

A photograph of a forest stream with a small weir made of logs. The water is flowing over the weir, creating a small waterfall. The stream is surrounded by dense green forest, with tall evergreen trees on the right and deciduous trees on the left. The water is clear and reflects the surrounding greenery.

R A P O R T

Wykonanie modelu zlewni rzeki Soły do przekroju w Żywcu metodą SWAT

Raport podsumowujący proces przygotowania
i kalibracji modelu oraz wyniki jego obliczeń
sporządzone zostały na zlecenie Koalicji Dbamy o Wodę.

Opracował Zespół:
prof. UŚ dr hab. Damian Absalon
dr inż. Rafał Ulańczyk
dr hab. Magdalena Matysik

Poręba 2024

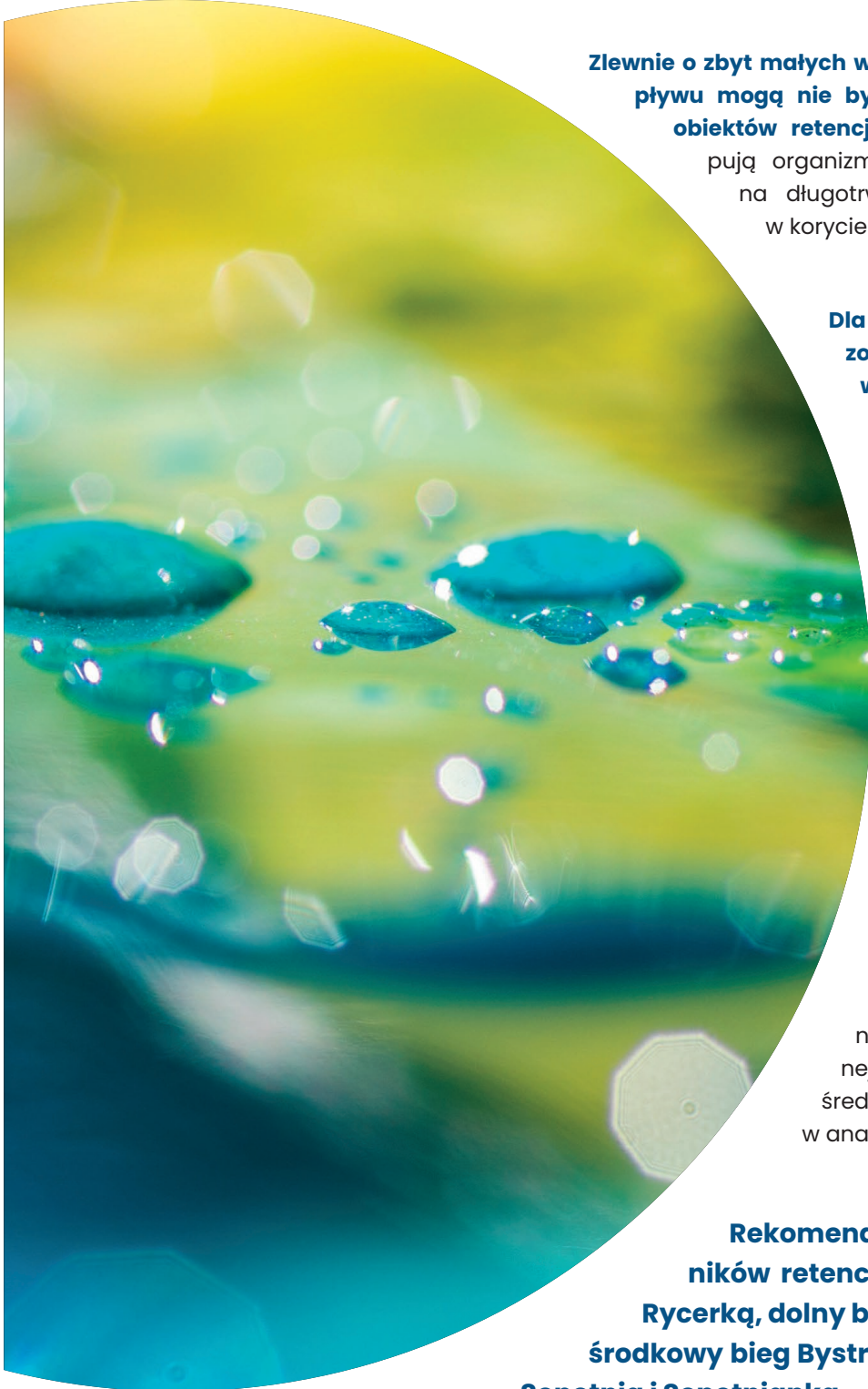
PODSUMOWANIE

W analizowanej zlewni obserwować można **duże zróżnicowanie przestrzenne opadów atmosferycznych z największymi wartościami w jej centralnej i południowej części**. Opady w poszczególnych zlewniach mogłyby być kryterium wyboru lokalizacji obiektów retencji, ale należy wziąć pod uwagę lokalny brak reprezentatywności obserwacji meteorologicznych, co zostało wskazane jako jedna z głównych przyczyn trudności kalibracji modelu.

Analizowaną zlewnię charakteryzuje też **zróżnicowanie przestrzenne wahań sezonowych opadów**. Największe z nich występują w zlewniach Koszarawy, Bystrzanki oraz Soły pomiędzy dopływami Bystrej (dopływ Soły) i Juszczyńki. Wahania te mogą z jednej strony zapewnić okresowe zasoby do napełniania zbiorników bez jednoczesnego pomniejszenia przepływów w okresach bezopadowych. Z drugiej strony wahania te nie powinny być też za duże i występujące tylko okresowo. Mogłoby to bowiem spowodować konieczność utrzymywania długiego okresu retencjonowania, co byłoby niekorzystne dla jakości wody w zbiorniku.

Duże wartości opadów atmosferycznych i ich sezonowe zróżnicowanie może wskazywać na potrzebę i jednocześnie możliwość **retencjonowania wód** w zlewni górnej Koszarawy i jej dopływów, a także w zlewni Bystrej i Soły między dopływami Bystrej (dopływ Soły) i Żabniczanki.

Proponuje się unikania lokalizacji zbiorników w zlewniach, gdzie występuje **relatywnie duża amplituda natężenia przepływu**. Małe wahania mogą wskazywać zlewnie o dużym potencjale, ponieważ zatrzymanie części wody nie uszczupli znacznie przepływu w poszczególnych sezonach. Dodatkowo w zlewniach tych zagwarantować będzie można **ciągły dopływ wody do zbiornika retencyjnego**, co pozwoli na utrzymanie w nim relatywnie wyrównanego poziomu piętrzenia. Jest to z kolei istotne dla zachowania użyteczności zbiornika, dla umożliwienia wielofunkcyjnego zastosowania oraz dla **zachowania stabilnych warunków bytowania organizmów zależnych od wód**. Natomiast zlewnie o dużych wahaniami sezonowych i rocznych mogą wskazywać miejsca, gdzie potrzebna jest dodatkowa retencja. Miejsca takie mogą być o tyle problematyczne, że brak wyrównanych dopływów utrudnić może retencjonowanie wód. Dlatego powyżej przekrojów o takiej charakterystyce **zalecane może być wskazanie zlewni cząstkowych o relatywnie wyrównanych przepływach**, gdzie można umiejscowić mniejsze obiekty retencyjne. Alternatywą lub rozwiązaniem dodatkowym w obszarach powyżej przekrojów o dużych wahaniami przepływu jest **budowa zbiorników o dłuższym czasie retencji**, ale o cechach i lokalizacjach, które nie sprzyjają niekorzystnym procesom/zjawiskom w zbiornikach (głównie eutrofizacja, stratyfikacja, tworzenie obszarów o deficytach tlenu).



Zlewnie o zbyt małych wahaniami sezonowych natężenia przepływu mogą nie być korzystne do lokalizowania w nich obiektów retencji. Dotyczy to obszarów, gdzie występują organizmy wodne i zależne od wód, wrażliwe na długotrwałe, niewielkie wahania stanu wody w korycie (np. niektóre gatunki makrofitów).

Dla całego analizowanego obszaru prognozowane są wzrosty natężenia przepływu wód. Wyjątkiem są nieliczne zlewnie cząstkowe i tylko w określonych sezonach. Nie zidentyfikowano zatem istotnego ryzyka zwiększenia niedoborów zasobów wodnych i tym samym potrzeby retencionowania wód w określonej lokalizacji na potrzeby wspomagania rolnictwa. Obszarem o relatywnie niewielkim przyroście prognozowanego przepływu jest zlewnia górnej Koszarawy oraz Bystrej (dopływ Soły) i Bystrej (dopływ Wody Ujsolskiej).

Prognozowane zmiany klimatu mogą skutkować znacznymi zmianami wahań sezonowych przepływów w rzekach. Dotyczy to takich obszarów, jak: zlewnia Rycerki i Soły do ujścia Rycerki, zlewnia Żabniczanki, południowe dopływy w górnej części zlewni Koszarawy, bezpośrednia zlewnia środkowej części Soły w analizowanym obszarze.

Rekomendowane cieki do lokalizacji zbiorników retencyjnych to: Soła między Czerną i Rycerką, dolny bieg Rycerskiego Potoku i Rycerki, środkowy bieg Bystrej (dopływ Wody Ujsolskiej) oraz Sopotnia i Sopotnianka.

SPIS TREŚCI

Podsumowanie	2
Spis treści	4
1 Przedmiot opracowania	5
2 Wstęp.....	5
3 Opis i charakterystyka zlewni rzeki Soły	5
3.1 Budowa geologiczna i rzeźba terenu.....	5
3.2 Warunki klimatyczne	6
3.3 Wody powierzchniowe i podziemne.....	6
4 Obszar analiz	7
5 Dane wejściowe	8
5.1 Mapa zlewni cząstkowych i ich powiązań	8
5.2 Ukształtowanie terenu	8
5.3 Pokrycie terenu.....	9
5.4 Właściwości podłoża	11
5.5 Utworzenie obszarów obliczeniowych.....	15
5.6 Presje	15
5.6.1 Pobory wód powierzchniowych.....	15
5.6.2 Zrzuty wód i ścieków.....	16
5.7 Dane meteorologiczne.....	16
5.8 Zmiany klimatu.....	17
6 Kalibracja modelu	19
7 Wyniki obliczeń	24
7.1 Ogólne wyniki dotyczące bilansu wodnego	24
7.2 Wyniki obliczeń wspierające ocenę potencjału retencyjnego i potrzeby retencji.....	26
7.3 Wpływ zmian klimatu	27
7.4 Podsumowanie oceny potencjału retencyjnego i potrzeby retencjonowania wód.....	33
8 Literatura i materiały źródłowe	35
Spis rysunków	38
Spis tabel	39

1. Przedmiot opracowania

Przedmiotem niniejszego opracowania jest Raport podsumowujący proces przygotowania i kalibracji modelu zlewni rzeki Soły zamkniętej przekrojem wodowskazowym w Żywcu wykonany metodą SWAT, wyniki jego obliczeń oraz wnioski i rekomendacje.

2. Wstęp

Raport przedstawia opis procedury przygotowania i kalibracji modelu opracowanego w ramach pracy pt. „Wykonanie modelu zlewni rzeki Soły do przekroju w Żywcu metodą SWAT”. Raport zawiera również opis danych wyjściowych modelu oraz wnioski i rekomendacje ze szczególnym uwzględnieniem aspektów związanych

Niniejszy raport został wykonany w ramach umowy zawartej dnia 1 września 2023 roku na rzecz Fleishman-Hillard Sp. z o.o. z siedzibą w Warszawie, ul. Ogrodowa 58, 00-876 Warszawa, operatora Koalicji Dbamy o Wodę, której inicjatorami są Grupa Żywiec i Żywiec Zdrój.

z potencjałem retencyjnym poszczególnych zlewni cząstkowych analizowanego obszaru. Należy tutaj podkreślić, że potencjał retencyjny rozumiany jest w niniejszej pracy jako cechy pozwalające ocenić daną zlewnię jako odpowiednią do lokalizowania w niej rozwiązań wspierających retencjonowanie wód płynących.

3. Opis i charakterystyka zlewni rzeki Soły

3.1 Budowa geologiczna i rzeźba terenu

Obszar zlewni rzeki Soły położony jest w Karpatach Zewnętrznych, które ze względu na budujące je skały są często nazywane Karpatami Fliszowymi.

Zgodnie z najnowszym podziałem fizycznogeograficznym (Solon et al., 2018) analizowany obszar położony jest w obrębie Prowincji Karpaty i Podkarpacie, Podprowincja Zewnętrzne Karpaty Zachodnie, makroregion Beskidy Zachodnie, w obrębie następujących mezoregionów: Beskid Śląski, Beskid Mały, Kotlina Żywiecka, Pasma Pewelsko-Krzeczowskie, Beskid Żywiecko-Orawski, Beskid Żywiecko-Kysucki i Międzygórze Jabłonkowsko-Koniakowskie (Rysunek 1).

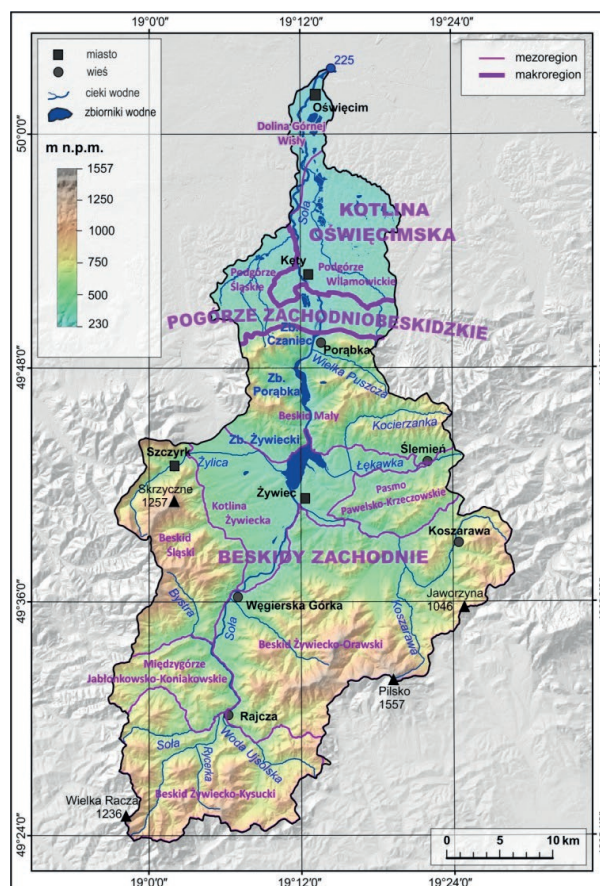
Ze względu na zróżnicowanie składu litostratygraficznego i tektoniki na obszarze zlewni możemy wyróżnić 5 jednostek strukturalnych: płaszczynę podśląską, płaszczynę śląską, płaszczynę przedmagurską, płaszczynę magurską – jednostkę raczańską i płaszczynę magurską – jednostkę bystrzycką.

Cechy litologiczne utworów powierzchniowych są jednym z elementów warunkujących przebieg procesów spływu i infiltracji wód opadowych. Budowa geologiczna jest złożona, część beskidzka zbudowana jest w przewadze ze skał starszych od czwartorzędu, natomiast obszar Kotliny Żywieckiej pokrywa nieciągły płaszcz utworów czwartorzędowych.

Beskid Śląski zbudowany jest z masywnych piaskowców godulskich i istebniańskich. Beskid Mały jest geologicznie jednorodny z Beskidem Śląskim, zbudowany głównie z piaskowców godulskich. Beskid Żywiecki budują głównie piaskowce serii magurskiej. Kotlina Żywiecka zbudowana jest z piaskowców i łupków warstw krośnieńskich, przykrytych na powierzchni nieciągłym płaszczem złożonym z iłów, piasków zwietrzelinowych oraz glin napływowych, zwietrzelinowych i lessowatych, tworzących się od plejstocenu po dzień dzisiejszy (Rysunek 2).

Dna dolin rzecznych wypełniają mułki, piaski i żwiry holocenijskie. W korytach spotykamy także kamieńce, a przy ujściach większych dopływów stożki napływowe.

Fragmentami, w obrębie dolin występują dobrze zachowane krawędzie i powierzchnie teras rzecznych o wysokości 5–12 m ponad dzisiejszymi dnami koryt, zbudowane



Rysunek 1. Podział fizycznogeograficzny i rzeźba zlewni Soły
Źródło: Stawowczyk (2023)

z piasków, żwirów i glin, które powstały u schyłku ostatniego zlodowacenia.

Nie bez znaczenia dla stosunków wodnych jest także występowanie na stokach eluwiów, czyli pokryw zwietrzelinowych przemieszanych przez procesy grawitacyjne. Na utworach gruboławicowych dominują pokrywy typu gruzowego. Natomiast na utworach z przewagą łupków i piaskowców cienkoławicowych tworzą się pokrywy w przewadze piaszczyste, gliniaste lub ilaste. Koluwia osuwiskowe (gliny wymieszane z rumoszem skalnym) występują licznie w Beskidzie Żywieckim na zboczach Wielkiej Rycerzowej, Oszusty, Krawców Wierchu, Lipowskiej, Romanki, Wielkiej i Małej Raczy, Magury oraz zboczach dolin rzecznych: dopływów Soły. W Beskidzie Śląskim liczne osuwiska znajdują się na wschodnich stokach Skrzycznego. Na stromych stokach Beskidu Małego osuwiska są stosunkowo nieliczne.

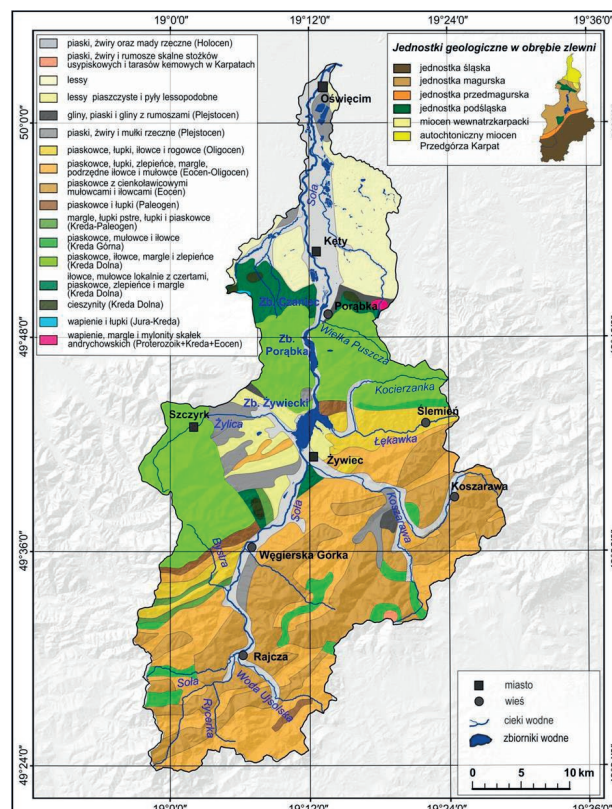
3.2 Warunki klimatyczne

Warunki klimatyczne zlewni Soły charakteryzują się dużą zmiennością wynikającą ze zróżnicowanej rzeźby i górskiego charakteru terenu. Średnia roczna temperatura powietrza w latach 1951–2023 wyniosła w Bielsku-Białej 8,4°C, natomiast w Lalikach 6,6°C (okres 1986–2020). Najcieplejszym okresem w ciągu roku jest przełom lipca i sierpnia ze średnią temperaturą ponad 17°C, natomiast najzimniejszym miesiącem jest styczeń (średnia – 1,5°C).

Duże zróżnicowanie rzeźby terenu powoduje także zróżnicowanie przestrzenne rozkładu opadów atmosferycznych. W południowej części zlewni roczna suma opadów znacznie przekracza 1000 mm, a w obszarach źródłowych Soły nawet 1200 mm (Stolarska i in., 2021). Najwyższe sumy opadów notowane są w czerwcu i lipcu, w których średnio występuje 16 dni z opadem. W chłodnej porze roku (XII–II) średnia miesięczna liczba dni z opadem śniegu wynosi

3.3 Wody powierzchniowe i podziemne

Soła jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Wisły. Sieć rzeczna w zlewni Soły jest gęsta, dobrze rozwinięta i charakteryzuje się koncentrycznym układem. Obejmuje przeważnie cieki stałe, które prowadzą wodę przez okres całego roku. Płyną one w wyraźnie wykształconych dolinach rzecznych. W zlewni występują także cieki okresowe i rowy. W górnym biegu Soła zasilana jest wodami wielu krótkich dopływów. Pierwsze większe cieki, które zasilają Sołę to jej dopływy prawobrzeżne – Rycerka z Potokiem Rycerskim oraz Woda Ujsolska i jej dopływy: Cicha, Bystra i Danielka. Kolejnymi dopływami Soły są prawobrzeżna Nickulina oraz Salomonka. Poniżej ujścia Salomonki, Sołę zasilają lewobrzeżna Nielewianka. Przed wpłynięciem Soły na teren Kotliny Żywieckiej uchodzi do niej prawobrzeżna Żabniczanka oraz krótsza Cięcinka. W Kotlinie Żywieckiej, na odcinku do Jeziora Żywieckiego, Soła zasilana jest przez wiele mniejszych cieków oraz kilka większych potoków i rzek. Do większych jej prawobrzeżnych dopływów należą: Juszczynka z Bystrą oraz Koszarawa, która jest najdłuższym dopływem Soły. Koszarawa zasilana jest przez wody wielu potoków



Rysunek 2. Budowa geologiczna zlewni rzeki Soły

Źródło: Stawowczyk (2023)

si ok. 10–13. Łącznie w ciągu roku występuje ok. 180 dni z opadami atmosferycznymi, z czego ok. 55 dni z opadami śniegu. Ma to swoje przełożenie także na relatywnie długie w skali kraju występowanie pokrywy śnieżnej, która w wyższych partiach gór może utrzymywać się nawet do 150 dni (Stolarska i in., 2021).

górskich, z których najważniejsze, to: Bystra, Przybyłka, Przyborowiec, Krzyżówka, Pewlica, Sopotnia i Przyłkówka (Machowski i in., 2005). Lewobrzeżne dopływy Soły uzupełniają: Przybiedza, Wieśnik, Rybny, Leśnianka z Twardorzeczką oraz Żarnówka, uchodząca do rzeki już w strefie cofkowej Jeziora Żywieckiego (Stawowczyk, 2023). Wszystkie wymienione rzeki i potoki mają górski charakter i cechują się dużą dynamiką przepływu i dużymi amplitudami ilości wód prowadzonych korytami rzek. Średni roczny przepływ Soły w przekroju Żywiec w latach 1956–2019 wynosił 15,6 m³/s, a średni roczny odpływ jednostkowy (SSq) to 19,9 dm³/s km². Odpływy w latach mokrych mogą być 3-krotnie większe niż odpływy w latach suchych. Przykładowo – odpływ w najbardziej mokrym 2010 roku był 3,17 razy większy niż odpływ w najbardziej suchym 1969 roku (Stolarska i in. 2021).

Pod względem hydrogeologicznym górna część zlewni Soły należy do regionu karpackiego, podregionu zewnętrzno-karpackiego, który cechuje bardzo mała zasobność w wody podziemne. Wody podziemne występują tu

w 2 poziomach wodonośnych: czwartorzędowym oraz fliszowym (utwory paleogenu i kredy). Piętro wodonośne w utworach czwartorzędu występuje na głębokości 1-5 m, z reguły nawiązując do zwierciadła wód powierzchniowych. Piętro fliszowe może występować bezpośrednio pod powierzchnią terenu – w miejscach przecięcia pojawiają się wtedy źródła, młaki i wycieki. Na kulminacjach występuje na głębokości do kilkudziesięciu metrów. Zasilanie zbiorników wód podziemnych następuje w wyniku infiltracji opadów atmosferycznych. Zbiorniki wód podziemnych w zlewni Soły charakteryzują się słabą wodonośnością, ale mają bardzo dobry stan jakościowy. Zasilanie głębszych

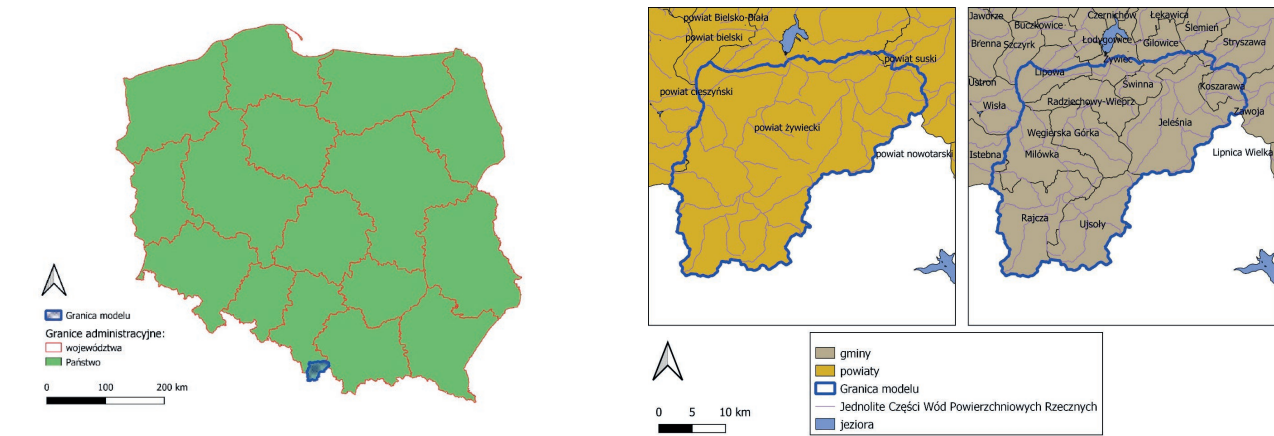
horyzontów wodonośnych uzależnione jest od litologii zwietrzliny zalegającej na powierzchni terenu, od stopnia nachylenia stoków, budowy geologicznej podłoża, a także warunków tektonicznych (uskoki). Najkorzystniejsze warunki zasilania występują w obrębie dolin rzecznych. W sposób sztuczny wody podziemne drenowane są przez ujęcia studzienne, które zaburzają naturalne krążenie wód, ale jedynie w niewielkiej strefie swego oddziaływania. Duża liczba źródeł o stosunkowo niewielkiej wydajności daje jedynie lokalnie możliwości zaopatrzenia w wodę przeznaczoną do spożycia (Stolarska i in., 2023).

4. Obszar analiz

Obszar analiz obejmujący górną część zlewni rzeki Soły znajduje się w południowej części województwa śląskiego. Obszar ten znajduje się niemal wyłącznie w granicach powiatu żywieckiego, a jedynie niewielkie fragmenty w granicach powiatów cieszyńskiego (część gminy Istebna) i suskiego (część gminy Stryczawa). W granicach powiatu żywieckiego obszar analiz obejmuje dziesięć gmin (Rysunek 3):

- Jeleśnia,
 - Koszarawa,
 - Lipowa (południowa część),
- Milówka,
 - Radziechowy-Wieprz,
 - Rajcza,
 - Świnna (bez niewielkiego fragmentu wzdłuż północnej granicy),
 - Ujsoly,
 - Węgierska Górka,
 - Żywiec (południowa część).

Rysunek 3. Lokalizacja obszaru analiz na tle granic administracyjnych



Obszar analiz obejmuje trzy rzeczne Jednolite Części Wód Powierzchniowych (JCWP) zaktualizowane w ramach II aktualizacji Planów Gospodarowania Wodami (PGW) (Dz.U.2023.335) (Tabela 1, Rysunek 4).

Całkowita powierzchnia obszaru analiz to 784,44 km².

Tabela 1. Zlewnie JCWP stanowiące obszar analiz

Kod JCWP	Nazwa JCWP	Powierzchnia [km ²]
RW200004213219	Soła do Wody Ujsolskiej	239,55
RW2000042132499	Koszarawa	257,90
RW20000421327999	Soła od Wody Ujsolskiej do zb. Tresna	286,99

5. Dane wejściowe

5.1 Mapa zlewni cząstkowych i ich powiązań

Podstawą do podziału obszaru modelu na zlewnie cząstkowe, dla których prowadzone były obliczenia, była mapa JCWP oraz Mapa Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:10 000 (MPHP10). Obszar analiz obejmuje 239 zlewni elementarnych MPHP10 (Rysunek 5). Średnia powierzchnia tych zlewni wynosi 3,282 km², a wartości minimalna i maksymalna to odpowiednio 0,007 i 16,356 km².

Dodatkowo dwie ze zlewni MPHP podzielono na części, aby lokalizacje wodowskazów użytych na potrzeby kalibracji modelu nie były oddzielone od granicy zlewni istotnymi dopływami. Dotyczy to zlewni MPHP zawierających wodowskazy Pewel Mała oraz Ujsoły. W efekcie, w modelu utworzono 241 zlewni cząstkowych.

5.2 Ukształtowanie terenu

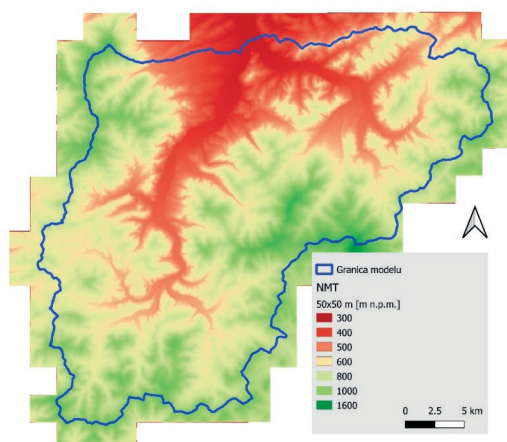
W modelu ukształtowanie terenu jest przypisywane do każdej zlewni (w formie wartości nachylenia zlewni i spadku cieków), a także do części składowych każdej ze zlewni, poprzez nadanie tym częściom jednej z klas nachylenia. Źródło danych dotyczących ukształtowania terenu, użyte na potrzeby pracy to Numeryczny Model Terenu o rozdzielczości poziomej 1 m (błąd średni wysokości zawiera się w przedziale do 0,2 m) (NMT 1 m, 2023).

Celem przygotowania modelu wysokości terenu było:

- 1) Obliczenie parametrów, takich jak rzędne i spadki charakteryzujące poszczególne zlewnie;
- 2) Wyznaczenie klas nachylenia terenu, dla których wewnątrz każdej zlewni cząstkowej utworzone zostaną odrębne obszary stanowiące podstawową jednostkę obliczeniową modelu – obszary jednorodnie hydrologicznie (ang. hydrologic response units – HRU) (patrz rozdział 5.5 „Utworzenie obszarów obliczeniowych”).

Model wysokości przetworzony został do rozdzielczości 50 metrów, co stanowiło kompromis pomiędzy szybkością przetwarzania danych i dokładnością pozwalającą na odzwierciedlenie charakterystycznych elementów ukształtowania terenu (Rysunek 6).

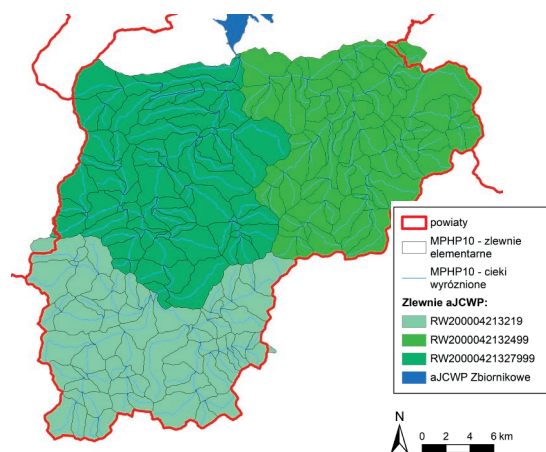
Rysunek 6. Numeryczny model terenu użyty do parametryzacji modelu SWAT



Rysunek 4. Zlewnie JCWP stanowiące obszar analiz

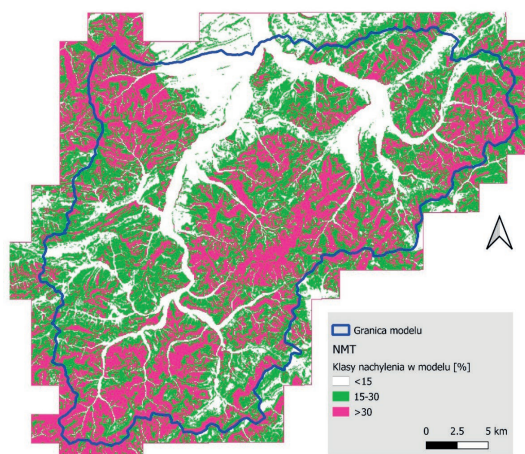


Rysunek 5. Zlewnie JCWP oraz zlewnie elementarne MPHP, stanowiące podstawę podziału obszaru modelu na zlewnie cząstkowe



Na podstawie NMT wyznaczono trzy klasy nachylenia terenu w taki sposób, aby stanowiły one proporcjonalne części analizowanego obszaru. Jako wartości progowe, rozdzielające klasy przyjęto nachylenie równe 15 i 30%, czego efektem był podział obszaru na części o udziałach wynoszących 26, 39 i 35% (Rysunek 7).

Rysunek 7. Klasy nachylenia terenu przyjęte w modelu SWAT



5.3 Pokrycie terenu

Podstawowym źródłem informacji o pokryciu terenu była Baza Danych Obiektów Topograficznych w skali 1:10000 (BDOT10k, 2023) udostępniona przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Na potrzeby przygotowania mapy wymaganej do obliczeń użyto danych BDOT10k, dotyczących kategorii „Pokrycie Terenu” (PT).

W obszarze analiz znajdowało się 17 701 poligonów reprezentujących 26 klas pokrycia terenu BDOT10k. Na potrzeby użycia mapy pokrycia terenu BDOT10k w modelu SWAT konieczne było powiązanie klas na mapie z bazą danych

modelu SWAT, która zawiera parametry liczbowe charakteryzujące poszczególne formy pokrycia/użytkowania terenu. Aby takie powiązanie było możliwe, konieczne było przygotowanie klucza powiązań, który przedstawiono w tabeli 2.

W efekcie opisanych powyżej prac, na potrzeby modelu przygotowano mapę reprezentującą 16 klas pokrycia terenu (Tabela 3), którym nadano identyfikatory numeryczne oraz kody odpowiadające tym, używanym w bazie danych modelu SWAT (Rysunek 8).

Tabela 2. Powiązanie klas pokrycia terenu BDOT10k z bazą danych modelu SWAT

Kategorie pokrycia terenu w bazie danych BDOT10k							Klasy użytkowania / pokrycia terenu w bazie modelu SWAT	
Poziom 1 - kategoria		Poziom 2 - klasa obiektów		Poziom 3		Dodatkowe wydzielenia		
Kod	Nazwa	Kod	Nazwa	Kod	Nazwa obiektu w BDOT 10k		Kod	Nazwa
PT	pokrycie terenu	PTWP	woda powierzchniowa	PTWP02	woda płynąca		WATR	Water
				PTWP03	woda stojąca			
		PTZB	zabudowa	PTWP04	zabudowa wielorodzinna		URHD	Residential-High Density
				PTWP05	zabudowa jednorodzinna		URBN	Residential
				PTWP06	zabudowa przemysłowo-składowa		UIDU	Industrial
				PTWP07	zabudowa handlowo-usługowa		UCOM	Commercial
				PTWP08	pozostała zabudowa		UINS	Institutional
				PTLZ	teren leśny i zadrzewiony	PTLZ01	las	liściasty
		iglasty	FRSE					Forest-Evergreen
		mieszany	FRST					Forest-mixed
		PTLZ02	zagajnik			liściasty	FRSD	Forest-Deciduous
						iglasty	FRSE	Forest-Evergreen
						mieszany	FRST	Forest-mixed
		PTLZ03	zadrzewienie			liściasty	FRSD	Forest-Deciduous
						iglasty	FRSE	Forest-Evergreen
						mieszany	FRST	Forest-mixed
		PTRK	roślinność krzewiasta	PTRK02	krzewy		RNGB	Range-Brush
		PTUT	uprawa trwała	PTUT01	ogród działkowy		AGRC	Agricultural Land-Close-grown
				PTUT02	plantacja		AGRL	Agricultural Land-Generi
				PTUT03	sad	pozostałe wydzielenia	ORCD	Orchard
				PTUT05	szkółka roślin ozdobnych			
		PTTR	roślinność trawiasta i uprawa rolna	PTTR01	roślinność trawiasta		PAST	Pasture
				PTTR02	uprawa na gruntach ornych		AGRL	Agricultural Land-Generi
		PTKM	teren pod drogami kołowymi, szynowymi i lotniskowymi	PTKM01	teren pod drogą kołową		UTRN	Transportation
				PTKM02	teren pod torowiskiem			
				PTKM03	teren pod drogą kołową i torowiskiem			
		PTGN	grunt nieużytkowany	PTGN02	teren kamienisty		BARR	Barren
				PTGN03	teren piaszczysty lub żwirowy			
				PTGN04	pozostały grunt nieużytkowany		RNGB	Range-Brush
		PTPL	plac	PTPL01	plac		UTRN	Transportation
		PTNZ	pozostały teren niezabudowany	PTNZ01	teren pod urządzeniami technicznymi lub budowlami		UIDU	Industrial
				PTNZ02	teren przemysłowo-składowy			

Rysunek 8. Mapa pokrycia terenu zgodna z klasyfikacją przyjętą w modelu

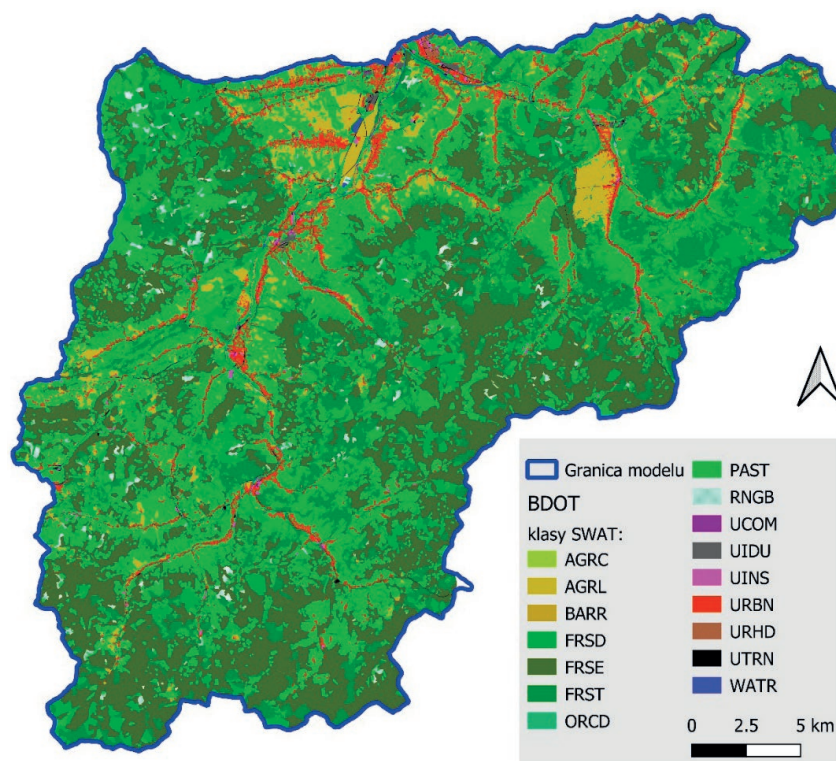


Tabela 3. Kody klas pokrycia terenu użytych w modelu reprezentującym stan aktualny

Symbol klasy pokrycia terenu w modelu	Identyfikator klasy pokrycia terenu w modelu	Powierzchnia [%]	Powierzchnia [km ²]
BARR	1	0,18	137,9
UTRN	2	0,56	440,7
PAST	3	29,87	23435,3
WATR	4	0,32	249,1
URBN	5	4,99	3915,6
FRST	6	15,00	11770,5
AGRC	7	0,01	11,3
UINS	8	0,39	304,6
FRSD	9	8,45	6625,5
UIDU	10	0,25	197,9
RNGB	11	1,04	813,2
FRSE	12	34,65	27183,8
ORCD	13	0,06	46,8
AGRL	14	4,14	3245,6
URHD	15	0,06	44,0
UCOM	16	0,03	25,0

5.4 Właściwości podłoża

Jedną z podstawowych informacji charakteryzujących obszar zlewni cząstkowych i ich części są dane dotyczące podłoża, na które spada deszcz i śnieg, i którego właściwości decydują o zdolności wody do przenikania poprzez to podłoże (filtracji), a następnie o możliwości zatrzymania wody w podłożu lub o dalszym jej przepływie do wód podziemnych i powierzchniowych. Dane charakteryzujące podłoże w modelu obejmują: miąższość warstwy gleby/gruntu, skład granulometryczny, przewodność hydrauliczną w stanie nasycenia, zawartość wody dostępnej dla roślin, gęstość, zawartość węgla organicznego, albedo i współczynnik erozji. Informacje te mogą być podane dla jednej lub większej liczby warstw.

Opisywaną bazę danych przygotowano w oparciu o następujące źródła:

- Baza danych LUCAS (de Brogniez i in., 2015; Ballabio i in., 2016):
 - o Źródło danych o teksturze gleby (grupie granulometrycznej) oraz zawartości frakcji większej od piasku i węgla organicznego w warstwie przypowierzchniowej. W danych występowały braki (luki przestrzenne) uzupełnione interpolacją. Dane mają postać map rastrowych o rozdzielczości 0,5 km.

- Baza „SGDBE_v2” (Panagos, 2006):
 - o Źródło danych o miąższości gleby, o głębokości występowania zmiany tekstury oraz o teksturze drugiej warstwy gleby w przypadku, gdy zidentyfikowano drugą warstwę. W danych są braki (luki przestrzenne), które uzupełniono interpolacją w przypadku miąższości gleby. W przypadku pozostałych parametrów brak danych interpretowano jako brak drugiej warstwy gleby. Dane mają postać map rastrowych o rozdzielczości 1 km.
- Baza „Copernicus Global Land Service (CGLS) Surface Albedo (SA) Version 1” (Geiger i in., 2008; Carrer i in., 2010):
 - o Źródło danych o albedo wyznaczonego dla promieniowania krótkofalowego dla interwałów 30-dniowych i rozdzielczości 1 km.

W tabeli 4 zestawiono zakresy danych i klasyfikacje poszczególnych parametrów, których kombinacje stanowiły podstawę do wyznaczenia klas gleb zgodnych z wymaganiami modelu SWAT.

Tabela 4. Zakresy danych i klasyfikacje poszczególnych parametrów, których kombinacje stanowiły podstawę do wyznaczenia klas gleb zgodnych z wymaganiami modelu SWAT

Klasy granulometryczne pierwszej warstwy gleby		
Klasa	Źródło: Baza „LUCAS topsoil physical properties for Europe”, parametr „textureUSDA” oznaczający teksturę gleby zgodną z klasyfikacją USDA.	Wartość docelowa w modelu (udział procentowy pyłu, ilu i piasku)
1	Clay	Dla klas wyznaczono reprezentatywne udziały poszczególnych frakcji zgodnie z opisem w dalszej części tekstu
2	Silty Clay	
3	Silty Clay-Loam	
4	Sandy Clay	
5	Sandy Clay-Loam	
6	Clay-Loam	
7	Silt	
8	Silt-Loam	
9	Loam	
10	Sand	
11	Loamy Sand	
12	Sandy Loam	

c.d. tabela 4. Zakresy danych i klasyfikacje poszczególnych parametrów, których kombinacje stanowiły podstawę do wyznaczenia klas gleb zgodnych z wymaganiami modelu SWAT

Udział frakcji większej niż piasek		
klasa	Źródło: Baza „LUCAS topsoil physical properties for Europe”, parametr “Coarse Fragments”. Przedziały klas ustalono na podstawie pięciu kwantyli dla danych z obszaru Polski, a wartości reprezentujące klasy to wartości środkowe z przedziałów.	Wartość docelowa w modelu [%]
1	0 – 6,1% (0–1% to tylko 0,01, a 0–2% to około 0,05% ogółu danych dla Polski)	4,9
2	6,1–8,7%	7,3
3	8,7–13,0%	10,5
4	13,0–21,0%	16,5
5	21,0–46,3% (wartości 34–46% stanowią jedynie 0,05% wartości występujących na obszarze Polski)	27,2
Zawartość węgla organicznego		
Klasa	Źródło: Baza „Topsoil Soil Organic Carbon (LUCAS) for EU25”. Wartości ze źródłowej bazy danych wyrażone w g C/kg przetworzono do dziesięciu klas o równych przedziałach.	Wartość docelowa w bazie modelu SWAT [%]
1	OC < 17,5	1,5
2	17,5 <= OC < 22,5	2
3	22,5 <= OC < 27,5	2,5
4	27,5 <= OC < 32,5	3
5	32,5 <= OC < 37,5	3,5
6	37,5 <= OC < 42,5	4
7	42,5 <= OC < 47,5	4,5
8	47,5 <= OC < 52,5	5
9	52,5 <= OC < 57,5	5,5
10	57,5 <= OC	7
Mięgskość gleby (głębokość do warstwy stanowiącej granicę strefy korzeniowej – skały / warstwa nieprzepuszczalna)		
Klasa	Źródło: Baza „SGDBE”, parametr “Depth to rock” (DR).	Mięgskość przyjęta w bazie modelu SWAT [cm]
1	DR = 4 = S(hallow): 0–40 cm	20
2	DR = 3 = M(oderate): 40–80 cm	60
3	DR = 1 = D(eep): 80–120 cm	100
4	DR = 5 = V(ery) D(eep): > 120 cm	150
Albedo		
Klasa	Źródło: Baza „Copernicus Global Land Service (CGLS) Surface Albedo (SA) Version 1”. Wartości ze źródłowej bazy danych przetworzono do dziewięciu klas o równych przedziałach.	Wartość przyjęta w modelu [%]
1	albedo < 10	7,5
2	10 <= albedo < 15	12,5
3	15 <= albedo < 20	17,5
4	20 <= albedo < 25	22,5
5	25 <= albedo < 30	27,5
6	30 <= albedo < 35	32,5
7	35 <= albedo < 40	37,5
8	40 <= albedo < 45	42,5
9	45 <= albedo	47,5

Głębokość zmiany grupy granulometrycznej (jeżeli zidentyfikowano)		
Klasa	Źródło: Baza „SGDBE”, parametr „TEXT-DEP-CHG: Depth class to a textural change of the dominant and/or secondary surface texture” (txtdepchg).	Wartość przyjęta w modelu [cm]
1	0 No information	0
2	1 Textural change between 20 and 40 cm depth	30
3	2 Textural change between 40 and 60 cm depth	50
4	3 Textural change between 60 and 80 cm depth 5 Textural change between 20 and 120 cm depth	70
5	4 Textural change between 80 and 120 cm depth	100
6	6 Textural change between 20 and 60 cm depth	40
7	7 Textural change between 60 and 120 cm depth	90

Klasy granulometryczne drugiej warstwy gleby (jeżeli zidentyfikowano)		
Klasa	Źródło: Baza „SGDBE”, parametr „TEXT-SUB-DOM: Dominant sub-surface textural class”.	Wartość przyjęta w modelu
1	Coarse (18% < clay and > 65% sand)	Dla klas wyznaczono reprezentatywne udziały poszczególnych frakcji zgodnie z opisem w dalszej części tekstu
2	Medium (18% < clay < 35% and >= 15% sand, or 18% < clay and 15% < sand < 65%)	
3	Medium fine (< 35% clay and < 15% sand)	
4	Fine (35% < clay < 60%)	
5	Very fine (clay > 60%)	
0	No information	
9	No mineral texture (Peat soils)	

Na podstawie tekstury pierwszej i drugiej warstwy podłoża, a także pozostałych klasyfikacji podanych w tabeli 4 (miększość podłoża, głębokość zmiany tekstury, zawartość frakcji większej niż piasek, zawartość węgla organicznego, albedo) sporządzono ogólną klasyfikację właściwości podłoża. Klasyfikacja ta obejmuje 460 kombinacji opisanych powyżej cech podłoża na analizowanym obszarze.

Dużą część danych, wymaganych przez model SWAT przypisano poszczególnym klasom gleby bezpośrednio na podstawie danych źródłowych. Dotyczy to takich parametrów, jak: miększość gleby, liczba warstw gleby, zawartość węgla organicznego, zawartość frakcji większej od piasku, albedo oraz głębokość występowania zmiany składu granulometrycznego (o ile występuje na danym obszarze).

Pozostałe właściwości przypisano poszczególnym klasom gleby w tworzonej bazie danych modelu SWAT na podstawie klas granulometrycznych, które zgodnie z klasyfikacją w materiałach źródłowych nazywane są „teksturą gleby” (dotyczy pierwszej warstwy gleby – bazy LUCAS) i „grupą tekstury gleby” (dotyczy drugiej warstwy gleby – bazy SGDBE) (Tabela 7). Dla obu tych klasyfikacji wyznaczono reprezentatywne udziały ilu, pyłu i piasku (Tabela 6). Zrobiono to wyznaczając centroidy figur reprezentujących poszczególne klasy na trójkątach uziarnienia (Rysunek 9). Przyjęte w bazie danych udziały frakcji przedstawiono w tabeli 5.

Rysunek 9. Punkty reprezentujące 12 tekstur z bazy LUCAS (rysunek lewy) i 5 grup tekstur z bazy SGDBE (rysunek prawy) – środki ciężkości figur

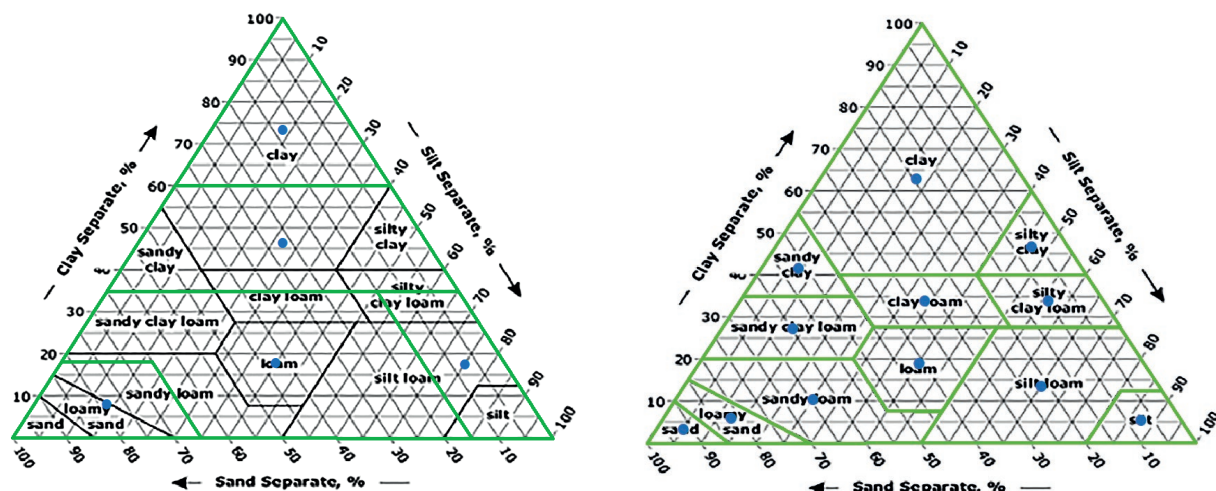


Tabela 5. Udziały iłu, pyłu i piasku reprezentujące klasy granulometryczne przyjęte w modelu na podstawie bazy danych LUCAS

Klasyfikacja tekstury gleby (USDA) stosowana w bazie LUCAS		Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów (PTG, 2009)		Udział frakcji [%] (przyjęto środki ciężkości pól na wykresach reprezentujących klasy)		
Nazwa	Wartość w źródłowej bazie	Nazwa	Symbol	Piasek / Sand (≤ 2 mm)	Pył / Silt (≤ 0.063 mm)	Ił / Clay (≤ 0.002 mm)
Sand	10	Piasek luźny + Piasek słabogliniasty	pl + ps	92	5	3
Loamy Sand	11	Piasek gliniasty	pg	82	12	6
Sandy Loam	12	Gлина piaszczysta + Gлина lekka	gp + gl	65	25	10
Loam	9	Gлина zwykła	gz	41	40	19
Silt-Loam	8	Pył gliniasty + Pył ilasty	pyg + pyi	22	65	13
Silt	7	Pył zwykły	pyz	7,5	87,5	5
Sandy Clay-Loam	5	Gлина piaszczysto-ilasta	gpi	60	13	27
Clay-Loam	6	Gлина ilasta	gi	32	34	34
Silty Clay-Loam	3	Gлина pylasto-ilasta	gpyi	10	56	34
Sandy Clay	4	Ił piaszczysty	ip	51,5	6,5	42
Silty Clay	2	Ił pylasty	ipy	6	47	47
Clay	1	Ił ciężki + Ił zwykły	ic + iż	19,5	17,5	63

Tabela 6. Udziały iłu, pyłu i piasku reprezentujące klasy granulometryczne przyjęte w modelu na podstawie bazy danych SGDBE

Grupy tekstury gleby (USDA) stosowane w bazie SGDBE		Udział frakcji [%] (przyjęto środki ciężkości pól na wykresach reprezentujących klasy)		
Nazwa	Wartość w źródłowej bazie danych	Piasek / Sand (≤ 2 mm)	Pył / Silt (≤ 0.063 mm)	Ił / Clay (≤ 0.002 mm)
Coarse	1	78	14,5	7,5
Medium	2	42,5	40	17,5
Medium fine	3	7,5	75	17,5
Fine	4	27	27	46
Very fine	5	13	13	74

Na podstawie opisanej na poprzedniej stronie informacji o składzie granulometrycznym i zawartości węgla obliczone zostały dla poszczególnych klas gleb dodatkowe parametry wymagane przez model SWAT.

Tabela 7. Parametry zależne od składu granulometrycznego przyjęte w modelu

Nazwa klasy w danych źródłowych	Wartość w źródłowej bazie danych (LUCAS / SGDBE)	Nazwa	Symbol	Udział frakcji [%] (przyjęto środki ciężkości pól na wykresach reprezentujących klasy)			Przewodność w stanie nasycenia (Ks) [mm/h]	Objętość wody dostępnej dla roślin (AWC) [mm/mm]	Gęstość nasypowa (BD) [g/cm]	Grupa hydrologiczna gleby
				Piasek / Sand (≤2 mm)	Pył / Silt (≤0.063 mm)	łł / Clay (≤0.002 mm)				
Klasyfikacja tekstury gleby (USDA) stosowana w bazie LUCAS		Klasyfikacja uziarnienia gleb (PTG, 2009)								
Sand	10	Piasek luźny + Piasek słabogliniasty	pl + ps	92	5	3	120,4342	0,0704	1,7856	B
Loamy Sand	11	Piasek gliniasty	pg	82	12	6	57,3409	0,0848	1,6646	C
Sandy Loam	12	Gлина piaszczysta + Gлина lekka	gp + gl	65	25	10	26,7649	0,1067	1,5570	C
Loam	9	Gлина zwykła	gz	41	40	19	9,5906	0,1366	1,4166	C
Silt-Loam	8	Pył gliniasty + Pył ilasty	pyg + pyi	22	65	13	22,3926	0,1800	1,4358	C
Silt	7	Pył zwykły	pyz	7,5	87,5	5	43,2975	0,2195	1,5483	C
Sandy Clay-Loam	5	Gлина piaszczysto-ilasta	gpi	60	13	27	3,4073	0,0950	1,4015	D
Clay-Loam	6	Gлина ilasta	gi	32	34	34	2,9239	0,1387	1,3138	D
Silty Clay-Loam	3	Gлина pylasto-ilasta	gpyi	10	56	34	4,5417	0,1736	1,2716	D
Sandy Clay	4	łł piaszczysty	ip	51,5	6,5	42	1,3193	0,0949	1,3203	D
Silty Clay	2	łł pylasty	ipy	6	47	47	2,8908	0,1630	1,2163	D
Clay	1	łł ciężki + łł zwykły	ic + iz	19,5	17,5	63	1,9920	0,1272	1,1992	D
Grupy tekstury gleby (USDA) stosowane w bazie SGDBE										
Coarse	1	Nie dotyczy – brak jednoznacznego powiązania klasyfikacji		78	14,5	7,5	42,5534	0,0895	1,6242	C
Medium	2			42,5	40	17,5	11,1663	0,1357	1,4315	C
Medium fine	3			7,5	75	17,5	17,4945	0,1893	1,3643	C
Fine	4			27	27	46	1,8221	0,1360	1,2598	D
Very fine	5			13	13	74	3,4515	0,1197	1,1631	D

5.5 Utworzenie obszarów obliczeniowych

Dane przestrzenne przedstawione w trzech poprzednich rozdziałach, opisujące charakter analizowanego obszaru, po nałożeniu na siebie, utworzyły 20 686 obszarów obliczeniowych. Obszary te są unikalnymi kombinacjami in-

formacji o klasie pokrycia terenu, klasie podłoża oraz klasie nachylenia terenu wewnątrz każdej zlewni cząstkowej modelu. Średnia wielkość obszaru obliczeniowego, dla którego model wykonuje symulację wynosi 3,44 ha.

5.6 Presje

5.6.1 Pobory wód powierzchniowych

W tabeli 8 zestawiono informacje, których źródłem jest „Analiza znaczących oddziaływań antropogenicznych wraz z oceną ich wpływu/oddziaływania na stan wód oraz oceną ryzyka nieosiągnięcia celów środowiskowych” (CDM, 2020) – opracowanie wykonane na potrzeby Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie.

Dane o poborze wód powierzchniowych dostępne były dla 18 punktów poboru zlokalizowanych w 14 zlewniach modelu (Tabela 8). W przypadku zlewni 153, 178 i 218 tabela przedstawia wielkości poboru zagregowane na podstawie 2–3 punktów występujących w tych zlewniach.

Tabela 8. Dane o poborach wód powierzchniowych w analizowanej zlewni (CDM, 2020)

Zlewnia modelu	Identyfikator ze źródłowej bazy danych	Pobory wód [10 000 m³/d]									
		Stałe	Zmienne dla poszczególnych miesięcy								
			Rok	3	4	5	6	7	8	9	10
70	3665			0,233	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233
74	3563		0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015		
105	3733					0,006	0,006	0,006	0,006		
109	3565	0,026									
128	3562	0,013									
131	3698	0,018									
153	3566+ 3567	0,026									
178	3559+ 3560+ 3561	0,026									
188	3558	0,003									
207	3557		2,160	2,160	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155		
216	3599	0,382									
218	3717+ 3725	0,568									
223	3715	0,183									
226	3718	0,065									

Pewne wartości podane w tabeli budzą wątpliwości dotyczące jakości danych źródłowych i ich użyteczności na potrzeby bilansowania zasobów wodnych. Na przykład pobór wiosenny w zlewni 207, zlokalizowany na dopływie Czerwonej Wody wynosi $2,16 \cdot 10\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, co daje $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$. Czerwona Woda jest rzeką o zlewni mniejszej od Juszczynki i Leśnianki – dwóch rzek, których przepływ był monitorowany w ramach pracy pt.: „Monitoring wód powierzchniowych rzeki Soły i Koszarawy” (Więzik, Madzia, 2022). Monitoring ten wskazał na średni przepływ Juszczynki i Leśnianki równy odpowiednio $0,305$ i $0,691 \text{ m}^3/\text{s}$. Przy założeniu, że przepływ w Czerwonej Wodzie jest mniejszy niż w Juszczynce i znacznie mniejszy niż w Leśniance (ze względu na proporcje zlewni), pobór wód rzędu $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ mógłby być zbliżony do całkowitego przepływu Czerwonej Wody, a wspomnieć należy, że punkt poboru umiejscowiony jest na niewielkim

dopływie Czerwonej Wody. Powyższe sugeruje, że w danych źródłowych dotyczących poborów wody znajdują się wartości reprezentujące chwilowe, maksymalne natężenie poboru, a nie wartości charakteryzujące poszczególne miesiące. W przeciwnym wypadku pozwolenie na pobór dopuszczaloby całkowite pozbawienie ciekłu wody.

Sumaryczny pobór wód z wyłączeniem wątpliwej wartości dla zlewni nr 207 wynosi $0,199 \text{ m}^3/\text{s}$.

Biorąc pod uwagę niepewność danych dotyczących miesięcznych poborów wody, do modelu wprowadzono jedynie oficjalne dane dotyczące poborów rocznych (kolumna „Rok” w tabeli 8), które bazują na informacji o opłatach za korzystanie ze środowiska. Sumaryczny pobór wód uwzględniony w modelu wynosi $0,152 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.6.2 Zrzuty wód i ścieków

Jedyna informacja zawarta w „Analizie znaczących oddziaływań antropogenicznych wraz z oceną ich wpływu/oddziaływania na stan wód oraz oceną ryzyka nieosiągnięcia celów środowiskowych” (CDM, 2020), posiadają-

ca wartość natężenia zrzutu to punkt zrzutu w zlewni nr 162 – Oczyszczalnia ścieków w Cięcinie. Jest to zrzut do Soły o natężeniu $0,069 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.7 Dane meteorologiczne

W ramach wykonanej pracy pozyskano i przetworzono dane meteorologiczne ze stacji Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej (PSHM) w obszarze analizowanej zlewni. Dane obejmowały następujące parametry o dobowej rozdzielczości: opad atmosferyczny, temperatura minimalna i maksymalna, prędkość wiatru i wilgotność względna.

Dane zgromadzono dla okresu obejmującego lata 2016–

2021. Okres ten został wybrany tak, aby obejmował lata o różnorodnym charakterze opadowym. Zgodnie z klasyfikacją Z. Kaczorowskiej (1962) dla stacji referencyjnej, najbliższej analizowanej zlewni (Bielsko-Biała), zaproponowany okres obejmuje po dwa lata normalne, suche i wilgotne (2016, 2019 – normalny, 2017, 2020 – wilgotny, 2018, 2021 – suchy) (IMGW, 2023). Dodatkowo dane meteorologiczne

pozyskano dla roku 2022 w celu umożliwienia wykonania kalibracji modelu w oparciu o dane pomiarowe, dotyczące natężenia przepływu w rzekach, wykonane w ramach pracy pt. „Monitoring wód powierzchniowych rzeki Soły i Koszarawy. Raport z realizacji prac wykonanych w roku hydrologicznym 2021-2022” (Więzik, Madzia, 2022). Samych analiz wykonywanych przy użyciu modelu nie wydłużono o rok 2022, ponieważ był to rok suchy i jego uwzględnienie mogłoby prowadzić do odzwierciedlenia w modelu warunków charakteryzujących w większym stopniu lata o takim właśnie charakterze.

Biorąc pod uwagę kompletność danych dla analizowanego okresu i perspektywę przyszłego wydłużenia okresu analiz sięgających wstecz do lat 1990., dane meteorologiczne pozyskano z następujących stacji:

Temperatura, wilgotność, prędkość wiatru, opad atmosferyczny:

- o Radziechowy (identyfikator: 249190890)
- o Nowy Dwór (identyfikator: 249190330)

Dane obu stacji połączono w jeden ciąg. Są one zlokalizowane w odległości 817 metrów od siebie i posiadają uzupełniające się ciągi danych z okresem ich łączenia na przełomie lat 2007-2008.

Opad atmosferyczny:

- o Lipowa (identyfikator: 249190290)
- o Pewel Mała (identyfikator: 249190310)
- o Kamesznica (identyfikator: 249190380)
- o Korbielów (identyfikator: 249190440)
- o Rajcza (identyfikator: 249190540)
- o Rycerka Górna (identyfikator: 249190580)
- o Żabnica (identyfikator: 249190420)

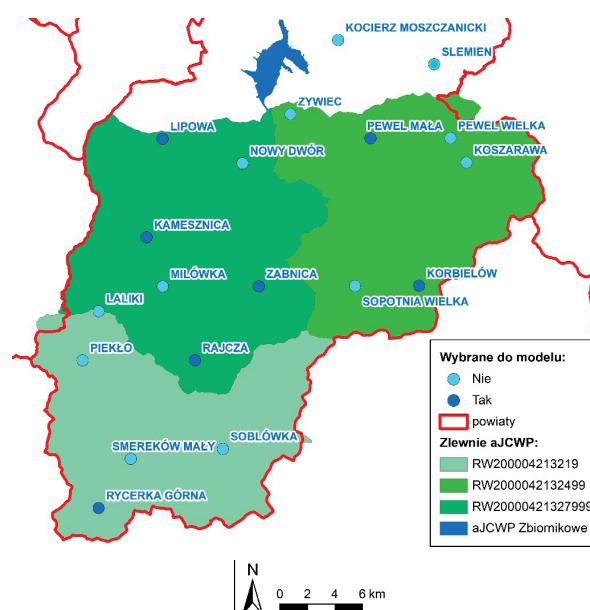
W analizowanej zlewni brak jest punktu długookresowego monitoringu natężenia promieniowania słonecznego. Najbliższa stacja aktynometryczna położona jest w Bielsku-Białej w odległości od 14 do 46 km od poszczególnych zlewni cząstkowych modelu. W związku z tym jako źródło danych o promieniowaniu użyto bazy ERA5, która jest reanalizą piątej generacji globalnych danych klimatycznych, wykonaną przez Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody (ECMWF). Reanaliza łączy obserwacje meteorologiczne z wynikami modelowania sięgającymi kilka dekad wstecz i jej efektem jest spójna baza danych odzwierciedlająca przeszłe warunki meteorologiczne i udostępniana w ramach Programu Copernicus (Muñoz, 2019). Dane te dla obszaru Polski posiadają rozdzielczość około 9x9 km. Na potrzeby modelu pobrane zostały dane dla komórki bazy danych ERA5 („ERA5-Land hourly data from 1950 to present”) obejmującej lokalizację stacji meteorologicznej w Radziechowach.

Pomimo braku luk w opisanych wyżej obserwacyjnych danych meteorologicznych, do modelu wprowadzono również dane statystyczne opisujące miesięczne charakterystyki wspomnianych powyżej pięciu parametrów meteorologicznych. Dane te są używane w modelu wówczas, gdy ciągi danych obserwacyjnych zawierają braki. W wersji modelu zastosowanej na potrzeby niniejszej

pracy użycie danych statystycznych nie jest wymagane (ze względu na kompletność danych obserwacyjnych), ale dane statystyczne wprowadzono na wypadek konieczności aktualizacji modelu w przyszłości. Dane statystyczne obejmują następujące parametry: średnia i odchylenie standardowe z maksymalnych i minimalnych temperatur dobowych; średnia, współczynnik skośności i odchylenie standardowe sumy opadów dobowych; prawdopodobieństwo wystąpienia dnia z opadem po dniu bez opadu i po dniu z opadem; liczba dni z opadem w miesiącu; maksymalna suma opadu 0,5 h; średnie dobowe natężenie promieniowania słonecznego, wilgotność i prędkość wiatru. Dane wprowadzone do modelu pochodzą z bazy danych Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Dile, Srinivasan, 2014; Fuka i in., 2013).

5.8 Zmiany klimatu

Na potrzeby parametryzacji modelu i umożliwienia wykonania symulacji dla scenariuszy zmian klimatu, pozyskano i przetworzono dane o prognozowanych zmianach klimatu w zakresie opadu atmosferycznego, wilgotności względnej powietrza, prędkości wiatru i temperatury powietrza. Do tego celu wykorzystano wyniki projektu pt.: „Baza wiedzy o zmianach klimatu i adaptacji do ich skutków oraz kana-



Rysunek 10. Stacje opadowe wybrane do parametryzacji modelu na podstawie dostępności danych dla okresu 2016-2022 i dla lat wcześniejszych.

tów jej upowszechniania w kontekście zwiększania odporności gospodarki, środowiska i społeczeństwa na zmiany klimatu oraz przeciwdziałania i minimalizowania skutków nadzwyczajnych zagrożeń” (KLIMADA 2.0), realizowanego przez Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy (Strużewska i in., 2020). Dane projektu KLIMADA 2.0 dostępne są na stronie: <http://klimada2.ios.gov.pl/>.

Horyzonty czasowe, dla których pozyskano dane to dziesięciolecie od 2021-2030 do 2091-2100, a prognoza dla tych okresów odnoszona jest w niniejszej pracy do horyzontu 2011-2020, przyjętego, jako stan aktualny.

W pracy wykorzystano dwa scenariusze, które różnią się intensywnością zmian klimatu. Są to:

1) Scenariusz RCP4.5 – Representative Concentration Pathways 4,5 [W/m²]

Scenariusz zakładający wprowadzanie nowych technologii dla uzyskania wyższej niż obecnie redukcji emisji gazów cieplarnianych – w roku 2100 osiągnięcie koncentracji CO₂ nieprzekraczającej 580 ppm (obecnie 400 ppm) oraz wymuszenia radiacyjnego 4,5 [W/m²].

Oznacza wzrost średniej temperatury Ziemi o 2,5°C względem epoki przedindustrialnej.

2) Scenariusz RCP8.5 – Representative Concentration Pathways 8,5 [W/m²]

Scenariusz zakładający utrzymanie aktualnego tempa wzrostu emisji gazów cieplarnianych, nazywany business as usual – w roku 2100 osiągnięcie koncentracji CO₂ na poziomie 1230 ppm (obecnie 400 ppm) oraz wymuszenia radiacyjnego 8,5 [W/m²].

Oznacza wzrost średniej temperatury Ziemi o 4,5°C względem epoki przedindustrialnej.

W tabeli 9 zestawiono prognozowane wartości zmian parametrów meteorologicznych dla analizowanego obszaru.

Tabela 9. Prognozowane zmiany klimatu w poszczególnych dekadach względem dekady 2011-2020 (na podstawie: Projekt KLIMADA 2.0)

Miesiące	rcp45									rcp85										
	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091		
opad - zmiana % (wyrażona ułamkiem)																				
rok	0,00	-0,01	0,02	-0,02	0,05	0,00	0,06	0,04	0,04	0,00	0,02	0,02	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,13		
1		0,00	0,07	-0,01	0,14	0,10	0,14	0,07	0,00		-0,03	0,04	0,11	-0,05	0,10	0,06	0,12	0,17		
2		0,11	0,16	0,09	0,21	0,13	0,16	0,08	0,12		-0,03	0,05	0,11	0,20	0,08	0,16	0,16	0,20		
3		-0,16	-0,06	-0,11	-0,02	-0,10	0,03	0,01	-0,02		-0,10	-0,13	-0,04	-0,08	-0,11	0,03	0,08	0,09		
4		-0,13	-0,15	-0,16	-0,20	-0,11	-0,08	-0,06	-0,13		0,21	0,09	0,09	0,23	0,16	0,23	0,23	0,21		
5		-0,06	-0,03	-0,08	0,01	0,01	-0,03	0,11	0,08		-0,04	0,03	0,05	0,08	0,02	0,09	0,13	0,07		
6		0,11	0,02	0,03	0,08	-0,04	0,13	0,04	0,08		-0,01	0,00	0,01	-0,01	0,01	-0,03	0,00	0,01		
7		-0,02	0,05	-0,03	0,04	-0,07	0,06	-0,02	-0,04		0,01	-0,01	0,08	0,01	0,05	0,01	-0,04	0,08		
8		-0,01	-0,10	-0,09	-0,11	-0,05	-0,04	-0,07	0,03		0,06	0,03	0,05	-0,02	0,06	-0,06	0,04	0,02		
9		0,08	0,12	0,11	0,17	0,03	0,30	0,10	0,12		-0,01	-0,02	0,12	0,10	0,05	0,04	0,02	0,11		
10		-0,04	0,05	-0,03	0,13	0,08	0,04	0,03	0,04		0,20	0,08	0,19	0,13	0,10	0,28	0,22	0,32		
11		0,08	0,07	0,02	0,14	0,06	0,04	0,02	0,06		0,02	0,11	0,08	0,08	0,20	0,12	0,07	0,21		
12		0,05	0,11	0,05	0,08	0,02	-0,02	0,25	0,14		0,00	0,02	0,10	0,10	0,08	0,07	0,05	0,17		
wilgotność - zmiana																				
rok	0,00	0,06	-0,05	0,03	0,23	-0,32	0,09	0,05	0,01	0,00	0,06	-0,22	0,28	-0,34	0,07	-0,34	-0,40	-0,22		
1		0,17	0,67	0,39	0,53	0,20	0,11	0,87	0,57		-0,25	-0,11	0,48	0,22	0,68	0,17	1,06	1,15		
2		-0,27	-0,16	-0,78	0,34	-0,46	0,37	-0,32	-0,13		-0,97	-0,10	-0,43	-0,22	-0,45	-1,40	-0,82	-0,68		
3		-0,83	-0,60	-1,50	-0,46	-1,88	0,00	-0,95	-1,94		-0,35	-1,17	-1,09	-1,47	-2,23	-2,36	-2,95	-3,10		
4		-0,83	-1,31	-0,66	-1,43	-0,95	-0,94	-1,36	-1,32		1,55	0,22	0,24	-0,29	-0,02	-0,02	-0,83	-0,78		
5		0,14	-0,57	0,76	0,03	0,70	-0,38	-0,16	0,26		0,45	0,44	1,12	0,74	0,58	0,67	0,36	0,74		
6		0,28	-0,36	-0,28	-0,07	-0,65	-0,37	-0,07	-0,39		0,61	0,55	0,14	-0,13	0,91	-0,20	0,75	0,75		
7		0,28	0,71	0,42	0,60	-0,41	0,47	-0,08	-0,71		0,56	-0,47	0,47	-0,30	-0,16	-1,63	-1,54	-0,09		
8		-0,24	-0,73	-1,31	-0,70	-1,13	-1,14	-0,94	-0,26		-0,37	-0,62	0,70	-1,62	0,03	-1,19	-1,58	-0,83		
9		0,47	0,71	1,21	1,29	0,61	1,39	1,18	1,56		0,67	-1,04	0,70	-0,69	0,36	0,36	-0,84	-1,49		
10		0,06	0,07	0,21	1,41	0,13	0,45	0,55	1,05		0,28	-0,33	0,50	0,41	0,94	0,67	0,55	0,66		
11		1,37	0,80	1,44	0,85	0,29	1,05	0,73	1,03		-0,75	0,09	0,04	-0,43	-0,11	0,47	0,10	0,61		
12		0,05	0,09	0,46	0,30	-0,36	-0,01	1,18	0,34		-0,72	-0,15	0,52	-0,29	0,31	0,38	0,95	0,36		

Miesiąc	rcp45									rcp85								
	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091
temperatura - zmiana [C]																		
rok	0,00	0,06	0,63	0,60	0,93	1,14	1,21	1,35	1,50	0,00	-0,14	0,39	0,61	1,25	1,67	2,21	2,75	3,29
1		-0,47	1,08	0,88	0,91	1,27	1,62	1,90	1,80		-0,41	0,01	0,23	1,27	1,99	3,18	3,23	4,07
2		-0,10	0,73	0,63	1,00	0,92	1,74	1,71	1,85		-0,50	0,06	0,63	1,68	1,77	2,19	3,85	4,08
3		0,28	0,63	0,23	1,21	1,32	1,48	1,60	2,16		0,00	0,56	0,97	2,24	2,00	2,90	3,50	4,24
4		-0,23	0,72	0,42	1,19	0,79	1,02	1,59	1,52		-0,36	0,61	0,56	1,21	1,69	1,77	2,31	2,91
5		0,05	0,42	0,58	0,57	0,53	1,27	1,03	1,08		0,17	0,31	0,48	0,60	1,14	1,45	1,55	2,48
6		0,21	0,67	1,02	0,73	1,29	0,89	1,21	1,11		-0,16	0,16	0,47	0,86	0,95	1,54	1,81	2,19
7		0,07	0,60	0,74	0,73	1,32	0,95	1,01	1,40		-0,02	0,52	0,58	0,91	1,45	2,08	2,86	3,06
8		0,15	0,55	0,95	1,13	1,33	1,27	1,35	1,35		0,11	0,66	0,87	1,28	1,78	2,70	3,11	3,49
9		-0,29	0,26	0,13	0,33	0,67	0,42	0,94	1,06		-0,12	0,49	0,57	0,98	1,85	2,08	2,74	3,25
10		0,01	0,23	0,32	0,57	0,93	1,03	0,81	1,08		-0,51	0,29	0,78	0,86	1,49	1,67	1,68	2,33
11		0,41	0,53	0,59	1,22	1,56	1,37	1,24	2,01		0,37	0,50	0,88	1,70	2,02	2,10	3,04	3,50
12		0,63	1,20	0,70	1,67	1,83	1,46	1,89	1,58		-0,30	0,51	0,27	1,48	1,92	2,92	3,30	3,88
Zmiana natężenia promieniowania [kWh/m²]																		
rok	0,0	1,1	-1,7	-0,5	-12,4	-2,1	-20,3	-8,2	-15,7	0,0	-2,3	1,8	-12,6	-10,3	-23,8	-17,8	-20,2	-31,0
1		0,2	-1,0	0,1	-1,0	-0,3	-0,4	-0,4	0,2		0,7	0,3	-0,3	0,7	-0,1	-0,2	-0,6	-1,0
2		-0,5	-0,7	-0,2	-0,4	0,1	0,1	1,1	-0,1		-0,1	0,4	-0,6	-1,1	-1,2	-0,5	-1,1	-2,5
3		2,3	-0,4	-0,4	-1,6	0,3	-2,7	-0,4	0,8		1,5	3,0	0,3	0,5	0,2	-1,1	-1,8	-2,7
4		4,1	2,8	3,4	4,4	2,1	1,4	3,1	0,8		-1,9	-1,1	-1,5	-1,8	-2,8	-4,3	-3,1	-3,8
5		2,4	3,5	0,8	0,3	-0,9	1,4	1,7	-1,3		1,3	-0,2	-1,7	-1,5	-1,5	-1,1	-3,4	-1,1
6		-3,4	0,9	1,5	-2,8	2,0	-4,0	-1,2	-2,0		-1,3	-0,8	1,3	-0,5	-4,0	0,2	-2,2	-2,9
7		0,4	-2,2	1,1	-1,7	0,8	-4,4	-1,9	0,4		0,5	2,2	-1,8	-0,6	-2,6	-0,6	3,0	-2,3
8		-0,2	2,5	2,0	2,2	0,6	2,0	0,2	-1,9		-0,7	-0,4	-1,3	-0,7	-2,6	-0,6	-1,4	-1,9
9		-2,8	-3,2	-4,8	-5,3	-1,8	-8,4	-4,8	-5,8		-1,2	1,4	-2,6	-0,9	-2,5	-1,7	-1,5	-1,1
10		-0,1	-2,3	-2,0	-3,7	-2,7	-2,8	-3,0	-3,6		-1,7	-1,7	-2,5	-2,9	-3,8	-4,7	-4,7	-6,0
11		-1,4	-1,1	-1,7	-2,2	-1,6	-2,1	-1,7	-2,2		0,3	-1,0	-1,5	-0,9	-2,0	-2,3	-2,0	-4,0
12		-0,1	-0,6	-0,3	-0,6	-0,8	-0,3	-1,1	-1,0		0,4	-0,2	-0,3	-0,4	-1,0	-0,9	-1,4	-1,7

6. Kalibracja modelu

W ramach pracy pozyskano i przetworzono dane o natężeniu przepływu z punktów pomiarowych PSHM w obszarze analizowanej zlewni. Dane użyte zostały do kalibracji modelu w zakresie obliczeń natężenia przepływu.

Analiza objęła dane wodowskazowe z okresu 2016–2021 obejmujące wartości przepływów dobowych dla przedstawionych poniżej posterunków pomiarowych (Tabela 10, Rysunek 11).

Kalibrację modelu wykonano również z uwzględnieniem danych monitoringu powierzchniowego rzeki Soły i Koszarawy zleconych przez Żywiec Zdrój S.A. i Grupę Żywiec S.A.

Rysunek 11. Mapa wodowskazów PSHM, których dane zostały użyte na potrzeby kalibracji modelu



Tabela 10. Lista wodowskazów PSHM, których dane zostały użyte na potrzeby kalibracji modelu

Nazwa wodowskazu	Rzeka	Nr wodowskazu	Numer zlewni modelu SWAT (out = lokalizacja bliżej odpływu ze zlewni; in = lokalizacja bliżej dopływu do zlewni)	Uwagi dotyczące dostępności danych dla lat 2016–2021
Żywiec	Soła	149190100	231 out	Dane kompletne
Rajcza	Soła	149190050	68 in	Dane kompletne
Cięcina	Soła	149190080	158 in	Dane kompletne
Ujsoty	Woda Ujsolska	149190040	54 out	Dane kompletne
Kamesznica	Bystra	149190020	111 in	Brak 17 pomiarów dobowych w roku 2019
Żabnica	Żabniczanka	149190090	127 in	Dane kompletne
Pewel Mała	Koszarawa	149191150	219 out	Dane kompletne

i wykonanych przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich (SHP) (Więzik, Madzia, 2022). Monitoring ten prowadzony był od roku 2021 i obejmował jedenaście punktów, które przedstawiono w tabeli 11 i na rysunku 12.

Spośród jedenastu punktów monitoringu SHP dwa pokrywają się z wodowskazami PSHM (punkty na rzekach Bystra i Woda Ujsolska). Dane SHP tych dwóch punktów nie były brane pod uwagę w procesie kalibracji modelu. Decyzję tę podjęto w celu uniknięcia błędów wynikających z kalibracji opartej o serie danych cechujących się odmiennymi właściwościami (inne metody pomiarowe). Dla wspomnianych dwóch punktów kalibracja oparta była o dane PSHM opisane na początku tego rozdziału.

Rysunek 12. Mapa punktów monitoringu przepływu SHP (na podstawie: Więzik, Madzia (2022)) użyte na potrzeby kalibracji modelu

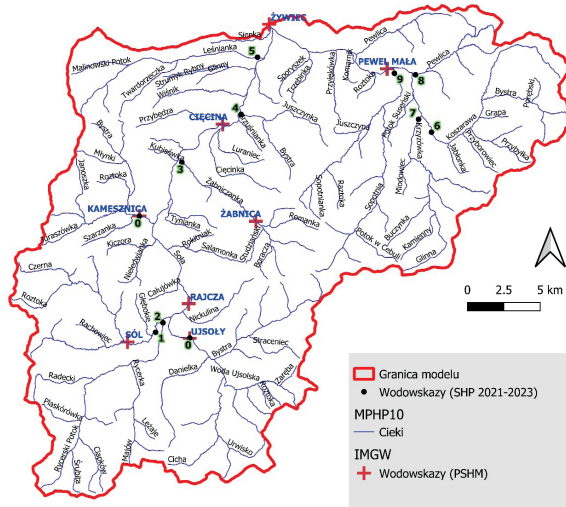


Tabela 11. Lista punktów monitoringu przepływu SHP (na podstawie: Więzik, Madzia (2022))

id	Nazwa wodowskazu	Nazwa ciek / Uwagi	Numer zlewni modelu SWAT (out = lokalizacja bliżej odpływu ze zlewni; in = lokalizacja bliżej dopływu do zlewni)
0	Ujsoty	Woda Ujsolska / Wodowskaz pokrywający się z wodowskazem PSHM	54 out
0	Kamesznica	Bystra / Wodowskaz pokrywający się z wodowskazem PSHM	111 in
1	Rajcza	Potok Czerna	58 in
2	Rajcza	Potok Rycerka	52 out
3	Węgierska Górka	Żabniczanka	137 out
4	Juszczyna	Juszczynka	173 out
5	Żywiec-kolej	Leśnianka	216 out
6	Przyborów (Jeleśnia)	Koszarawa	171 out
7	Jeleśnia	Krzyżówka	168 out
8	Jeleśnia	Pewel	210 out
9	Jelenia	Sopotnianka	196 out

łącznie na potrzeby kalibracji modelu użyto danych siedmiu punktów monitoringu PSHM (dane dla okresu 2016–2021) oraz dziewięciu punktów monitoringu SHP (dane dla okresu 2021–2022). Dane SHP użyte na potrzeby kalibracji modelu cechowały się niewielkim brakiem danych w ciągach pomiarowych. Braki dotyczyły jedynie:

- Punktu 4 (Juszczynka) – brak danych dla 5 dni spośród 610 w ciągu pomiarowym uruchomionym 1 maja 2021 r.;
- Punktu 5 (Leśnianka) – brak danych dla 58 dni spośród 610 w ciągu pomiarowym ze względu na późniejsze uruchomienie monitoringu w tym punkcie (monitoring od 28 czerwca 2021 r.

Biorąc pod uwagę relatywnie niewielką liczbę danych obserwacyjnych dla poszczególnych wodowskazów (szczególnie wodowskazów SHP) zdecydowano się na brak podziału dostępnych danych na osobne zbiory służące kalibracji i walidacji modelu. Zwyczajowo dokonuje się takiego podziału w celu poprawy skuteczności modelu przy użyciu jednego zbioru i sprawdzenia tej skuteczności przy użyciu drugiego, niezależnego zbioru. W przypadku niniejszej pracy zastosowanie takiego podziału skutkowałoby użyciem na potrzeby kalibracji danych z niepełnych lat (co nie jest korzystne dla zapewnienia reprezentatywności modelu) lub (co bardziej uzasadnione) użyciem tylko części wodowskazów na potrzeby kalibracji i pozostałej części na potrzeby walidacji. W konsekwencji kalibracja nie wykorzystywałaby danych pomiarowych dostarczonych przez Zamawiającego i nie spełniałaby warunków Umowy. Zalecane jest wykonanie walidacji modelu na niezależnym zbiorze danych pomiarowych w pracach stanowiących kontynuację niniejszej, w przypadku pozyskania dłuższych serii danych obserwacyjnych dotyczących natężenia przepływu oraz danych obserwacyjnych dotyczących warunków meteorologicznych, które niezbędne są do uruchomienia modelu dla dłuższych okresów.

Kalibrację modeli prowadzono w trzech etapach:

1. Kalibracja modelu w celu dopasowania wyników obliczeń do obserwacji na wodowskazach zlokalizowanych w górnych częściach zlewni, czyli wodowskazach powyżej

których nie znajdowały się inne wodowskazy. Takich niezależnych wodowskazów było 11.

2. Kalibracja modelu w oparciu o dane trzech pośrednich wodowskazów:

- a. Rajcza na Sole (PSHM, zlewnia modelu 68);
- b. Węgierska Górka na Żabniczance (SHP, zlewnia modelu 137);
- c. Pewel Mała na Koszarawie (PSHM, zlewnia modelu 219).

Były to wodowskazy zależne, położone poniżej ośmiu z jedenastu wodowskazów, których dane użyte były w pierwszym etapie kalibracji.

3. Kalibracja w oparciu o dane dwóch wodowskazów PSHM zlokalizowanych na Sole – Cięcina i Żywiec. Są to najniższe położone wodowskazy, w których przepływ zależny jest od przepływu we wszystkich pozostałych wodowskazach.

Kalibracja wykonana została przy użyciu programu SWAT-CUP pozwalającego na automatyczne uruchomienie modelu z wieloma zestawami parametrów wejściowych oraz na ocenę wyników kalibracji. łącznie w procesie kalibracji uruchomiono około tysiąca wersji modelu modyfikując parametry charakteryzujące zlewnie poszczególnych wodowskazów lub ich grup.

W procesie kalibracji uwzględniono zmiany parametrów modelu, które zgodnie wcześniejszymi doświadczeniami (Sitek i in., 2015; Ulańczyk i in., 2015; Ulańczyk i in., 2017; Łozowski, Ulańczyk, 2018; Kożuch, Ulańczyk, 2020) oraz założeniami teoretycznymi modelu (Neitsch i in. 2011) powinny wpływać istotnie na wyniki obliczeń natężenia przepływu. Wybór parametrów ograniczał się do tych, które ze względu na rozdzielczość i dokładność użytych danych wejściowych mogły być traktowane jako obarczone niepewnościami. Parametry poddane kalibracji, ich opis oraz początkowe i docelowe wartości przedstawiono w tabeli 12. Początkowo proces kalibracji obejmował dziewięć parametrów modelu, ale analiza czułości wykazała, że zmiana wartości dwóch z nich nie daje istotnej statystycznie zmiany natężenia przepływu w zlewniach obejmujących wybrane wodowskazy (szczegóły w tabeli 12).

Tabela 12. Parametry uwzględnione w ocenie czułości modelu i wartości przyjęte w procesie kalibracji

* „+” oznacza parametry zidentyfikowane jako istotne statystycznie w analizie czułości modelu ($p\text{-value} \leq 0,1$); „-” oznacza parametry zidentyfikowane jako nieistotne.

** Jeżeli podano zakres wartości, to oznacza, że w początkowej wersji modelu różne wartości reprezentowały poszczególne zlewnie cząstkowe.

*** Zakres „od-do” był przyjmowany różny w procesie kalibracji różnych zlewni modelu, w zależności od charakteru tych zlewni.

Parametr	Opis parametru i uwagi dotyczące wartości przyjętych w modelu	Wynik ana- lizy czuło- ści*	Wartości parametrów					
			Wartość początkowa **	Zakres zmiany ***		Wartość docelowa ***		
				Od	Do	Od	Do	
ALPHA_BF .gw	Parametr alfa stałej recesji zasilania koryta rzecznej wodami podziemnymi [1/d]. Niskie wartości parametru (bliskie zera) oznaczają obszary o powolnej odpowiedzi przepływu na zasilanie wód podziemnych. Przy takich wartościach w pierwszych dniach po wystąpieniu opadu odpływ znacznie maleje i przez długi czas utrzymuje się na stałym poziomie wynikającym z ciągłego zasilania wodami podziemnymi. Wartości bliskie 1 oznaczają odpowiedź szybką i w konsekwencji, w pierwszych dniach po wystąpieniu opadu przepływ utrzymuje się na wysokim poziomie, a następnie znacznie maleje. W analizowanej zlewni ta pierwsza charakterystyka jest bardziej odpowiednia. Pozwala ona zbliżyć kształt hydrogramów z modelu do obserwowanych. Preferowane są zatem niższe wartości tego parametru, pomimo że ich konsekwencją jest przeszacowanie przepływu względem obserwowanego. To przeszacowanie jest jednak wynikiem nieodpowiedniej, domyślnej wartości innych parametrów, opisanych w dalszej części tabeli.	+	0,048	0,01	0,3	0,02	0,18	
GW_ DELAY .gw	Współczynnik opóźnienia infiltracji wód od spągu gleby do zwierciadła pierwszej warstwy wodonośnej [d]. Efekt modyfikacji parametru jest podobny do modyfikacji „ALPHA_BF”. Im wyższa wartość parametru, tym przepływ bardziej maleje po okresie opadowym i utrzymuje się na równym poziomie do kolejnych opadów (sytuacja bardziej odpowiadająca analizowanej zlewni). Im wartość niższa, tym dłużej utrzymuje się wpływ opadu na natężenie przepływu w rzece i tym bardziej spada to natężenie w okresie odległym od opadów.	+	31	15	50	21,25	49,25	
GWQMN .gw	Wartość poziomu wód podziemnych, przy której może nastąpić zasilanie wód powierzchniowych [mm]. Obniżenie wartości powoduje zwiększenie przepływu w okresach odległych od dni opadowych.	-	Brak uwzględnienia w kalibracji ze względu na wynik analizy czułości modelu					
GW_ REVAP .gw	Parametr określający możliwość użycia wód pierwszej warstwy wodonośnej na potrzeby uzupełnienia strat parowania w profilu glebowym. Przy wartościach bliskich 0 brak jest podsiąkania wód do profilu glebowego. Odpływ wód powierzchniowych ze zlewni ulega powolnemu, systematycznemu spadkowi po okresach opadowych. Przy wartościach bliskich 1 występuje podsiąkanie, którego wartość zbliża się do wartości potencjalnej ewapotranspiracji. Przy wyższych wartościach odpływ wód znacznie maleje i wyrównuje się, ale nie od razu po opadzie, tylko po okresie, w którym potrzeby parowania mogą być zaspokojone z profilu glebowego i po okresie, w którym po opadzie wody podziemne są zasilane, zależnym od „GW_DELAY”.	+	0,02	0,01	0,5	0,06	0,49	
RCHRG_ DP .gw	Parametr określający część infiltrujących wód, która nie pozostaje w pierwszej warstwie wodonośnej, ale filtruje dalej zasilając głębsze warstwy [ułamek]. Parametr ma głównie wpływ na natężenie odpływu w okresach bezopadowych. Przy niskich wartościach parametru odpływ wód powierzchniowych jest wyższy po opadzie i maleje z czasem. Wartości wyższe powodują większy spadek odpływu w początkowej fazie okresu bezopadowego, ale odpływ ten w okresie bezopadowym jest bardziej wyrównany.	+	0,05	0,01	0,5	0,05	0,41	
ESCO.hru	Parametr określający potencjał parowania wody z różnych głębokości profilu glebowego. Przy wartościach bliskich 0 zapotrzebowanie związane z parowaniem może być zaspokojone przy użyciu wody znajdującej się na większej głębokości. Przy wartościach zbliżonych do 1 parowanie z większych głębokości maleje do zera.	-	Brak uwzględnienia w kalibracji ze względu na wynik analizy czułości modelu					
SURLAG. hru	Jest to parametr krzywej opóźnienia spływu powierzchniowego. Im niższa wartość (bliska 1), tym mniejsza część spływu dociera w określonym czasie do koryta rzecznej.	+	2	1	30	1,87	28,55	
CN2.mgt	Krzywa spływu powierzchniowego. Przyjmuje wartości od 0 do 100. Im wartości są bliższe górnej granicy, tym większa część opadu stanowić będzie spływ powierzchniowy. W modelu kalibracja objęła modyfikację tego parametru dla czterech klas pokrycia terenu (Lasy i pastwiska / łąki: FRST, FRSD, FRSE, PAST), które łącznie pokrywają 88% zlewni. Podniesienie wartości powoduje zwieszenie odpływu w okresach opadowych oraz zmniejszenie i wyrównanie w okresach bezopadowych.	+	70–84	-20%	+30%	-9%	+23%	
SOL_ AWC(). sol	Zawartość wody dostępnej dla roślin w profilu glebowym wyrażona ułamkiem. Jest to różnica pomiędzy pojemnością polową gleby, a objętością odpowiadającą punktowi wędnięcia. Zwiększenie wartości powoduje ciągłe obniżenie natężenia przepływu w okresach bezopadowych.	+	0,09–0,18	-20%	+40%	-3%	+39%	

**** Zakres od do oznacza docelowe wartości przypisane różnym zlewniom cząstkowym modelu.

Pomimo, że kalibracja modelu była oparta o dobowe wartości natężenia przepływu, to ocena efektów kalibracji wykonana została dla wartości miesięcznych. Powodem takiego podejścia był cel użycia modelu. Celem było określenie wartości bilansu wodnego zlewni cząstkowych i oszacowanie potencjału retencyjnego. Dla osiągnięcia tego celu wystarczającym jest użycie danych charakteryzujących ciągi danych o miesięcznej rozdzielczości czasowej.

Wyniki kalibracji oceniono przy użyciu następujących parametrów statystycznych:

- R^2 – Współczynnik determinacji. Przyjmuje wartości od 0 do 1. Im wyższa wartość tym lepsze dopasowanie obserwowanych i symulowanych wartości.
- NS – Współczynnik Nasha-Sutcliffe'a może przyjmować wartości z przedziału $(-\infty; 1]$. Gdy NS=1, wówczas

wyniki modelowania są dokładnie dopasowane do wartości zaobserwowanych (rzeczywistych). Gdy NS=0, wyniki modelowania w takim samym stopniu przybliżają poszczególne wartości rzeczywiste jak średnia wartość rzeczywista. Gdy współczynnik przyjmuje wartości ujemne, oznacza to, że średnia wartość rzeczywista w większym stopniu przybliża poszczególne wartości rzeczywiste niż robią to wartości obliczane przez model.

- PBIAS – „Percent Bias” – stosunek różnicy pomiędzy błędem obliczeń (obserwacja minus wynik obliczeń) do wartości obserwowanej. Wartość równa 0 oznacza dokładne dopasowanie. Wartości ujemne oznaczają przeszacowanie, a dodatnie niedoszacowanie modelu.

Wyniki kalibracji przedstawiono w tabeli 13.

Tabela 13. Ocena efektu kalibracji modelu

Wodowskaz, dla którego wykonano ocenę efektu kalibracji	Rzeka	Zlewnia modelu	Źródło danych	Parametry oceny *		
				R^2	NS	PBIAS
Rajcza	Potok Czerna	58	SHP	0,61	0,55	4,7
Rajcza	Soła	68	PSHM	0,32	0,25	-8,7
Kamesznica	Bystra	111	PSHM	0,25	0,25	1,4
Żabnica	Żabniczanka	127	PSHM	0,37	0,34	-3,7
Cięcina	Soła	158	PSHM	0,41	0,40	5,8
Rajcza	Potok Rycerka	52	SHP	0,47	0,44	3,5
Ujsoly	Woda Ujsolska	54	PSHM	0,22	0,15	10,0
Węgierska Górka	Żabniczanka	137	SHP	0,13	-0,18	-12,4
Jeleśnia	Krzyżówka	168	SHP	0,33	0,28	0,2
Przyborów (Jeleśnia)	Koszarawa	171	SHP	0,08	-0,72	-30,7
Juszczyna	Juszczynka	173	SHP	0,34	0,33	-5,9
Jelenia	Sopotnianka	196	SHP	0,48	0,32	10,9
Jeleśnia	Pewel	210	SHP	0,20	-1,30	-36,3
Żywiec-kolej	Leśnianka	216	SHP	0,39	0,35	1,8
Pewel Mała	Koszarawa	219	PSHM	0,47	0,31	24,7
Żywiec	Soła	231	PSHM	0,49	0,48	5,7
średnia				0,35	0,14	-1,81 (Średnia z wartości bezwzględnych to 10,39%)

* kolor zielony oznacza wynik oceny uznany za satysfakcjonujący.

Ogólny wynik kalibracji, traktowany jako średnia z wartości uzyskanych dla poszczególnych wodowskazów uznać można za satysfakcjonujący. Jest to ocena subiektywna autorów opracowania, ponieważ nie istnieją sztywne kryteria klasyfikacji modelu jako „akceptowalny” i „nieakceptowalny”. Ocena dostosowana powinna być adekwatna do celu zastosowania modelu, jakości dostępnych da-

nych służących parametryzacji modelu, jakości danych służących do kalibracji modelu oraz niepewności wyników obliczeń wynikających ze zjawisk, których nie można odzwierciedlić w modelu. W przypadku niniejszej pracy, na niskie oceny efektu kalibracji w przypadku niektórych wodowskazów wpływ mogą mieć następujące czynniki: 1) brak szczegółowej informacji odnośnie poboru i zrzutu

wód i ścieków, 2) brak szczegółowej informacji na temat powiązań pomiędzy wodami powierzchniowymi i podziemnymi, co utrudnia przyjęcie odpowiednich wartości parametrów wpływających na symulację zasilania wód podziemnych i podziemnego zasilania cieków, a także i przede wszystkim 3) brak reprezentatywności stacji opadowych, na co wskazuje wykonana analiza korelacji pomiędzy dobowymi wartościami opadów i przepływu w rzekach. Ten ostatni czynnik może istotnie wpływać na dopasowanie wyników obliczeń do obserwacji, ponieważ w analizowanym okresie występują liczne przypadki, gdzie wodowskaz pokazuje podwyższony przepływ bez zaobserwowanego opadu w danym dniu i w dniach poprzedzających w stacjach opadowych zlokalizowanych w zlewni

danego wodowskazu lub w pobliżu tej zlewni. Tak samo występują liczne przypadki sytuacji odwrotnej. W analizie korelacji porównywano przepływ obserwowany w siedmiu stacjach wodowskazowych PSHM z opadem obserwowanym w ośmiu stacjach opadowych. Przepływ porównywano z opadem z danego dnia, z dnia poprzedniego oraz dnia wcześniejszego, a także z opadem skumulowanym z kilku dni. Najwyższe współczynniki korelacji uzyskano dla analizowanego obszaru przy porównaniu przepływu z opadem dnia poprzedniego. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 14. Warty zauważenia jest to, że w większości przypadków, przepływ skorelowany jest w większym stopniu z opadem obserwowanym na innej stacji opadowej niż stacja w zlewni lub najbliższej niej.

Tabela 14. Wynik analizy korelacji przepływu (Q) i opadu (P) obserwowanego w stacjach PSHM

Wsp. korelacji	Lipowa (P)	Pewel Mała (P)	Kamesznica (P)	Żabnica (P)	Korbielów (P)	Rajcza (P)	Rycerka Górna (P)	Radziechowy (P)
Kamesznica (Q)	0,48	0,40	0,43	0,43	0,38	0,43	0,46	0,41
Ujsoły (Q)	0,52	0,51	0,49	0,59	0,55	0,55	0,55	0,50
Rajcza (Q)	0,52	0,48	0,49	0,55	0,50	0,53	0,54	0,49
Cięcina	0,54	0,52	0,52	0,59	0,53	0,56	0,56	0,52
Żabnica (Q)	0,49	0,51	0,45	0,63	0,55	0,53	0,50	0,49
Żywiec (Q)	0,55	0,55	0,52	0,62	0,57	0,57	0,56	0,53
Pewel Mała (Q)	0,51	0,56	0,48	0,63	0,59	0,56	0,53	0,51

Skala koloru oznacza najmniejsze (jasny zielony) i największe (ciemny zielony) wartości współczynnika korelacji.

Fioletowa czcionka oznacza opad zaobserwowany w stacjach opadowych zlokalizowanych najbliższej zlewni danego wodowskazu.

Pogrubiona czcionka oznacza najwyższą wartość współczynnika korelacji dla danego wodowskazu.

7. Wyniki obliczeń

7.1 Ogólne wyniki dotyczące bilansu wodnego

Średnia, roczna suma opadu atmosferycznego w analizowanym okresie (2016–2021) i obszarze wyniosła 1123,8 mm. Opady są zróżnicowane sezonowo, z największymi wartościami występującymi w okresie letnim i jesienno-zimowym (Tabela 15). To zróżnicowanie sezonowe ma znaczenie dla dostępności wody, szczególnie w kontekście potrzeb rolnictwa i gospodarki wodnej. Opady i topnienie śniegu odpowiadają za przychód wody w bilansie wodnym w okresie zimowym i wczesnowiosennym stanowiąc zimą ponad 30% sumy opadów. Średnie roczne wartości opadów śniegu (85 mm/r) podkreślają znaczenie tego procesu dla zasilania zlewni w wodę w okresach niższych temperatur. Średni roczny spływ powierzchniowy (272,8 mm) jest głównym źródłem zasilania cieków (44,6% całkowitego rocznego odpływu ze zlewni). Jest to jednak źródło bardzo zbliżone do zasilania wodami podziemnymi, które stanowiło w analizowanym okresie 43,6% całkowitego zasilania cieków (266,6 mm/r). Udział tych źródeł zasilania zmienia się sezonowo. W sezonie ciepłym dominuje zasi-

lanie powierzchniowe osiągając w miesiącach letnich ponad 60% całkowitego przepływu. W sezonie zimnym dominuje natomiast zasilanie wodami podziemnymi, które osiąga niemal 70% w miesiącach zimowych. Najmniejszy udział w zasilaniu cieków ma zasilanie z profilu glebowego, które oszacowano na 11,7% (71,5 mm/r).

Ewapotranspiracja stanowi istotny mechanizm utraty wody ze zlewni. Jej wartość oszacowano na 428 mm rocznie, co stanowi 38,1% sumy opadów atmosferycznych. Jest to ilość wody, która odparowuje z powierzchni gleby i roślinności oraz jest absorbowana przez rośliny i następnie uwolniona do atmosfery. W półroczu letnim notujemy 76,5% rocznej ewapotranspiracji, a wartości średnie miesięczne zbliżają się latem do 70% miesięcznej sumy opadów. Potencjalna roczna ewapotranspiracja oszacowana została natomiast na 661 mm. Jest to maksymalna wartość ewapotranspiracji, która mogłaby wystąpić przy założeniu ciągłego dostępu zasobów wodnych.

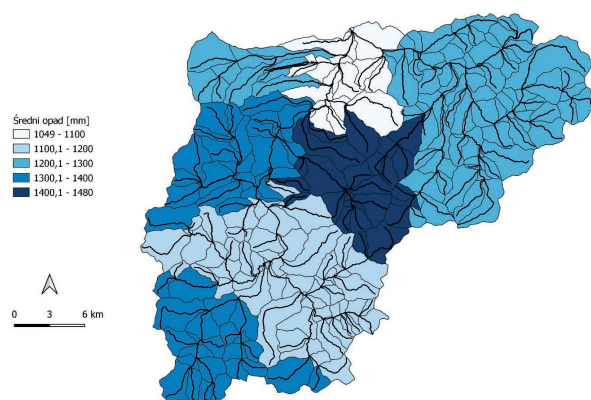
Tabela 15. Średnie miesięczne wartości wybranych parametrów meteorologicznych i hydrologicznych w zlewni Soły w latach 2016–2021, na podstawie danych z modelu SWAT

Miesiąc	Opad atmosferyczny [mm]	Opad śniegu [mm]	Źródła zasilania cieków [mm]			Całkowite zasilanie cieków / Odpływ ze zlewni [mm]	Ewapotranspiracja [mm]	
			Spływ powierzchniowy	Profil glebowy	Wody podziemne		Rzeczywista	Potencjalna
1	60,1	34,1	24,6	3,2	26,6	54,3	8,8	11,3
2	78,6	15,1	22,5	4,7	23,8	51,0	15,5	19,8
3	51,2	6,3	9,6	4,4	25,2	39,2	28,6	41,4
4	73,9	2,1	14,0	4,1	17,2	35,3	36,7	73,8
5	135,4	0,0	30,4	7,6	19,4	57,4	57,2	87,0
6	93,1	0,0	17,7	6,0	15,3	39,0	66,5	112,1
7	128,6	0,0	26,1	7,1	14,3	47,5	70,8	107,1
8	137,3	0,0	35,2	7,4	14,7	57,3	60,0	92,1
9	116,7	0,0	30,4	8,6	21,7	60,7	36,0	52,9
10	112,0	0,0	30,3	8,3	30,0	68,6	24,1	33,7
11	56,8	6,9	7,9	5,2	30,4	43,5	13,1	16,7
12	79,4	20,4	23,9	4,9	28,0	56,9	10,7	13,0

Wartości składowych bilansu wodnego są zróżnicowane nie tylko sezonowo, ale też przestrzennie, głównie ze względu na zróżnicowanie nachylenia terenu, wysokości nad poziomem morza i pokrycia terenu (CPKŚ, 2009). Zróżnicowanie przestrzenne średnich rocznych wartości opadu (Rysunek 13) wskazuje na zależność pomiędzy opadem, a wysokością nad poziomem morza. Najwyższe sumy opadów wystę-

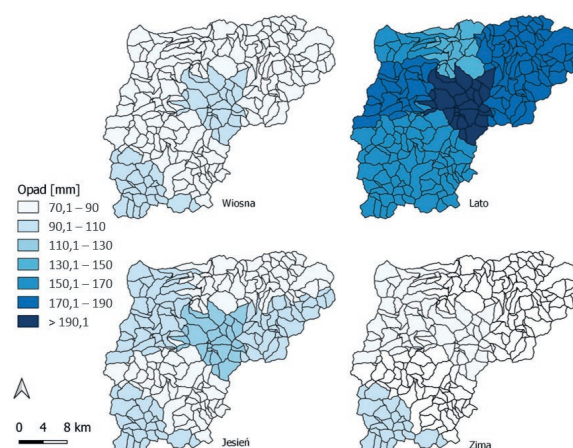
powały w zlewni Żabniczanki oraz w górnym biegu Bystrej (d. Wody Ujsolskiej) i Sopotni. Są to obszary położone najwyżej – najwyższy szczyt Lipowski Wierch – 1326 m n.p.m. W analizowanym okresie występowała duża różnica pomiędzy średnimi opadami w wysokich partiach, a doliną Soły przed ujściem do zbiornika, dochodząca do 440 mm rocznie.

Rysunek 13. Średnia, roczna suma opadu atmosferycznego dla zlewni Soły przyjęta w modelu dla okresu 2016–2021



Podobnie jak w tabeli 15, tak i na rysunku 14 przedstawiono sezonową zmienność opadów atmosferycznych z przewagą opadów w sezonie letnim (od początku czerwca do końca sierpnia). Na terenach górskich, głównie na południu, opady są równomierniej rozłożone na poszczególne pory roku. Wiosną, jesienią i zimą regularnie spada przynajmniej ponad 90,1 mm deszczu na miesiąc (Rysunek 14). Na terenie całej zlewni zimą i wiosną występują mniejsze ilości opadów. W zlewni Koszarawy, Wody Ujsolskiej, Czernej i Soły przy ujściu do zbiornika, gdzie suma roczna opadów jest relatywnie niska, znaczenie

Rysunek 14. Średnia miesięczna suma opadu atmosferycznego w poszczególnych zlewniach i sezonach, na podstawie danych z okresu 2016–2021 (uwzględnione miesiące: wiosna 3–5, lato 6–8, jesień 9–11, zima 12–2)



opadów letnich jest szczególnie ważne. Nieregularność opadów w ciągu roku może mieć różnorodne skutki, zarówno dla środowiska przyrodniczego, jak i dla gospodarki wodnej. Okresy bez opadów mogą prowadzić do susz, które z kolei mają negatywny wpływ na rolnictwo, dostęp do wody przeznaczonej do spożycia oraz ekosystemy wodne i zależne od wody. Prowadzi to również pośrednio do zmniejszenia plonów, wzrostu kosztów produkcji oraz zagrożenia dla bezpieczeństwa żywnościowego.

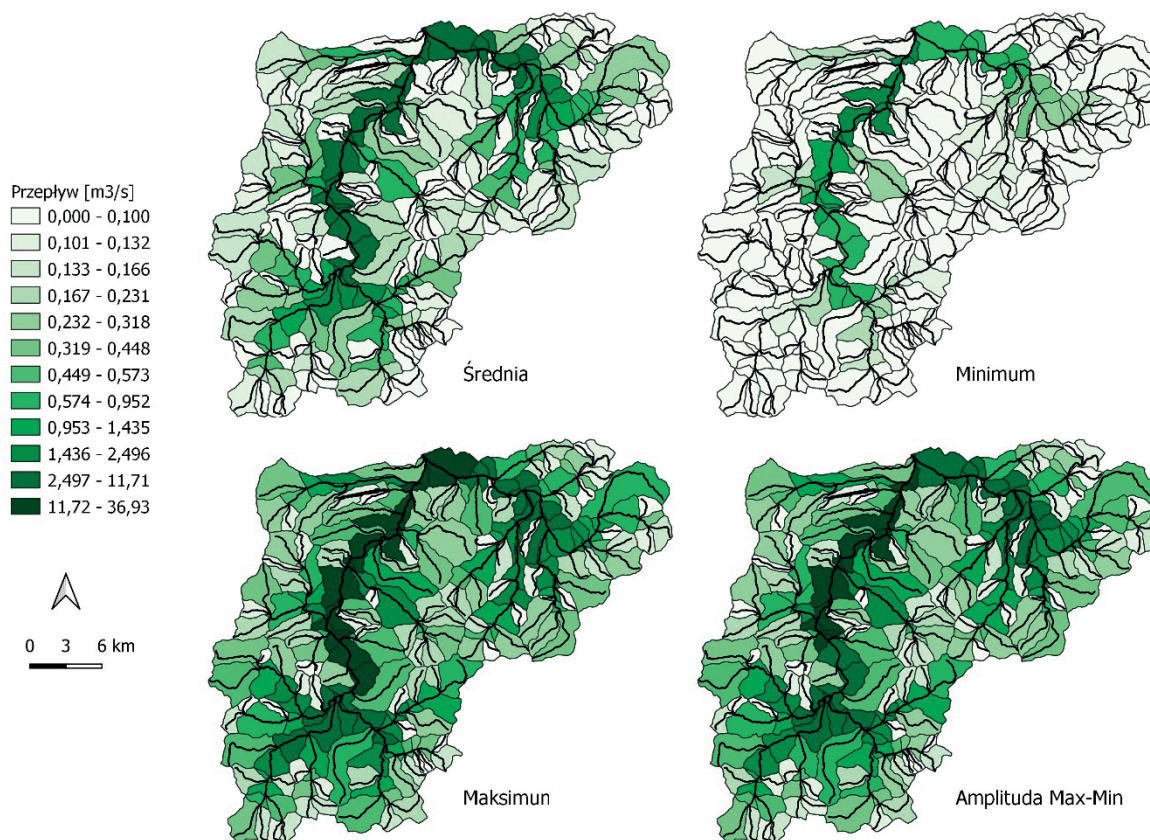
7.2 Wyniki obliczeń wspierające ocenę potencjału retencyjnego i potrzeby retencji

W celu analizy potencjału retencyjnego zlewni zestawiono dane dla miesięcznego natężenia przepływu wody w górnym przekroju koryt rzecznych zlewni cząstkowych, i odpływu jednostkowego poszczególnych zlewni.

Pierwsza ze wspomnianych wartości ma na celu zobrazowanie w sposób bezpośredni wielkości zasobów. Przy dużych wartościach natężenia przepływu można zakładać istnienie potencjału dla retencji wód, natomiast niskie wartości wskazywać będą niski potencjał, ale i duże zapotrzebowanie na retencję. Dodatkowo sezonowe wahania natężenia przepływu mogą ograniczać potencjał retencyjny i zwiększać zapotrzebowanie na retencję wód.

Dla zobrazowania zmienności przestrzennej i czasowej natężenia przepływu wyznaczono miesięczne wartości średnie, minimalne, maksymalne oraz ich wahania (Rysunek 15). Średnie miesięczne wartości natężenia przepływu wykazują duże zróżnicowanie przestrzenne, zależne głównie od wielkości zlewni zamkniętych poszczególnymi przekrojami. Wartości przepływów średnich w analizowanych

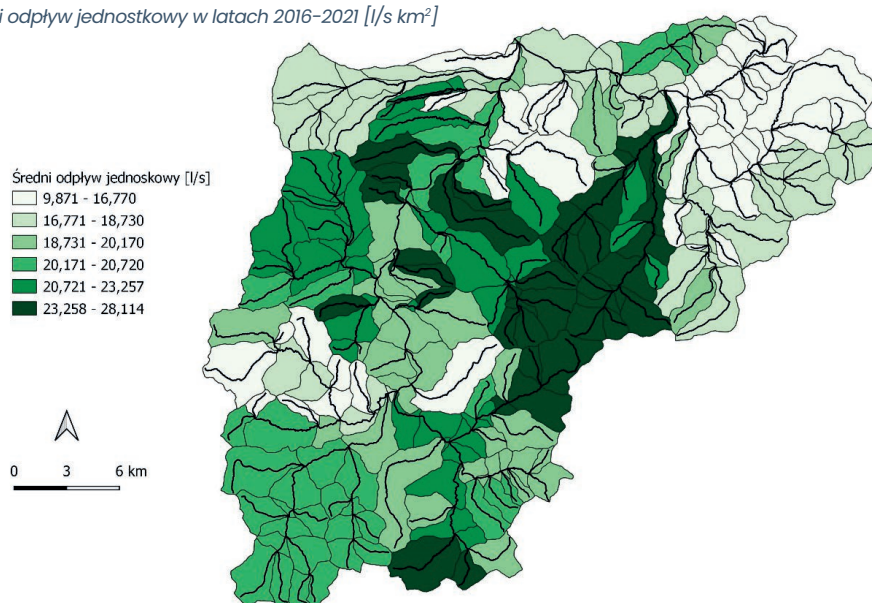
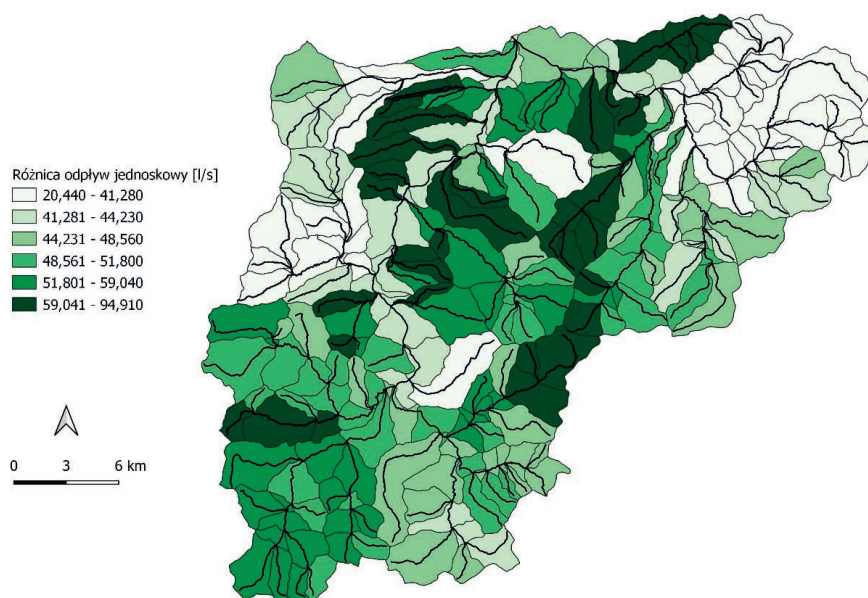
241 zlewniach wahają się od bardzo niskich (około $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$) występujących w źródłowych odcinkach rzek, do ponad $11 \text{ m}^3/\text{s}$ w głównym korycie Soły i Koszarawy. Zestawienie przepływów miesięcznych minimalnych wskazuje, że zdecydowana większość zlewni, prócz głównego koryta Soły i Koszarawy ma swoje minimalne miesięczne przepływy na poziomie nie wyższym niż $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$. Najmniejszy miesięczny przepływ w ujściowej zlewni analizowanego obszaru oszacowano na $2,97 \text{ m}^3/\text{s}$. Wartości maksymalne przepływów miesięcznych w okresie 2016–2021 to na większości obszaru ponad $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$, a w ujściowym przekroju Soły maksymalny przepływ miesięczny oszacowano na $36,93 \text{ m}^3/\text{s}$. Najmniejsze wahania sezonowe natężenia przepływu występują w odcinkach źródłowych rzek i wynoszą do około $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Jednak wahania zwiększają się wraz ze wzrostem liczby dopływów do głównych rzek (zwiększeniem powierzchni zlewni) oraz zwiększeniem udziału terenów antropogenicznych. W zdecydowanej większości zlewni różnica wahań przekracza wartości średnie przepływów.



Rysunek 15. Zestawienie przepływów miesięcznych w latach 2016–2021

Dругим параметром, принятым во внимание при оценке потенциала ретенционного – отток единичный – был рассчитан с целью получения информации, сколько воды сплывает с данной водосборной территории в единицу времени (в $\text{dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Это является важным параметром для анализа течения вод поверх-

нивых, поскольку позволяет идентифицировать водосборные бассейны по характеристикам, способствующим ретенции, а также характеристикам, способствующим ретенции. Высокий, средний отток единичный характеризует водосборные бассейны Цичей и Воды Ужской, а также весь водосборный бассейн Быстры – левостороннего притока Соли. Самые низкие средние

Rysunek 16. Średni odpływ jednostkowy w latach 2016–2021 [l/s km^2]Rysunek 17. Wahania wartości odpływu jednostkowego w zlewni Soły w latach 2016–2021 [l/s km^2]

odpływy jednostkowe oszacowano dla zlewni Koszarawy z wyłączeniem Sopotni na pojedynczych dopływach w pobliżu ujścia do zbiornika oraz w kilku zlewniach lewostronnych dopływów górnej Soły.

Największe wahania odpływów jednostkowych zidentyfikowano w zlewni górnej Soły i dopływów, Bystrej (d. Wody

Ujsolskiej) i Sopotnianki, zlewni dolnej Koszarawy, a także w zlewniach dopływów Soły przed ujściem do zbiornika. Najniższe wahania oszacowano w zlewni Bystrej – lewostronnego dopływu Soły oraz w zlewni Koszarawy do Sopotni (Rysunek 17).

7.3 Wpływ zmian klimatu

Wartości zmian parametrów meteorologicznych odzwierciedlające w modelu prognozy zmian klimatu opisano w rozdziale „Zmiany klimatu”. Dla wybranych parametrów i scenariuszy zidentyfikować można istotne trendy tych zmian. W raporcie analizę trendów wykonano przy użyciu dwóch metod: regresji liniowej (r^2) i testu Manna-Kendalla

(MK) (Kendall, 1975). Za istotny uznano trend o istotności statystycznej większej niż 95% ($p < 0,05$) zidentyfikowany co najmniej jedną ze wspomnianych powyżej metod. Wyniki o istotności większej niż 90% uznano natomiast za obecność istotnej tendencji zmiany parametru.

Dla analizowanego obszaru prognozowane zmiany klimatu wskazują na tendencję wzrostową sumy rocznej opadów atmosferycznych (dotyczy scenariusza RCP4.5), a także na istotny trend rosnący rocznej sumy opadów oraz opadów w miesiącach zimowych i wiosennych (dotyczy scenariusza RCP8.5). Zwiększone opady skutkować będą większą objętością wody w zlewni i tym samym większym jej „rozchodem” w postaci parowania, infiltracji lub spływu powierzchniowego, zależnie od lokalnych cech zlewni oraz od innych parametrów meteorologicznych.

W przypadku wilgotności względnej powietrza, żaden z dwóch analizowanych scenariuszy zmian klimatu nie charakteryzuje się istotną tendencją lub trendem dla wartości średnich rocznych. Możliwe są jednak do zidentyfikowania w obu scenariuszach istotne zmiany sezonowe. Na przełomie zimy i wiosny zidentyfikowano istotną tendencję malejącą wilgotności oraz istotne trendy malejące, odpowiednio w scenariuszach RCP4.5 i RCP 8.5. Natomiast jesienią i wczesną zimą występują istotne tendencje rosnące wilgotności względnej.

Drugim, najważniejszym parametrem kształtującym obieg wody w zlewni jest temperatura powietrza. W ujęciu długoterminowym, może ona nawet decydować o proporcjach składowych bilansu wodnego w większym stopniu niż zmiany opadów. Wzrost temperatury powoduje większe starty na parowanie, mniejsze opady śniegu i skrócenie okresu zalegania pokrywy śnieżnej. Zmiana taka wpływa także pośrednio na zasoby wodne poprzez wydłużenie okresu wegetacyjnego, co wpływa na bardziej intensywne zatrzymywanie wód opadowych na powierzchni roślin, większe parowanie, utrudniony spływ powierzchniowy i większy pobór wód przez rośliny. Straty na parowanie skutkować mogą mniejszym przepływem w ciekach i zwiększeniem koncentracji zanieczyszczeń. W powiązaniu z większym przyrostem biomasy i jesiennym rozkładem jej części efekty zmian temperatury mogą znacząco wpływać na sezonowe zmiany parametrów fizykochemicznych wody. W analizowanej zlewni zarówno scenariusz RCP4.5,

jak i RCP8.5 wykazują istotne trendy rosnące w ujęciu rocznym oraz we wszystkich miesiącach roku z osobna.

Ostatnim z parametrów meteorologicznych uwzględnionych w analizie wpływu zmian klimatu jest natężenie promieniowania słonecznego. Ze względu na prognozowany kierunek zmian (spadek), promieniowanie może wpływać na bilans wodny odwrotnie niż prognozowane zmiany temperatury. Promieniowanie jest uwzględnione w modelu zlewni jako czynnik wpływający na proces wzrostu roślin i fitoplanktonu, opad i topnienie śniegu oraz parowanie. Ten ostatni proces wskazuje na kluczową rolę promieniowania w prognozowanych zmianach odpływu ze zlewni, a same zmiany promieniowania powodować mogą zmniejszenie odpływu wód powierzchniowych. W obu analizowanych scenariuszach zmian klimatu zidentyfikowano istotne trendy malejące średnich, rocznych wartości natężenia promieniowania słonecznego. W scenariuszu RCP4.5 trendy zidentyfikowano w miesiącach jesiennych i zimowych, natomiast w scenariuszu RCP8.5 – dodatkowo w miesiącach wiosennych.

Poniżej w formie tabeli połączonej z wykresami przedstawiono wpływ prognozowanych zmian klimatu na podstawowe składowe bilansu wodnego zlewni w poszczególnych dekadach do roku 2100 (Rysunek 18). Jest to ogólna ocena wpływu zmian klimatu, na cały analizowany obszar w ujęciu rocznych wartości składowych bilansu. Dla podanych na rysunku parametrów (opad śniegu, ewapotranspiracja, spływ powierzchniowy, zasilanie cieków z profilu glebowego i z wód podziemnych) także wykonano analizę trendów. Jej wyniki przedstawiono w tabeli 16. Jedynymi parametrami, dla których nie zidentyfikowano istotnych trendów lub tendencji są spływ powierzchniowy oraz całkowite zasilanie cieków wodą i tym samym całkowity odpływ wód powierzchniowych z analizowanego obszaru. Należy w tym miejscu podkreślić, że pomimo braku obecności tendencji i trendów tych parametrów, efekt zmian klimatu można ocenić na istotny i jednoznaczny. Brak trendów i tendencji oznacza tylko, że brak jest zmiany o postępującej w czasie charakterystyce. Niemniej zmiany spływu powierzchni-

Rysunek 18. Wpływ prognozowanych zmian klimatu na podstawowe składowe bilansu wodnego zlewni w poszczególnych dekadach do roku 2100 (w każdej kolumnie z osobną rozpiętość zielonego pola odpowiada zakresowi od wartości najmniejszej – komórka biała – do wartości największej – komórka w pełni zielona).

Scenariusz		Opad	Opad śniegu	Ewapo- transpiracja	Potencjalna ewapo- transpiracja	Zasilanie cieków			
						Spływ powie- rzchniowy	Zasilanie z profilu glebowego	Zasilanie wodami podziem- nymi	Całkowite zasilanie
"0" (2016-2021)		1123.8	85.1	428.0	661.0	272.8	71.6	266.9	611.3
RCP4.5	2021-2030	1124.1	90.1	426.5	661.4	273.2	72.0	267.2	612.4
	2031-2040	1148.0	70.1	436.0	678.2	270.5	74.9	279.5	624.9
	2041-2050	1104.7	68.5	433.8	677.9	255.5	71.4	257.2	584.0
	2051-2060	1181.5	61.2	437.4	678.1	287.2	77.3	292.6	657.1
	2061-2070	1128.4	57.3	443.0	693.2	259.1	73.5	263.8	596.3
	2071-2080	1193.3	56.2	443.1	682.3	286.6	78.8	297.5	662.9
	2081-2090	1173.5	52.3	446.2	691.6	272.0	77.8	287.8	637.5
2091-2100		1173.3	50.4	447.0	692.2	273.7	77.5	285.8	637.1
RCP8.5	2021-2030	1154.2	96.2	425.7	655.2	291.8	73.3	279.8	644.9
	2031-2040	1152.4	77.3	436.3	674.9	281.0	73.9	274.6	629.5
	2041-2050	1216.9	81.1	434.9	669.3	310.4	78.7	306.9	696.0
	2051-2060	1197.1	54.6	447.2	691.5	286.9	78.8	295.6	661.2
	2061-2070	1196.7	50.1	449.1	691.5	280.8	79.5	298.1	658.4
	2071-2080	1209.3	32.0	458.9	713.3	277.0	81.2	300.1	658.3
	2081-2090	1217.5	26.5	466.6	726.2	277.5	81.8	297.7	657.0
2091-2100		1267.4	21.7	473.2	733.4	295.4	85.6	317.5	698.5

Tabela 16. Wyniki analizy trendów dla średnich rocznych składowych bilansu wodnego analizowanego obszaru

Parametr R ²		RCP4.5*		RCP8.5*	
		R2	MK	R2	MK
Opad		++	0	+++	+++
Opad śniegu		---	---	---	---
Ewapotranspiracja		+++	+++	+++	+++
Potencjalna ewapotranspiracja		+++	+++	+++	+++
Zasilanie cieków	Spyw powierzchniowy	0	0	0	0
	Zasilanie z profilu glebowego	++	++	+++	+++
	Zasilanie wodami podziemnymi	+	0	+++	++
	Całkowite zasilanie	0	0	+	0

* „r2” wyniki dotyczące regresji liniowej;
 „MK” wyniki dotyczące testu Manna-Kendalla;
 „+++” trend rosnący o istotności $p < 0,01$;
 „++” trend rosnący o istotności $p < 0,05$;
 „+” tendencja rosnąca o istotności $p < 0,1$;
 „---” trend malejący o istotności $p < 0,01$;
 „0” brak istotnego trendu / tendencji.

Rysunek 19. Kierunki zmian składowych bilansu wodnego w poszczególnych dekadach scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 względem danych obserwacyjnych użytych w pracy.

Scenariusz		Opad	Opad śniegu	Ewapotranspiracja	Potencjalna ewapotranspiracja	Zasilanie cieków			
						Spyw powierzchniowy	Zasilanie z profilu glebowego	Zasilanie wodami podziemnymi	Całkowite zasilanie
RCP4.5	2021-2030	+	+	-	+	+	+	+	+
	2031-2040	+	-	+	+	-	+	+	+
	2041-2050	-	-	+	+	-	-	-	-
	2051-2060	+	-	+	+	+	+	+	+
	2061-2070	+	-	+	+	-	+	-	-
	2071-2080	+	-	+	+	+	+	+	+
	2081-2090	+	-	+	+	-	+	+	+
	2091-2100	+	-	+	+	+	+	+	+
RCP8.5	2021-2030	+	+	-	-	+	+	+	+
	2031-2040	+	-	+	+	+	+	+	+
	2041-2050	+	-	+	+	+	+	+	+
	2051-2060	+	-	+	+	+	+	+	+
	2061-2070	+	-	+	+	+	+	+	+
	2071-2080	+	-	+	+	+	+	+	+
	2081-2090	+	-	+	+	+	+	+	+
	2091-2100	+	-	+	+	+	+	+	+

wego i całkowitego odpływu ze zlewni są jednokierunkowe w większości analizowanych scenariuszy zmian klimatu. W scenariuszu RCP4.5 wzrost spywu dotyczy czterech z ośmiu dekad w okresie 2021-2100, a wzrost odpływu całkowitego dotyczy sześciu z ośmiu dekad. W przypadku scenariusza RCP8.5 wzrosty wartości średnich rocznych oszacowano dla wszystkich dekad (Rysunek 19).

Poza wspomnianymi wyżej, dwoma parametrami (spyw i odpływ całkowity) wszystkie inne składowe bilansu cechują się istotnymi trendami lub tendencjami. Jedynym parametrem o malejącym kierunku zmian jest suma opadu śniegu, co ściśle powiązane jest z istotnym trendem rosnącym temperatury powietrza.

Opisane powyżej efekty zmiany klimatu z różną intensywnością dotyczą poszczególnych sezonów oraz zlewni cząstkowych analizowanego obszaru. W tabelach 17 i 18 przedstawiono wpływ zmiany klimatu na wartości sezonowe składowych bilansu wodnego analizowanej zlewni. Na ilustracjach w dalszej części tekstu, zobrazowano natomiast przestrzenne zróżnicowanie wpływu zmiany klimatu na średnie natężenie przepływu wód powierzchniowych w poszczególnych zlewniach (Rysunek 20) oraz na maksymalne amplitudy przepływów miesięcznych (Rysunek 21). Lokalne zmiany średniego natężenia przepływu wahają się od -3 do +18% względem wartości charakteryzujących stan aktualny. Należy tutaj zaznaczyć, że analizując pro-

gnozy dla poszczególnych dekad, przestrzenna zmienność wpływu zmiany klimatu na przepływ jest relatywnie niewielka – różnica między największą i najmniejszą zmianą wynosi około 5 procent. Dużo większy wpływ zmiany klimatu na przepływ widać w przypadku oceny różnych horyzontów czasowych (dekad). Największe prognozowane zmiany natężenia przepływu dotyczą dekady 2091-2100 i scenariusza RCP8.5, czyli prognozy o największym przyroście opadów atmosferycznych. Dla tej dekady, w różnych zlewniach cząstkowych analizowanego obszaru oszacowano zmianę średniego natężenia przepływu na wartość w zakresie od 11,6 do 16,7% wartości charakteryzującej stan aktualny (Rysunek 20). Trudniejsza do interpretacji jest prognozowana zmiana wahań natężenia przepływu w poszczególnych zlewniach (Rysunek 21). W tym przypadku brak jest prostej zależności wielkości zmiany wahań od zmiany opadu lub innego parametru meteorologicznego. Niezależnie od analizowanej dekady i scenariusza zmian klimatu wahania natężenia przepływu mogą zmieniać się lokalnie w zakresie od ok. -10 do +30%. W przeciwieństwie do prognozowanych zmian natężenia przepływu, których kierunki są relatywnie stałe w ujęciu przestrzennym, zmiany wahań przepływu mogą mieć odmienne kierunki w poszczególnych zlewniach cząstkowych. Wynika to z czułości przepływów maksymalnych i minimalnych na różne kombinacje zmian parametrów meteorologicznych.

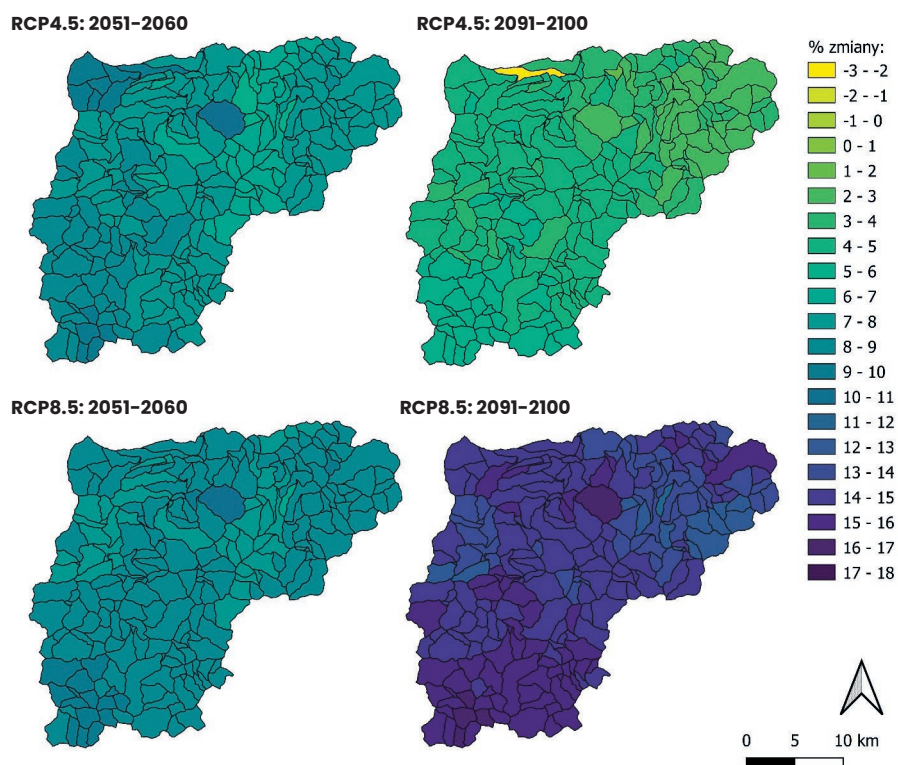
Tabela 17. Wpływ zmiany klimatu (RCP4.5) na wartości sezonowe składowych bilansu wodnego analizowanej zlewni

Sezon / Scenariusz	Opad śniegu	Ewapotranspiracja	Spływ powierzchniowy	Zasilanie z profilu glebowego	Zasilanie cieków wodami podziemnymi	Odpływ całkowity wód powierzchniowych
Wiosna						
Stan aktualny	8,4	122,4	54,0	16,1	61,9	131,9
2021-2030	9,4	121,6	56,1	16,5	63,7	136,3
2031-2040	6,0	124,9	56,7	16,2	62,5	135,4
2041-2050	6,5	125,2	58,4	16,8	68,2	143,3
2051-2060	2,9	129,7	60,0	17,5	69,3	146,8
2061-2070	3,1	130,4	54,2	16,4	66,3	136,8
2071-2080	3,0	133,5	61,4	17,9	72,1	151,4
2081-2090	3,1	136,2	63,9	18,2	72,2	154,3
2091-2100	1,2	140,0	59,9	17,7	74,1	151,8
Lato						
Stan aktualny	0,0	197,3	79,0	20,5	44,3	143,8
2021-2030	0,0	196,6	83,1	20,8	45,7	149,5
2031-2040	0,0	200,4	80,1	20,6	44,9	145,5
2041-2050	0,0	200,0	86,9	21,7	49,5	158,1
2051-2060	0,0	201,5	76,8	20,5	47,1	144,4
2061-2070	0,0	202,3	84,5	21,3	46,2	152,0
2071-2080	0,0	206,4	72,1	19,9	44,9	136,9
2081-2090	0,0	209,1	76,5	20,4	45,4	142,3
2091-2100	0,0	209,5	81,2	21,2	46,1	148,5
Jesień						
Stan aktualny	6,9	73,2	68,5	22,2	82,1	172,8
2021-2030	3,6	72,5	80,6	23,9	90,2	194,7
2031-2040	3,9	75,3	73,3	22,9	83,0	179,2
2041-2050	3,8	74,2	87,9	25,0	96,3	209,2
2051-2060	3,1	76,7	82,7	24,1	87,4	194,1
2061-2070	1,7	76,9	80,8	24,1	88,6	193,5
2071-2080	1,2	77,1	88,3	24,5	84,7	197,6
2081-2090	0,9	79,6	82,4	23,9	83,4	189,7
2091-2100	0,3	80,9	96,1	25,7	90,3	212,0
Zima						
Stan aktualny	69,6	34,9	71,0	12,9	78,3	162,2
2021-2030	82,9	34,8	71,8	12,2	79,8	163,7
2031-2040	67,2	35,6	70,7	14,2	83,9	168,7
2041-2050	70,6	35,4	77,0	15,1	92,6	184,7
2051-2060	48,5	39,1	67,1	16,7	91,4	175,2
2061-2070	45,1	39,3	61,1	17,7	96,7	175,4
2071-2080	27,7	41,8	54,9	18,9	98,0	171,8
2081-2090	22,4	41,5	54,4	19,2	96,4	170,0
2091-2100	20,2	42,6	57,9	20,9	106,6	185,5

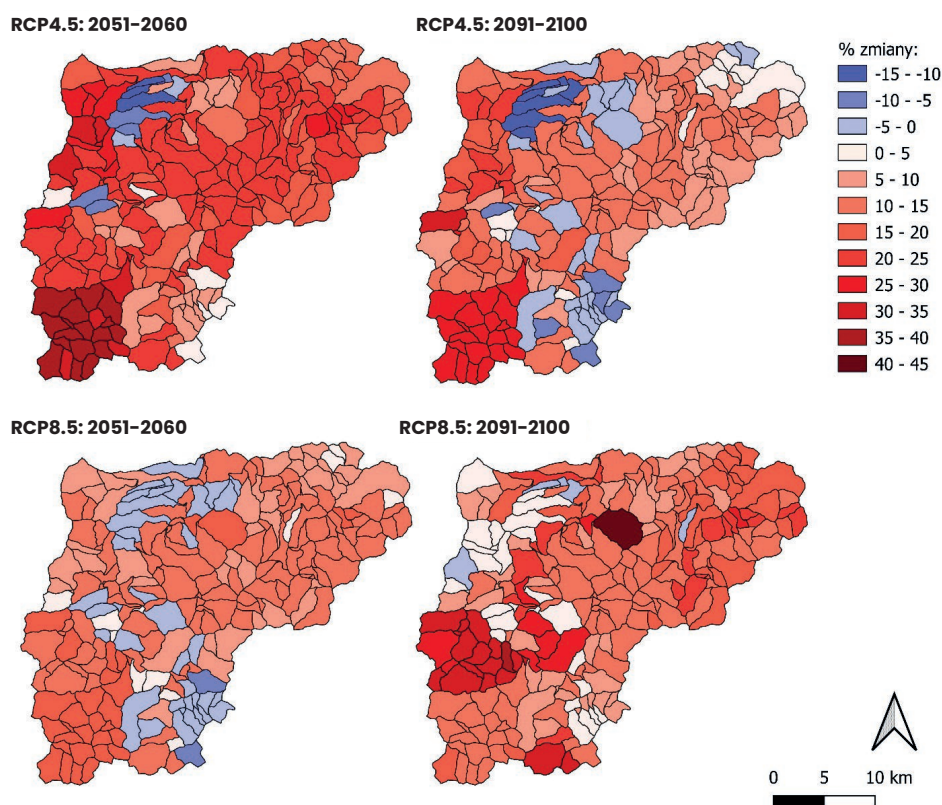
Tabela 18. Wpływ zmiany klimatu (RCP8.5) na wartości sezonowe składowych bilansu wodnego analizowanej zlewni

Sezon / Scenariusz	Opad śniegu	Ewapo- transpiracja	Spyw powierzchniowy	Zasilanie z profilu glebowego	Zasilanie cieków wodami podziemnymi	Odpływ całkowity wód powierzchniowych
Wiosna						
Stan aktualny	8,4	122,4	54,0	16,1	61,9	131,9
2021-2030	8,0	122,3	45,6	14,2	58,2	118,0
2031-2040	6,3	126,2	46,9	14,6	62,3	123,8
2041-2050	6,0	123,5	44,0	14,0	57,5	115,5
2051-2060	4,1	127,0	48,1	15,0	64,3	127,3
2061-2070	4,2	126,3	49,3	15,0	60,9	125,2
2071-2080	4,2	129,0	46,4	15,5	66,0	127,8
2081-2090	3,7	131,6	54,3	16,2	65,2	135,7
2091-2100	3,1	130,6	50,4	15,5	62,1	128,0
Lato						
Stan aktualny	0,0	197,3	79,0	20,5	44,3	143,8
2021-2030	0,0	197,7	81,0	20,7	42,2	143,9
2031-2040	0,0	199,9	75,2	20,1	41,0	136,4
2041-2050	0,0	202,0	71,4	19,3	37,0	127,7
2051-2060	0,0	201,3	76,4	20,5	43,7	140,6
2061-2070	0,0	203,2	69,1	19,0	37,9	126,1
2071-2080	0,0	202,5	83,7	21,4	44,9	150,0
2081-2090	0,0	202,3	74,0	20,3	44,2	138,5
2091-2100	0,0	203,9	80,5	20,8	43,2	144,5
Jesień						
Stan aktualny	6,9	73,2	68,5	22,2	82,1	172,8
2021-2030	3,8	71,5	72,4	22,8	83,8	179,0
2031-2040	3,8	72,5	79,1	23,5	83,5	186,2
2041-2050	3,6	71,4	74,1	22,8	78,2	175,1
2051-2060	3,2	71,7	88,4	24,8	88,9	202,1
2061-2070	3,0	74,9	75,7	23,1	77,7	176,5
2071-2080	2,9	72,4	90,0	25,0	93,7	208,7
2081-2090	2,9	73,4	75,8	23,1	82,7	181,6
2091-2100	1,5	73,3	79,1	23,9	86,9	189,9
Zima						
Stan aktualny	69,6	34,9	71,0	12,9	78,3	162,2
2021-2030	78,1	35,0	73,8	14,2	82,8	170,8
2031-2040	59,8	37,2	69,0	16,5	92,3	177,8
2041-2050	58,7	36,8	65,8	15,1	84,2	165,1
2051-2060	53,8	37,3	74,1	16,9	95,4	186,4
2061-2070	50,0	38,4	64,7	16,3	87,0	167,9
2071-2080	48,9	39,0	66,2	16,8	92,6	175,6
2081-2090	45,6	38,8	67,6	18,1	95,3	181,0
2091-2100	45,7	39,1	63,5	17,3	93,2	174,0

Rysunek 20. Zmiana procentowa średniego natężenia dopływu do poszczególnych zlewni w efekcie zmiany klimatu względem stanu aktualnego (scenariusze RCP4.5 i RCP8.5; dekady 2051–2060 i 2091–2100)



Rysunek 21. Zmiana procentowa amplitudy miesięcznych wartości natężenia dopływu do poszczególnych zlewni w efekcie zmiany klimatu względem stanu aktualnego (scenariusze RCP4.5 i RCP8.5; dekady 2051–2060 i 2091–2100)



7.4 Podsumowanie oceny potencjału retencyjnego i potrzeby retencjonowania wód

Wyniki obliczeń pozwalają na wskazanie obszarów, w których istnieje większy lub mniejszy potencjał retencyjny i większe lub mniejsze potrzeby retencjonowania wód. Jak wspomniano we „Wstępie”, potencjał retencyjny w tym opracowaniu charakteryzowany jest przez cechy pozwalające ocenić daną zlewnię jako odpowiednią do lokalizowania w niej obiektów i rozwiązań wspierających retencjonowanie wód płynących. Innymi słowy, zadaniem niniejszej pracy było zidentyfikowanie obszarów potencjalnie użytecznych do lokalizowania w nich np. zbiorników retencyjnych na ciekach.

To wyjaśnienie jest o tyle istotne, że pojęcie „potencjał retencyjny” jest używane w niektórych, innych pracach w odniesieniu do aktualnych lub zmieniających się w przeszłości cech zlewni, które pozwalają na zatrzymanie wód opadowych (Kowalczak, 2016; Wojkowski i in., 2020). W innych pracach (np. Cieśliński, Podleśny, 2008; Mroziak, Przybyła, 2013; Przybyła i in., 2015) używa się podobnej definicji, ale wspomina się też o potencjalnej, przyszłej zdolności retencyjnej, co jest bliskie istocie niniejszego opracowania. O ile jednak potencjalną zdolność retencyjną można budować różnymi działaniami technicznymi i organizacyjnymi, to w niniejszej pracy skupiono się na potencjale związanym z retencją wód płynących.

Poza potencjałem dla retencjonowania wód sklasyfikowano tutaj też potrzebę retencjonowania, czyli dokonano ilościowej oceny cech zlewni wskazujących na potrzebę okresowego zatrzymania wód płynących w celach ustabilizowania wielkości przepływu lub zaspokojenia obecnych bądź przyszłych potrzeb.

Oceny opisane w tym rozdziale opierają się o klasy parametrów zdefiniowane na potrzeby niniejszej pracy w oparciu o wyniki obliczeń składowych bilansu wodnego oraz o cechy zlewni wskazujące na okresowy nadmiar lub niedobór zasobów wodnych (zagrożenie powodzią i suszami).

W klasyfikacji poszczególnych zlewni przyjęto opisane w tabeli parametry (Tabela 19). Zgodnie z zawartością tabeli maksymalna liczba punktów w klasyfikacji potencjału i potrzeby retencji wynosi odpowiednio 8 i 11. W celu wyrażenia wyników oceny w skali od wartości 0 do 1 wynik uzyskany dla poszczególnych zlewni podzielono przez najwyższą wartość.

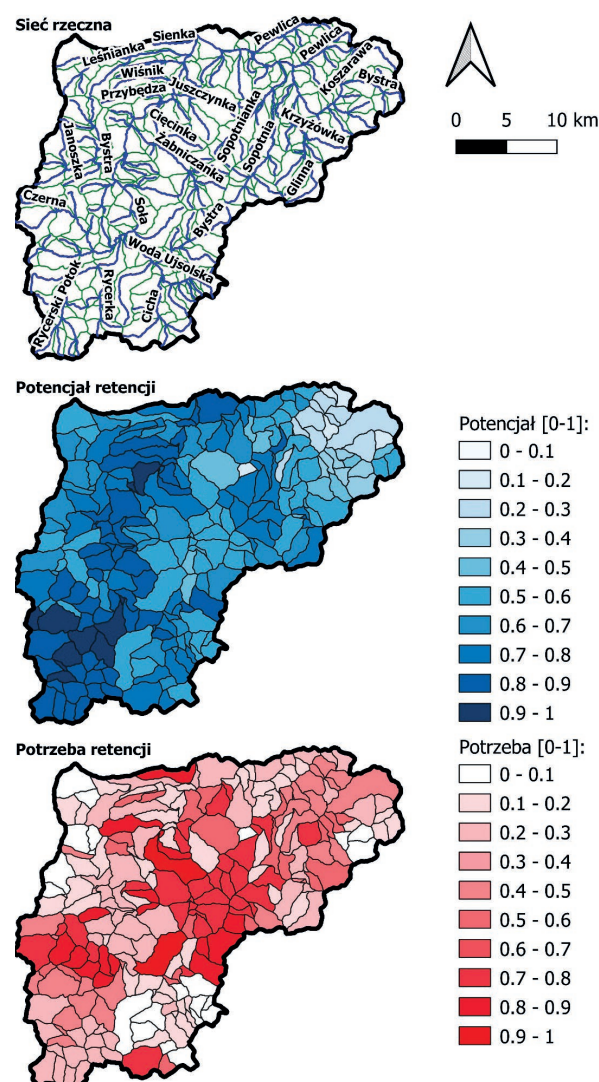
Na rysunku 22 przedstawiono wyniki uzyskane przez poszczególne zlewnie modelu. Wartości bliskie 1 oznaczają wysoki potencjał, czyli cechy świadczące o relatywnie wysokiej przydatności zlewni do lokalizowania w niej obiektów retencyjnych. Cechy takie charakteryzują następujące rzeki:

- Soła na całej długości w analizowanym obszarze, a szczególnie pomiędzy dopływami Żabniczanki i Cięcinki oraz dopływy Soły w górnym jej biegu, powyżej Rycerki;
- Dolna część biegu Koszarawy;
- Sopotnia i jej dopływy;
- Wieśnik i Przybiedza;

- Ujściowa część Bystrej (dopływ Soły) i Salamonki;
- Nieledwianka;
- Środkowa i dolna część Czernej i Wody Ujsolskiej;
- Rycerka wraz z dopływami.

W przypadku „potrzeb retencji” wartości bliskie 1 oznaczają zlewnie, w których obecnie występują lub w przyszłości wystąpią problemy z nadmiarem bądź niedoborem wód i tym samym potrzeba regulacji przepływu. Sytuację taką prognozujemy dla następujących rzek:

- Cięcinka wraz z dopływem – Luraniec;
- Żabniczanka wraz z dopływami;
- Sopotnianka i Sopotnia w środkowym i górnym biegu;
- Przybiedza;
- Sienka;
- Soła pomiędzy Rycerką i Czerłą;
- Czerna wraz z dopływami;
- Bystra (dopływ Wody Ujsolskiej) w górnym i środkowym biegu.



Rysunek 22. Klasyfikacja potencjału i potrzeby retencji

We wspomnianych klasyfikacjach pojawiają się zlewnie, które wskazują na potrzebę retencji w granicy zlewni lub poniżej niej i jednocześnie stanowią potencjalną lokalizację zbiorników retencyjnych. Należą do nich m.in. zlewnie następujących rzek:

- Przybęda,
- Sienka,
- Kiczora,
- Czarna,
- Soła między Czerną i Rycerką,
- Dolny bieg Rycerskiego Potoku i Rycerki,
- Środkowy bieg Bystrej (dopływ Wody Ujsolskiej),
- Sopotnia i Sopotnianka.

Tabela 19. Wskaźniki użyte w ocenie potencjału i potrzeby retencjonowania wód w zlewniach

Nr wskaźnika	Opis wskaźnika	Uwzględnienie w ocenie potencjału	Uwzględnienie w ocenie potrzeby retencji
1	Obecność wewnątrz zlewni obszarów zagrożonych powodzią od strony rzeki oraz obszarów narażonych na podtopienia (MZP, 2022)	W przypadku zlewni o zidentyfikowanym zagrożeniu lub narażeniu zakłada się istnienie okresowego nadmiaru wód, które mogą stanowić źródło zasilania dla obiektów retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji.	Występowanie obszarów zagrożonych i narażonych w zlewni świadczy o potrzebie retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji.
2	Obecność w zlewni poniżej zlewni obszarów zagrożonych powodzią od strony rzeki oraz obszarów narażonych na podtopienia (MZP, 2022)	Nie dotyczy.	Występowanie obszarów zagrożonych i narażonych w zlewni poniżej świadczy o potrzebie retencji. Brak uwzględnienia w klasyfikacji, ponieważ wszystkie zlewnie cząstkowe posiadają poniżej zlewnie zagrożone powodzią lub narażone na podtopienia.
3	Klasa zagrożenia suszą – suma klas zagrożenia suszą hydrogeologiczną, hydrologiczną i rolniczą (Dz.U. 2021, poz. 1615). W analizowanym obszarze występują jedynie zagrożenia umiarkowane i silne. O przestrzennym rozkładzie zagrożenia suszą (suma klas) decyduje zagrożenie suszą hydrologiczną. Obszary o zagrożeniu umiarkowanym pokrywają się z obszarami zagrożenymi w stopniu silnym suszą hydrologiczną, natomiast obszar o zagrożeniu silnym pokrywają się z obszarami o ekstremalnym zagrożeniu suszą hydrologiczną.	W przypadku zlewni o zidentyfikowanym zagrożeniu silnym zakłada się istnienie okresowego niedoboru wód, które mogą stanowić źródło zasilania dla obiektów retencji. Pozostałe zlewnie otrzymują 1 punkt w klasyfikacji.	W przypadku zlewni o zidentyfikowanym zagrożeniu silnym zakłada się istnienie potrzeby retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji.
4	Obecność silnego zagrożenia suszą w zlewniach poniżej (Dz.U. 2021, poz. 1615).	Nie dotyczy.	W przypadku obecności poniżej zlewni o zidentyfikowanym zagrożeniu silnym zakłada się istnienie potrzeby retencji i okresowego uwalniania zasobów wodnych. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji.
5	Zlewnie o odpływie jednostkowym i o natężeniu przepływu większym od przeciętnego	Odpływ taki świadczy o obecności źródła zasilania obiektów retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji (odrębnie dla przepływu jednostkowego i dla natężenia przepływu).	Nie dotyczy.
6	Zlewnie o skrajnie wysokich i niskich wartościach średniego odpływu jednostkowego.	Nie dotyczy.	Wartości takie mogą wskazywać na okresowe nadmiary i niedobory wód, co może być minimalizowane poprzez obiekty retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji w przypadku wartości poniżej percentyla 20 i powyżej percentyla 80. Zlewnia otrzymuje 2 punkty w klasyfikacji w przypadku wartości poniżej percentyla 10 i powyżej percentyla 90.

Nr wskaźnika	Opis wskaźnika	Uwzględnienie w ocenie potencjału	Uwzględnienie w ocenie potrzeby retencji
7	Zlewnie o największych wahanach natężenia przepływu (większe od przeciętnych). W ocenie uwzględniono wachanie relatywne w stosunku do przepływu średniego. W przeciwnym wypadku skrajne oceny uzyskiwałyby zlewnie źródłiskowe i ujściowa część analizowanego obszaru.	Wahania te mogą świadczyć o okresowym nadmiarze wód, który może być wykorzystany w celu zasilania obiektów retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji	Wahania te mogą świadczyć o okresowym nadmiarze wód i niedoborze wód, co może być minimalizowane poprzez obiekty retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji
8	Zlewnie, dla których na skutek prognozowanych zmian klimatu zidentyfikowano przyszłe zwiększenie natężenia przepływu. Zwiększenie rozumiane jest tutaj jako obecność istotnej tendencji lub trendu rosnącego bądź jako wartości większe od aktualnych, obliczone dla co najmniej 80% przyszłych dekad i scenariuszy zmian klimatu.	Zmiana taka świadczy o potencjalnym wzroście zasobów możliwych do wykorzystania na cele retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji w przypadku obecności wzrostu w co najmniej 80% dekad i scenariuszy. Zlewnia otrzymuje dodatkowy 1 punkt w klasyfikacji w przypadku obecności istotnego trendu lub tendencji rosnącej.	Wskaźnik ten interpretowany jest jako wzrost zagrożenia tylko w przypadku, gdy aktualne wartości odpływu jednostkowego są skrajnie wysokie, czyli, gdy dla wskaźnika nr 6 zlewnia uzyskała punkt. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji w przypadku obecności wzrostu w co najmniej 80% dekad i scenariuszy. Zlewnia otrzymuje dodatkowy 1 punkt w klasyfikacji w przypadku obecności istotnego trendu lub tendencji rosnącej.
9	Zlewnie, dla których na skutek prognozowanych zmian klimatu zidentyfikowano przyszłe zwiększenie odpływu jednostkowego. Zwiększenie rozumiane jest tutaj jako obecność istotnej tendencji lub trendu rosnącego bądź jako wartości większe od aktualnych, obliczone dla co najmniej 80% przyszłych dekad i scenariuszy zmian klimatu.	Zmiana taka świadczy o potencjalnym wzroście zasobów możliwych do wykorzystania na cele retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji w przypadku obecności wzrostu w co najmniej 80% dekad i scenariuszy. Zlewnia otrzymuje dodatkowy 1 punkt w klasyfikacji w przypadku obecności istotnego trendu lub tendencji rosnącej.	Nie dotyczy.
10	Zlewnie, dla których na skutek prognozowanych zmian klimatu zidentyfikowano przyszłe zmniejszenie natężenia przepływu.	Nie dotyczy. Wskaźnik o przeciwnym znaczeniu został już uwzględniony w ocenie.	Zmiana taka wskazuje na przyszłe uszczuplenie zasobów dyspozycyjnych, a także na zmianę warunków bytowania organizmów wodnych. Retencja wód mogłaby przeciwdziałać prognozowanej zmianie. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji
11	Zlewnie, dla których na skutek prognozowanych zmian klimatu zidentyfikowano przyszłe zmniejszenie odpływu jednostkowego.	Nie dotyczy. Wskaźnik o przeciwnym znaczeniu został już uwzględniony w ocenie.	Zmiana taka wskazuje na przyszłe uszczuplenie zasobów dyspozycyjnych, a także na zmianę warunków bytowania organizmów wodnych. Retencja wód mogłaby przeciwdziałać prognozowanej zmianie. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji. Zlewnia otrzymuje dodatkowy punkt jeżeli w stanie aktualnym odpływ jednostkowy mieści się w przedziale do wartości charakteryzującej 20 percentyl uzyskanych wyników średniego odpływu jednostkowego w analizowanym obszarze.
12	Prognozowane zwiększenie wahan natężenia przepływu	Wahania te mogą świadczyć o wyższym od obecnego, okresowym nadmiarze wód, który może być wykorzystany w celu zasilania obiektów retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji	Wahania te mogą świadczyć o wyższym od obecnego, okresowym nadmiarze wód i niedoborze wód, co może być minimalizowane poprzez obiekty retencji. Zlewnia otrzymuje 1 punkt w klasyfikacji
Maksymalna liczba punktów		8	11

8. Literatura i materiały źródłowe

1. Absalon D., Matysik M., Pieron Ł., 2023. Evaluation of Pressure Types Impacted on Sediment Supply to Dam Reservoirs: Selected Examples of the Outer Western Carpathians Catchments Area. *Water*, 15(3):597. <https://doi.org/10.3390/w15030597>.
2. Ballabio C., Panagos P., Montanarella L., 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database (2016) *Geoderma*, 261, pp. 110–123.
3. BDOT10k. Baza Danych Obiektów Topograficznych. Główny Urząd Geodezji i Kartografii. <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-obiektow-topograficznych-bdot10k/> (data pozyskania: 2023.12.28)
4. CAMS, 2021. Baza danych "CAMS Radiation Service w wersji 3.2" udostępniona przez European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), w ramach program Copernicus Atmosphere Monitoring Service Information 2021. <https://atmosphere.copernicus.eu/solar-radiation> [data pozyskania danych: 2021-12-03].
5. Carrer D., Roujean J.-L., Meurey C., 2010. Comparing Operational MSG/SEVIRI Land Surface Albedo Products From Land SAF With Ground Measurements and MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2010, 48, 1714 – 1728. DOI 10.1109/TGRS.2009.2034530.
6. CDM, 2020. Analiza znaczących oddziaływań antropogenicznych wraz z oceną ich wpływu/oddziaływania na stan wód oraz oceną ryzyka nieosiągnięcia celów środowiskowych. CDM Smith Sp. z o.o. Opracowano w ramach projektu „Opracowanie II aktualizacji planów gospodarowania wodami na obszarach dorzeczy wraz z dokumentami planistycznymi stanowiącymi podstawę do ich opracowania”, Nr Projektu: POIS.02.01.00-00-0016/16
7. Cieśliński R., Podleśny A., 2008. Uwarunkowania retencji wybranej zlewni źródłiskowej strefy krawędziowej Wysoczyzny Gdańskiej. *Dokumentacja Geograficzna*, 2008, 37, 34–41.
8. CKPŚ, 2009. Przeciwdziałanie skutkom odpływu wód opadowych na terenach górskich. Zwiększenie retencji i utrzymanie potoków oraz związanej z nimi infrastruktury w dobrym stanie. Centrum Koordynacji Projektów Środowiskowych, Lasy Państwowe.
9. de Brogniez D., Ballabio C., Stevens A., Jones R. J. A., Montanarella L., van Wesemael B., 2015. A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model. *European Journal of Soil Science*. 66(1): 121–134, doi: 10.1111/ejss.12193.
10. Dz.U.2021.1615. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 15 lipca 2021 r. w sprawie przyjęcia Planu przeciwdziałania skutkom suszy.
11. Dz.U.2023.300. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 4 listopada 2022 r. w sprawie Planu gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Wisły.
12. Dile Y.T., Srinivasan R., 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 1–16. DOI: 10.1111/jawr.12182.
13. Fuka D.R., MacAllister C.A., Degaetano A.T., Easton Z.M., 2013. Using the Climate Forecast System Reanalysis dataset to improve weather input data for watershed models. *Hydrol. Proc.* DOI: 10.1002/hyp.10073.
14. Geiger B., Carrer D., Franchisteguy L., Roujean J., Meurey C., 2008. Surface Albedo Derived on a Daily Basis From Meteosat Second Generation Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2008, 46, 3841 – 3856. DOI 10.1109/TGRS.2008.2001798.
15. IMGW, 2023. Rocznik Meteorologiczny 2022. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.
16. Kendall M.G., 1975. *Rand correlation methods* Charles Griffin, London
17. Kowalczak P., 2016. Mikroretencja jako element zintegrowanego gospodarowania wodą. *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*. 49/2016 s. 281–303.
18. Koźuch B., Ulańczyk R., 2020. Monitoring środowiska wodnego i badania modelowe realizowane w obszarze zlewni zbiornika Kozłowa Góra (Water environment monitoring and model research in the Kozłowa Góra reservoir catchment basin). *Gospodarka Wodna*, 2(2020), pp. 19–22.
19. Łozowski B., Ulańczyk R., 2018. Cyfrowe modele zbiorników wodnych – narzędzie do zarządzania wodami i ekosystemem. [w:] *Aktualne Problemy Gospodarki Wodnej*. Śląskie Centrum Wody, 83–102. ISBN 9788361695462.
20. Machowski R., Rzętała M., Rzętała M. A., Wistuba B., 2005. Zbiornik Żywiecki. Charakterystyka fizycznogeograficzna i znaczenie społeczno-gospodarcze. *Polskie Towarzystwo Geograficzne – Oddział Katowicki*.
21. Mroziński K., Przybyła C., 2013. Mała retencja w planowaniu przestrzennym. *Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Poznaniu*. ISBN 978-83-64246-06-7.
22. Muñoz S., 2019. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 01-11-2022), 10.24381/cds.e2161bac.
23. MZP, 2022. Aktualizacja map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego. Dostępne online: <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/aktualizacja-map-zagrozenia-powodziowego-i-map-ryzyka-powodziowego> (stan na: 2024.03.15)
24. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation, grassland, soil and water research laboratory, Blackland Research Centre, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University System.
25. NMT 1 m. 2023. Numeryczny model terenu. Główny Urząd Geodezji i Kartografii. <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/numeryczny-model-terenu-nmt/> (data pozyskania: 2023.12.15)

26. Panagos P., 2006. The European soil database. GEO: connexion, 5 (7), pp. 32–33. The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN, 2004.
27. Pieron Ł., Absalon D., Matysik M., 2024. Multi-criteria assessment of factors affecting the reduction of retention capacity of dam reservoirs. *Elementa: Science of the Anthropocene* 12(1). DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00069>.
28. Przybyła C., Sojka M., Mroziak K., Wróżyński R., Pyszny K., 2015. *Metodyczne i praktyczne aspekty planowania małej retencji*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe. Poznań 2015. ISBN 978-83-7986-057-9.
29. PTG, 2009. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Roczniki Gleboznawcze*. Tom LX NR 2 Warszawa 2009: 5–16.
30. Saxton K.E., 1986. Estimating generalized soil–water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50(4):1031–1036.
31. Sitek S., Ulanczyk R., Kowalczyk A., 2015. Estimating groundwater recharge in post-mining and urban area using SWAT and FEFLOW models, case study from Poland. *Proceedings: International Soil & Water Assessment Tool Conference June 24–26, 2015*.
32. Solon, J., Borzyszkowski J., Bidlasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorzczak I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Kręż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Pańska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziemia W., 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland – verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data, *Geographia Polonica*, 91, 2, s. 143–168.
33. Stawowczyk B., 2023. Wpływ zbiorników Kaskady Soły na reżim hydrologiczny rzeki Soły. Praca magisterska napisana pod kierunkiem D. Absalona na Wydziale Przyrodniczym Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.
34. Stolarska M., Matysik M., Absalon D., Czernecki B., Bernadowska A., Łukasiewicz G., 2021. Zmiany klimatu a zasoby wody na Żywiecczyźnie (Raport). *Kodlacja Dbamy o wodę*.
35. Strużewska J., Jefimow M., Jagiełło P., Kleczek M., Sattari A., Gienibor A., Norowski A., Durka P., Walczak B., Drzewiecki P., 2020. Zmiany temperatury i opadu na obszarze Polski w warunkach przyszłego klimatu do roku 2100 – Raport skrócony. Baza wiedzy o zmianach klimatu i adaptacji do ich skutków oraz kanałów jej upowszechniania w kontekście zwiększenia odporności gospodarki, środowiska i społeczeństwa na zmiany klimatu oraz przeciwdziałania i minimalizowania skutków nadzwyczajnych zagrożeń. Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy.
36. Ulanczyk R., Klis C., Bjørkenes Christiansen A., Samborska K., Pecka T., Cofalka P., Skotak K., Bronder J., 2015. SWAT model as a part of the integrated monitoring and modeling system for the Goczałkowice Reservoir basin. *Proceedings: International Soil & Water Assessment Tool Conference June 24–26, 2015*.
37. Ulańczyk R., Pecka T., Skotak K., Samborska K., Kłis C., Suschka J., Laspidou C., Kokkinos K., Froelich W., Brągiel T., Batóg A., 2017. Systemy wspomagania dla gospodarki wodno-ściekowej. *Wodociągi i Kanalizacja*, 1(155) pp. 30–33.
38. USDA, 2007. *National Engineering Handbook – Part 630 Hydrology: Chapter 7 Hydrologic Soil Groups*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
39. Więzik B., Madzia M., 2022. Monitoring wód powierzchniowych rzeki Soły i Koszarawy. Raport z realizacji prac wykonanych w roku hydrologicznym 2021–2022. *Stowarzyszenie Hydrologów Polskich*.
40. Williams J.R., 1995. Chapter 25. The EPIC Model. p. 909–1000. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.
41. Wojkowski J., Wałęga A., Młyński D., Radecki-Pawlik A., Lepeška T., 2020. Wpływ zmian pokrycia i użytkowania terenu na krajobrazowy potencjał hydryczny zlewni i trendy przepływów charakterystycznych. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, z. 45 2022.

SPIS RYSUNKÓW:

Rysunek 1.	
Podział fizycznogeograficzny i rzeźba zlewni Soły.....	5
Rysunek 2.	
Budowa geologiczna zlewni rzeki Soły.....	6
Rysunek 3.	
Lokalizacja obszaru analiz na tle granic administracyjnych.....	7
Rysunek 4.	
Zlewnie JCWP stanowiące obszar analiz.....	8
Rysunek 5.	
Zlewnie JCWP oraz zlewnie elementarne MPHP, stanowiące podstawę podziału obszaru modelu na zlewnie cząstkowe.....	8
Rysunek 6.	
Numeryczny model terenu użyty do parametryzacji modelu SWAT.....	8
Rysunek 7.	
Klasy nachylenia terenu przyjęte w modelu SWAT.....	8
Rysunek 8.	
Mapa pokrycia terenu zgodna z klasyfikacją przyjętą w modelu.....	10
Rysunek 9.	
Punkty reprezentujące 12 tekstur z bazy LUCAS (rysunek górny) i 5 grup tekstur z bazy SGDBE (rysunek dolny) – środki ciężkości figur.....	13
Rysunek 10.	
Stacje opadowe wybrane do parametryzacji modelu na podstawie dostępności danych dla okresu 2016–2022 i dla lat wcześniejszych.....	17
Rysunek 11.	
Mapa wodowskazów PSHM, których dane zostały użyte na potrzeby kalibracji modelu.....	19
Rysunek 12.	
Mapa punktów monitoringu przepływu SHP (na podstawie: Więzik, Madzia (2022)).....	20
Rysunek 13.	
Średnia, roczna suma opadu atmosferycznego dla zlewni Soły przyjęta w modelu dla okresu 2016–2021.....	25
Rysunek 14.	
Średnia suma opadu atmosferycznego w poszczególnych zlewniach i sezonach, na podstawie danych z okresu 2016–2021 (uwzględnione miesiące: wiosna 3–5, lato 6–8, jesień 9–11, zima 12–2).....	25
Rysunek 15.	
Zestawienie przepływów miesięcznych w latach 2016–2021.....	26
Rysunek 16.	
Średni odpływ jednostkowy w latach 2016–2021 [$l/s \text{ km}^2$].....	27
Rysunek 17.	
Wahania wartości odpływu jednostkowego w zlewni Soły w latach 2016–2021 [$l/s \text{ km}^2$].....	27
Rysunek 18.	
Wpływ prognozowanych zmian klimatu na podstawowe składowe bilansu wodnego zlewni w poszczególnych dekadach do roku 2100 (w każdej kolumnie z osobną rozpiętość zielonego pola odpowiada zakresowi od wartości najmniejszej – komórka biała – do wartości największej – komórka w pełni zielona).....	28
Rysunek 19.	
Kierunki zmian składowych bilansu wodnego w poszczególnych dekadach scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 względem danych obserwacyjnych użytych w pracy.....	29
Rysunek 20.	
Zmiana procentowa średniego natężenia dopływu do poszczególnych zlewni w efekcie zmiany klimatu względem stanu aktualnego (scenariusze RCP4.5 i RCP8.5; dekady 2051–2060 i 2091–2100).....	32
Rysunek 21.	
Zmiana procentowa amplitudy miesięcznych wartości natężenia dopływu do poszczególnych zlewni w efekcie zmiany klimatu względem stanu aktualnego (scenariusze RCP4.5 i RCP8.5; dekady 2051–2060 i 2091–2100).....	32
Rysunek 22.	
Klasyfikacja potencjału i potrzeby retencji.....	33

SPIS TABEL:

Tabela 1.	
Zlewnie JCWP stanowiące obszar analiz.....	7
Tabela 2.	
Powiązanie klas pokrycia terenu BDOT10k z bazą danych modelu SWAT.....	9
Tabela 3.	
Kody klas pokrycia terenu użytych w modelu reprezentującym stan aktualny.....	10
Tabela 4.	
Zakresy danych i klasyfikacje poszczególnych parametrów, których kombinacje stanowiły podstawę do wyznaczenia klas gleb zgodnych z wymaganiami modelu SWAT.....	11
Tabela 5.	
Udziały iłu, pyłu i piasku reprezentujące klasy granulometryczne przyjęte w modelu na podstawie bazy danych LUCAS.....	14
Tabela 6.	
Udziały iłu, pyłu i piasku reprezentujące klasy granulometryczne przyjęte w modelu na podstawie bazy danych SGDBE.....	14
Tabela 7.	
Parametry zależna od składu granulometrycznego przyjęte w modelu.....	15
Tabela 8.	
Dane o poborach wód powierzchniowych w analizowanej zlewni (CDM, 2020).....	17
Tabela 9.	
Prognozowane zmiany klimatu w poszczególnych dekadach względem dekady 2011-2020 (na podstawie: Projekt KLIMADA 2.0).....	18
Tabela 10.	
Lista wodowskazów PSHM, których dane zostały użyte na potrzeby kalibracji modelu.....	20
Tabela 11.	
Lista punktów monitoringu przepływu SHP (na podstawie: Więzik, Madzia (2022)).....	20
Tabela 12.	
Parametry uwzględnione w ocenie czułości modelu i wartości przyjęte w procesie kalibracji.....	22
Tabela 13.	
Ocena efektu kalibracji modelu.....	23
Tabela 14.	
Wynik analizy korelacji przepływu (Q) i opadu (P) obserwowanego w stacjach PSHM.....	24
Tabela 15.	
Średnie miesięczne wartości wybranych parametrów meteorologicznych i hydrologicznych w zlewni Soły w latach 2016-2021, na podstawie danych z modelu SWAT.....	25
Tabela 16.	
Wyniki analizy trendów dla średnich rocznych składowych bilansu wodnego analizowanego obszaru.....	29
Tabela 17.	
Wpływ zmiany klimatu (RCP4.5) na wartości sezonowe składowych bilansu wodnego analizowanej zlewni.....	30
Tabela 18.	
Wpływ zmiany klimatu (RCP8.5) na wartości sezonowe składowych bilansu wodnego analizowanej zlewni.....	31
Tabela 19.	
Wskaźniki użyte w ocenie potencjału i potrzeby retencjonowania wód w zlewniach.....	34



GEOEKOMA

ul. Siewierska 57
42-480 PORĘBA
tel. +48 696 468 559;
+48 32 793 62 49
e-mail: geoekoma@op.pl