinjiang, China*, Journal of Arid Land 10, 905–920.

Berhanu B., Seleshi Y., Demisse S.S., Melesse A.M., 2016, *Bias correction and characterization of climate forecast system re-analysis daily precipitation in Ethiopia using fuzzy overlay*, Meteorological Applications, 23(2), 230–243.

Bojanowski D., Orlińska-Woźniak P., Wilk P., Jakusik E., Szalińska E., 2024, *Spatial and temporal changes in nutrient source contribution in a lowland catchment within the Baltic Sea region under climate change scenarios*, Water Resources Research, 60, e2023WR034979.

Borrelli P., Robinson D.A., Panagos P., Lugato E., Yang J.E., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L., Ballabio C., 2020, *Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070)*, Proceedings of the National Academy of Sciences 117(36), 21994–22001.

Brighenti T.M., Bonumá N.B., Grison F., de Almeida Mota A., Kobiyama M., Borges Chaffe P.L., 2019, *Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model*, Ecological Engineering, 127, 103–113.

Bucała-Hrabia A., Kijowska-Strugała M., Bryndal T., Cebulski J., Kiszka K., Kroczak R., 2020, *An integrated approach for investigating geomorphic changes due to flash flooding in two small stream channels (Western Polish Carpathians)*, Journal of Hydrology: Regional Studies, 31, 10073.

Chicco D., Warrens M.J., Jurman G., 2021, *The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation*, PeerJ Computer Science, 7, 623.

Instrukcja dla stacji meteorologicznych, 2014, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.

Dumieński G., Lisowska A., Tiukało A., 2019, *Zagrożenia klimatyczne 44 miast w Polsce na podstawie miejskich planów adaptacji do zmian klimatu,* [w:] L. Chojnacka-Ożga, H. Lorenc (red.), *Współczesne problemy klimatu Polski*, IMGW, Warszawa, 189–201.

Eekhout J.P., de Vente J., 2022, *Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation*, Earth-Science Reviews, 226, 103921.

Elba E., Urban B., Ettmer B., Farghaly D., 2017, *Mitigating the impact of climate change by reducing evaporation losses: Sediment removal from the High Aswan Dam reservoir*, American Journal of Climate Change, 6(2), 230.

Eum H.I., Cannon A.J., 2017, *Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: Application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble*, International Journal of Climatology, 37(8), 3381–3397.

Falarz M., Bednorz E., 2021, *Snow cover change,* [w:] M. Falarz (red.), *Climate Change in Poland: Past, Present, Future*, Springer Climate, 375–390.

Gebrechorkos S.H., Bernhofer C., Hülsmann S., 2020, *Climate change impact assessment on the hydrology of a large river basin in Ethiopia using a local-scale climate modelling approach*, Science of the Total Environment, 742, 140504.

Gholami V., Booij M.J., Tehrani E.N., Hadian M.A., 2018, *Spatial soil erosion estimation using an artificial neural network (ANN) and field plot data*, Catena, 163, 210–218.

Gil E., Kijowska-Strugała M., Demczuk P., 2021, *Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies*, Catena, 207, 105682.

Giorgi F., Raffaele F., Coppola E., 2019, *The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections*, Earth System Dynamics, 10(1), 73–89.

Gorczyca E., Krzemień K., Sobucki M., Jarzyna K., 2018, *Can beaver impact promote river renaturalization? The example of the Raba River, southern Poland*, Science of the Total Environment, 615, 1048–1060.

Halecki W., Kruk E., Ryczek M., 2018, *Loss of topsoil and soil erosion by water in agricultural areas: A multi-criteria approach for various land use scenarios in the Western Carpathians using a SWAT model*, Land Use Policy, 73, 363–372.

Hosseini, S.H., Khaleghi, M.R., 2020, *Application of SWAT model and SWAT-CUP software in simulation and analysis of sediment uncertainty in arid and semi-arid watersheds (case study: The Zoshk-Abardeh watershed)*, Modeling Earth Systems and Environment, 6(4), 2003–2013.

Houshmand Kouchi D., Esmaili K., Faridhosseini A., Hossein Sanaeinejad S., Khalili D., Abbaspour K.C., 2017, *Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms*, Water, 9(6), 384.

IMGW, 2021, http://danepubliczne.imgw.pl (dostęp: 5.12.2021).

IPCC, 2022, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.

Izaguirre C., Losada I.J., Camus P., Vigh J.L., Stenek V., 2021, *Climate change risk to global port operations*, Nature Climate Change, 11(1), 14–20.

Kędra M., Szczepanek R., 2019, *Land cover transitions and changing climate conditions in the Polish Carpathians: Assessment and management implications*, Land Degradation and Development 30(9), 1040–1051.

Kędra M., 2017, *Altered precipitation characteristics in two Polish Carpathian basins, with implications for water resources*, Climate Research, 72(3), 251–265.

Khan A.J., Koch M., 2018, *Selecting and downscaling a set of climate models for projecting climatic change for impact* assessment *in the Upper Indus Basin (UIB)*, Climate. https://doi.org/10.3390/cli6040089 (dostęp: 20.08.2024).

Kijowska-Strugała M., Wiejaczka Ł., Gil E., Bochenek W., Kiszka K., 2017, *The impact of extreme hydro-meteorological events on the transformation of mountain river channels (Polish Flysch Carpathians)*, Zeitschrift für Geomorphologie 61(1), 75–89.

Knoben W.J., Freer J.E., Woods R.A., 2019, *Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores*, Hydrology and Earth System Sciences, 23(10), 4323–4331.

Kotlarski S., Keuler K., Christensen O.B., Colette A., Déqué M., Gobiet A., Goergen K., Jacob D., Lüthi D., van Meijgaard E., Nikulin G., Schär C., Teichmann C., Vautard R., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V., 2014, *Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble*, Geoscientific Model Development, 7, 1297–1333.

Li C., Zwiers F., Zhang X., Chen G., Lu J., Li G., Norris J., Tan Y., Sun Y., Liu M., 2019, *Larger increases in more extreme local precipitation events as climate warms*, Geophysical Research Letters 46(12), 6885–6891.

Li D., Lu X., Overeem I., Walling D.E., Syvitski J., Kettner A.J., Bookhagen B., Zhou Y., Zhang T., 2021, *Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia*, Science, 374(6567), 599–603.

Luo Q., 2016, *Necessity for post-processing dynamically downscaled climate projections for impact and adaptation studies*, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 30, 1835–1850.

Lutz A.F., ter Maat H.W., Biemans H., Shrestha A.B., Wester P., Immerzeel W.W., 2016, *Selecting representative climate models for climate change impact studies: An advanced envelope-based selection approach*, International Journal of Climatology, 36(12), 3988–4005.

Mahdian M., Hosseinzadeh M., Siadatmousavi S.M., Chalipa Z., Delavar M., Guo M., Abolfathi S., Noori R., 2023, *Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: Case study of the Anzali wetland*, Scientific Reports, 13(1), 5399.

Maraun D. Shepherd T.G., Widmann M., Zappa G., Walton D., Gutiérrez J.M., Hagemann S., Richter I., Soares P.M.M., Hall A., Mearns L.O., 2017, *Towards process-informed bias correction of climate change simulations*, Nature Climate Change, 7(11), 664–773.

McSweeney C.F., Jones R.G., 2016, *How representative is the spread of climate projections from the 5 CMIP5 GCMs used in ISI-MIP?*, Climate Services, 1, 24–29.

Mezghani A., Dobler A., Haugen J.E., Benestad R.E., Parding K.M., Piniewski M., Kardel I., Kundzewicz Z.W., 2017, *CHASE-PL Climate Projection dataset over Poland-bias adjustment of EURO-CORDEX simulations*, Earth System Science Data, 9(2), 905–925.

MPA, 2020, *Opracowanie planów adaptacji do zmian klimatu w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców*. http://44mpa.pl/ (dostęp: 1.06.2024).

Orlińska-Woźniak P., Szalińska E., Wilk P., 2020, *Do land use changes balance out sediment yields under climate change predictions on the Sub-Basin scale? The Carpathian Basin as an example*, Water, 12(5), 1499.

Panagos P., Ballabio C., Himics M., Scarpa S., Matthews F., Bogonos M., Poesen J., Borrelli P., 2021, *Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050*, Environmental Science and Policy, 124, 380–392.

Parding K.M., Dobler A., McSweeney C.F., Landgren O.A., Benestad R., Erlandsen H.B., Mezghani A., Gregow H., Räty O. Viktor E., El Zohbi J., Christensen O.B., Loukos H., 2020, *An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles*, Climate Services, 18, 100167.

Patro E.R., De Michele C., Granata G., Biagini C., 2022, *Assessment of current reservoir sedimentation rate and storage capacity loss: An Italian overview*, Journal of Environmental Management, 320, 115826.

PSMS, 2021, *Polish State Monitoring System*. http://www.gios.gov.pl/en/ (dostęp: 23.06.2022).

Ragettli S., Immerzeel W.W., Pellicciotti F., 2016, *Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(33), 9222–9227.

Ramos M.C., Lizaga I., Gaspar L., Quijano L., Navas A., 2019, *Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorus losses in soils with different use and soil hydrological properties*, Agricultural Water Management, 226, 105789.

Ranasinghe R., Wu C.S., Conallin J., Duong T.M., Anthony E.J., 2019, *Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on fluvial sediment supply to the coast by the world's large rivers: Pearl River Basin China*, Scientific Reports, 9(1), 9236.

Randle T.J., Morris G.L., Tullos D.D., Weirich F.H., Kondolf G.M., Moriasi D.M., Annandale G.W., Fripp J., Minear J.T., Wegner D.L., 2021, *Sustaining United States reservoir storage capacity: Need for a new paradigm*, Journal of Hydrology, 602, 126686.

Salas J.D., Obeysekera J., Vogel R.M., 2018, *Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: A review*, Hydrological Sciences Journal, 63(3), 325–352.

Samaniego L., Kumar R., Breuer L., Chamorro A., Flörke M., Pechlivanidis I.G., Schäfer D., Shah H., Vetter T., Wortmann M., Zeng X., 2017, *Propagation of forcing and model uncertainties on to hydrological drought characteristics in a multi-model century-long experiment in large river basins*, Climatic Change, 141, 435–449.

Şen Z., 2020, *Water structures and climate change impact: A review*, Water Resources Management, 34(13), 4197–4216.

Sentian J., Herman F., Kai S.K.S., 2022, *Soil erosion risk under climate change scenarios: A case study in rural area with varying land uses* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1103(1), 012037.

Shrestha N.K., Wang J., 2018, *Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate*, Science of the Total Environment, 625, 1030–1045.

Singh L., Saravanan S., 2020, *Impact of climate change on hydrology components using CORDEX South Asia climate model in Wunna, Bharathpuzha, and Mahanadi, India*, Environmental Monitoring and Assessment, 192(11), 678.

Syvitski J., Ángel J.R., Saito Y., Overeem I., Vörösmarty C.J., Wang H., Olago D., 2022, *Earth's sediment cycle during the Anthropocene*, Nature Reviews Earth and Environment, 3(3), 179–196.

Szalińska E., Zemełka G., Kryłów M., Orlińska-Woźniak P., Jakusik E., Wilk P., 2021, *Climate change impacts on contaminant loads delivered with sediment yields from different land use types in a Carpathian basin*, Science of the Total Environment, 755, 142898.

Szalińska E., Jarosińska E., Orlińska-Woźniak P., Jakusik E., Warzecha W., Ogar W., Wilk P., 2023, *Total nitrogen and phosphorus loads in surface runoff from urban land use (city of Lublin) under climate change*, Environmental Science and Pollution Research, 31, 48135–48153.

Szalińska E., Orlińska-Woźniak P., Wilk P., 2020, *Sediment load variability in response to climate and land use changes in a Carpathian catchment (Raba River, Poland)*, Journal of Soils and Sediments, 20, 2641–2652.

Szalińska E., Orlińska-Woźniak P., Wilk P., Jakusik E., Skalák P., Wypych A., Arnold J., 2024, *Sediment load assessments under climate change scenarios and a lack of integration between climatologists and environmental modelers*, Scientific Reports, 14, 21727.

Štěpánek P., 2006, *An-Clim – software for time series analysis (for Windows)*, Department of geography, Faculty of Natura Science, Masaryk University, Brno. 1.47MB. Available at http ://www.climahom.eu/AnClim.html (dostęp: 23.06.2022).

Toimil A., Losada I.J., Nicholls R.J., Dalrymple R.A., Stive M.J.F., 2020, *Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review*, Coastal Engineering 156, 103611.

Twardosz R., Cebulska M., 2020, *Temporal variability of the highest and the lowest monthly precipitation totals in the Polish Carpathian Mountains (1881–2018)*. Theoretical and Applied Climatology 140, 327–341.

Vannitsem S., Wilks D.S., Messner J. (red.), 2018, *Statistical postprocessing of ensemble forecasts*, Elsevier.

Vercruysse K., Grabowski R.C., Rickson R.J., 2017, *Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation*, Earth-Science Reviews, 166, 38–52.

Verma S.K., Prasad A.D., Verma M.K., 2022, *An assessment of ongoing developments in water resources management incorporating SWAT model: Overview and perspectives,* Nature Environment and Pollution Technology, 21(4), 1963–1970.

Walanus A., Cebulska M., Twardosz R., 2021, *Long-term variability pattern of monthly and annual atmospheric precipitation in the Polish Carpathian mountains and their Foreland (1881–2018)*, Pure and Applied Geophysics, 178(2), 633–650.

Wang H., Xie,T., Yu X., Zhang C., 2021, *Simulation of soil loss under different climatic conditions and agricultural farming economic benefits: The example of Yulin City on Loess Plateau*, Agricultural Water Management, 244, 106462.

Wilk P., Szlapa M., Hachaj P.S., Orlińska-Woźniak P., Jakusik E., Szalińska E., 2022, *From the source to the reservoir and beyond – tracking sediment particles with modeling tools under climate change predictions (Carpathian Mts.)*, Journal of Soils and Sediments, 22(11), 2929–2947.

WMO, 2017, *Guidelines on the calculation of climate normals.* WMO-No. 1203, https://library.wmo.int/records/item/55797-wmo-guidelines-on-the-calculation-of-climate-normals (01.06.2024).

WMO, 2021, *Guide to instruments and methods of observation.* WMO-No. 8. https://library.wmo.int/idurl/4/41650 (1.06.2024).

Woolway R.I., Merchant C.J., 2019, *Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change*, Nature Geoscience, 12(4), 271–276.

Wypych A., Sulikowska A., Ustrnul Z., Czekierda D., 2017, *Variability of growing degree days in Poland in response to ongoing climate changes in Europe*, International Journal of Biometeorology, 61, 49–59.

Wypych A., Ustrnul Z., Schmatz D.R., 2018, *Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians*, Journal of Mountain Science, 15(2), 237–253.

Xie M., Li Y., Cai X., 2023, *Hydrological responses to the synergistic climate and land-use changes in the upper Lancang river basin*, Environmental Research Letters, 19(1), 014045.

Badania częściowo finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu OPUS w programie Weave 47/022/I/ST02144/10.

Ewa Szalińska
Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
eszalinska@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5483-193X

Agnieszka Wypych
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa
agnieszka.wypych@uj.edu.pl; agnieszka.wypych@imgw.pl
ORCID: 0000-0002-5379-5834

Paweł Wilk
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa
pawel.wilk@imgw.pl
ORCID: 0000-0003-4302-5059

Paulina Orlińska-Woźniak
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa
paulina.wozniak@imgw.pl
ORCID: 0000-0002-2136-5119

Petr Skalák
Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences (Czech Globe)
Bělidla 986/4a, 603 00 Brno, Republika Czeska
skalak.p@czechglobe.cz
ORCID: 0000-0002-2877-6447