



Plany zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych

Analiza wpływu zmian klimatu na zagrożenie
powodziowe na przykładzie zlewni Nysy Kłodzkiej



Projekt:

Wsparcie przygotowania krajowych dokumentów planistycznych w zakresie polityki ochrony środowiska zapewniających skuteczną realizację polityki spójności – Etap II

Plany zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych, w tym planów zarządzania ryzykiem od strony morza, w tym morskich wód wewnętrznych – Część I.

Metryka

Dane	Opis
Tytuł dokumentu	Analiza wpływu zmian klimatu na zagrożenie powodziowe na przykładzie zlewni Nysy Kłodzkiej
Autor dokumentu (firma/ instytucja)	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy dr hab. inż. Tamara Tokarczyk, prof. IMGW PIB mgr inż. Anna Bogusz dr inż. Marcin Urbański dr inż. Maciej Zdralewicz
Nazwa Projektu	Wsparcie przygotowania krajowych dokumentów planistycznych w zakresie polityki ochrony środowiska zapewniających skuteczną realizację polityki spójności – Etap II
Część zamówienia nr	I - Opracowanie planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych
Umowa	Nr KZGW/ DPiZW-op/ POPT/1/ 2013
Rodzaj dokumentu	Raport
Poufność	NIE
WBS i nazwa projektu	

Historia zmian

Wersja	Autor	Data	Zmiana
1.00	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy;	Sierpień 2015	Wersja 1.00, Przekazana zamawiającemu do akceptacji
2.00	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy;	Listopad 2015	Wersja 2.00, Uwzględnienie uwag Zamawiającego z dnia 23.10.2015

Recenzje dokumentu

Wersja	Autor	Data
1	Zamawiający	23.10.2015
2		
3		

Odniesienie do innych dokumentów

Nazwa dokumentu	Data opracowania dokumentu
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Pregoty	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Górnej Odry	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Środkowej Odry	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Warty	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Dolnej Odry	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Małej Wisły	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Górnej Wisły	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Środkowej Wisły	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Dolnej Wisły	Sierpień 2015
Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Łyny i Węgorapy	Sierpień 2015

Wykaz skrótów stosowanych w dokumencie

Skrót	Rozwinięcie
GCM	Globalne modele klimatyczne (Global Climate Models)
IPCC	Międzyrządowy Zespół do spraw Zmian Klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change)
RCM	Regionalne modele klimatyczne (Regional Climate Models)
SCS	Służba Ochrony Gleb (Soil Conservation Service)
SRES	Scenariusze emisji gazów cieplarnianych (Special Report on Emission Scenarios)

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	12
2. Skutki zmian klimatu dla zasobów wodnych	16
3. Scenariusze zmian klimatu dla zlewni Nysy Kłodzkiej	22
3.1. Charakterystyka prognozowanych opadów	24
4. Odpływ ze zlewni Nysy Kłodzkiej	34
4.1. Charakterystyka fizyczno-geograficzna zlewni Nysy Kłodzkiej.....	34
4.2. Charakterystyka klimatyczna i meteorologiczna zlewni badawczej	35
4.3. Charakterystyka hydrologiczna zlewni Nysy Kłodzkiej do stacji wodowskazowej w Kłodzku	35
5. Model hydrologiczny HEC-HMS	39
5.1. Model HEC-HMS zlewni Nysy Kłodzkiej do stacji wodowskazowej w Kłodzku.....	42
5.2. Kalibracja modelu opad-odpływ zlewni Nysy Kłodzkiej	50
6. Ocena wpływu zmian klimatu na zagrożenie powodziowe w zlewni Nysy Kłodzkiej	53
6.1. Analiza scenariuszy prognozy opadu dla zlewni Nysy Kłodzkiej	53
6.2. Odpływ ze zlewni Nysy Kłodzkiej dla opadów prognozowanych	59
7. Podsumowanie	66
8. Wnioski	68
9. Literatura	70

SPIS TABEL

Tabela nr 1	Przykłady możliwego wpływu zmian klimatu na zasoby wodne oraz gospodarkę rolno-środowiskową i przemysłową w XXI wieku, w wyniku nawalnych opadów	16
Tabela nr 2	Scenariusze wykorzystane do obliczenia projekcji klimatu dla zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko.....	22
Tabela nr 3	Maksymalna suma dobową opadu w wieloleciu referencyjnym 1971-2010 na podstawie obserwacji oraz scenariuszy klimatycznych [mm]	23
Tabela nr 4	Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 70-100 mm (opad powodziowy) dla wielolecia 1971-2010 na podstawie obserwacji oraz scenariuszy klimatycznych	23
Tabela nr 5	Liczebność sumy dobowej opadu w klasie >100 mm (opad katastrofalny) na podstawie obserwacji oraz scenariuszy klimatycznych	24
Tabela nr 6	Średnia suma opadów (rok, półrocze letnie i półrocze zimowe) w wieloleciu 1971-2010 oraz 2021-2070	25
Tabela nr 7	Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 30-50 mm (opad bardzo silny)	26
Tabela nr 8	Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 50-70 mm (opad groźny).....	26
Tabela nr 9	Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 70-100 mm (opad powodziowy)	27
Tabela nr 10	Liczebność sumy dobowej opadu w klasie >100 mm (opad katastrofalny)	27
Tabela nr 11	Maksymalna suma dobową opadu w wieloleciu referencyjnym 1971-2010 oraz w wieloleciu 2031-2070 wg scenariuszy klimatycznych [mm].....	28
Tabela nr 12	Wykaz posterunków wodowskazowych na badanym obszarze.....	35
Tabela nr 13	Przebiegi charakterystyczne dla wielolecia, zlewnia Nysy Kłodzkiej, 1966-2005.....	36

Tabela nr 14	Charakterystyki fizyczno-geograficzne oraz przyjęte parametry modelu dla zlewni cząstkowych	43
Tabela nr 15	Model HEC-HMS zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko – wyniki kalibracji.....	50
Tabela nr 16	Percentyl 99 sumy 5-dniowej opadów dla półrocza letniego	53
Tabela nr 17	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wodowskaz Kłodzko.....	59
Tabela nr 18	Porównanie odpływów symulowanych dla założonych scenariuszy prognozy opadów oraz okresu referencyjnego.....	63

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek nr 1	Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 1971-2010, w mm/dobę, dla wybranego modelu MPI-M-REMO_ECHAM5	19
Rysunek nr 2	Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 2011-2070, w mm/dobę, dla wybranego modelu MPI-M-REMO_ECHAM5	19
Rysunek nr 3	Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 1971-2010, w mm/dobę, dla wybranego modelu KNMI-RECMO2_ECHAM5-r3.....	19
Rysunek nr 4	Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 2011-2070, w mm/dobę, dla wybranego modelu KNMI-RECMO2_ECHAM5-r3.....	19
Rysunek nr 5	Liczebność sumy dobowej opadu dla stacji Kłodzko dla wielolecia 1971-2010 oraz dla wielolecia 2031-2070 wg projekcji zmian klimatu w klasach: (1) 30-50 mm, (2) 50-70 mm, (3) 70-100 mm, (4) >100- mm.....	29
Rysunek nr 6	Liczebność sumy dobowej opadu dla stacji Kłodzko dla wielolecia 1971-2010 oraz dla wielolecia 2031-2070 wg projekcji zmian klimatu w klasach: (1) 30-50 mm, (2) 50-70 mm, (3) 70-100 mm, (4) >100- mm.....	29
Rysunek nr 7	Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 1... 30	30
Rysunek nr 8	Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 2... 30	30
Rysunek nr 9	Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 3... 31	31
Rysunek nr 10	Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 4... 31	31
Rysunek nr 11	Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 5... 32	32
Rysunek nr 12	Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 6... 32	32
Rysunek nr 13	Podział fizycznogeograficzny, granice mezoregionów [Atlas ... 1997]	34
Rysunek nr 14	Schemat blokowy systemu dynamicznego zlewni w modelu HEC-HMS	39
Rysunek nr 15	Schematyzacja zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko w modelu HEC-HMS.....	42
Rysunek nr 16	Lokalizacja stacji wodowskazowych i opadowych w zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko.....	50
Rysunek nr 17	Model HEC-HMS zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko – wyniki kalibracji.....	51
Rysunek nr 18	Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 1.....	54
Rysunek nr 19	Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 2.....	55
Rysunek nr 20	Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 3.....	55
Rysunek nr 21	Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 4.....	56
Rysunek nr 22	Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 5.....	58
Rysunek nr 23	Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 6.....	58
Rysunek nr 24	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu lipiec 1997 r.	60
Rysunek nr 25	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu czerwiec 2031 r. scenariusz 1	60

Rysunek nr 26	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu lipiec 2029 r. scenariusz 2	61
Rysunek nr 27	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu sierpień 2049 r. scenariusz 3.....	61
Rysunek nr 28	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu czerwiec-lipiec 2029 r. scenariusz 4.....	62
Rysunek nr 29	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu lipiec-sierpień 2038 r. scenariusz 5	62
Rysunek nr 30	Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wod. Kłodzko - hydrogram przepływu czerwiec 2056 r. scenariusz 6	63

Wprowadzenie 1

1. Wprowadzenie

Zagadnieniami związanymi ze zmianami klimatu zajmuje się wiele grup badawczych. Obecny stan wiedzy na temat klimatu, przyczyn i prognozowanych skutków jego zmian opisuje i przedstawia w raportach Międzyrządowy Zespół do spraw Zmian Klimatu – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Zespół IPCC opracowuje raporty dotyczące zmian klimatu począwszy od 1990 r. Ostatni raport ukazał się w 2014 r. Raporty IPCC oraz Technical Papers stanowią źródło wiedzy o zmianach klimatu i ich wpływie na różne sektory [Bates i in. 2008]. Zmiany klimatu wg Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC) definiuje się jako zmiany stanu klimatu możliwe do zidentyfikowania (np. poprzez testy statystyczne) oraz zmiany znaczenia i/lub zmienności składowych klimatu utrzymujące się przez dłuższy czas (10 lat lub dłużej). Odnosi się to do każdej zmiany klimatu, niezależnie od tego, czy jest ona spowodowana czynnikami naturalnymi i naturalną zmiennością, czy też jest rezultatem działalności człowieka.

Przewidywania dotyczące zmian klimatu wykonuje się wykorzystując modele klimatu globalnego (tzw. GCM) oraz scenariusze emisji gazów cieplarnianych opisane w raportach IPCC, znane jako SRES (od IPCC Special Report on Emission Scenarios, 2000). Scenariusze SRES są zgrupowane w cztery rodziny: A1, A2, B1 i B2. Każdy z nich zakłada różne zmiany kilku podstawowych czynników wpływających na emisję gazów cieplarnianych, takich jak: wzrost liczby ludności, rozwój technologiczny i ekonomiczny, wiodące polityki i zużycie energii. Scenariusze SRES nie uwzględniają żadnych działań, które mogą zostać podjęte w celu zmiany dotychczasowej emisji; te elementy są uwzględnione w wariantach obliczeniowych związanych z daną rodziną scenariuszy bazowych. Leżące u ich podstaw założenia służą za dane wyjściowe do wielu oszacowań wpływu i skutków zmian klimatu. Scenariusze A1 zakładają raptowny wzrost gospodarczy, osiągnięcie szczytowej liczebności populacji globalnej w połowie XXI w. oraz niezwykle szybkie wprowadzanie nowych i bardziej efektywnych technologii. Rodzina A1 dzieli się na 3 grupy opisujące alternatywne kierunki zmian technologicznych: intensyfikację użycia paliw kopalnych (A1FI), źródła energii inne niż paliwa kopalne (A1T) oraz równowagę pomiędzy wykorzystaniem tych zasobów (A1B). Scenariusz B1 opisuje świat, w którym wzrost populacji przebiega tak samo, ale zmiany w strukturach ekonomicznych przebiegają szybciej. W scenariuszu B2 zakłada się średni wzrost wielkości populacji i średni wzrost ekonomiczny, z naciskiem na lokalne rozwiązania prowadzące do rozwoju trwałego i zrównoważonego w aspektach ekonomicznym, społecznym i środowiskowym. Scenariusz A2 przedstawia bardzo niejednorodny świat, z wysokim wzrostem populacji, wolnym wzrostem i rozwojem ekonomicznym i gospodarczym oraz wolnymi zmianami technologicznymi. Dla żadnego ze scenariuszy nie określono prawdopodobieństwa jego wystąpienia.

W ramach 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej został uruchomiony projekt ENSEMBLES, którego głównym celem było dostarczenie istotnych strategicznie informacji na temat klimatu i jego zmian oraz ich oddziaływania na społeczeństwo. W projekcie ENSEMBLES powstały w europejskich ośrodkach badawczych modele numeryczne generujące globalne (Global Climate Models-GCM) i regionalne (Regional Climate Models-RCM) scenariusze klimatyczne. Problemem staje się wybór scenariusza odpowiedniego dla danego regionu, gdyż baza dostępnych scenariuszy jest bardzo bogata. Podstawą wyboru jest ocena otrzymywanej informacji o klimacie w przyszłości na podstawie wiarygodności odtworzenia klimatu przeszłego (okres referencyjny). Przyjmuje się założenie, że rodzaj i wielkość błędów dla okresu referencyjnego są przenoszone przez modele na okres scenariuszowy. Należy podkreślić, że projekcje klimatyczne nie są prognozami klimatu, ale stanowią najlepsze obecnie dostępne, prawdopodobne i wewnętrznie spójne przybliżenie przyszłych warunków. Ważnym jest założenie, że nie istnieje model doskonały i nie ma jednego sprawdzonego scenariusza, konieczne jest analizowanie wiązki potencjalnych projekcji uzyskanych z różnych modeli regionalnych, sterowanych różnymi warunkami brzegowymi generowanymi przez modele ogólnej cyrkulacji.

Opracowane scenariusze zmian klimatu są podstawą dalszych analiz, w zakresie ich wpływu na system hydrologiczny. Zmiany warunków klimatycznych mają znaczenie w procesie formowania się odpływu, w szczególności w procesie generowania spływu powierzchniowego mającego wpływ na zagrożenie powodziowe [Bronstert 2004]. Jednak scenariusze zmian klimatu opracowane są w skali globalnej. Pierwotnie modele klimatyczne (GCM) były wykorzystywane do analizy systemów wielkoskalowych, tj. $500 \times 500 \text{ km}^2$ ($250\,000 \text{ km}^2$) [Hostetler, 1994]. Rozdzielczość przestrzenna analizy powodzi (zlewnie o powierzchni do $10\,000 \text{ km}^2$) wymaga innej skali, co poskutkowało opracowaniem technik przenoszenia informacji przestrzennej. Jednak stosowanie tych technik wiąże się z dużą niepewnością np. wiarygodnych informacji na temat opadów maksymalnych w zlewni. Również ocena zmian intensywności wezbrań wymaga analiz, które są prowadzone w znacznie mniejszych obszarach niż w skali globalnej lub kontynentalnej. Do takiej oceny konieczna jest analiza zmian warunków hydrometeorologicznych, a zwłaszcza opadów maksymalnych, w skali regionalnej czy lokalnej. Ponadto zmiany zagospodarowania terenu, a w szczególności urbanizacja i aktywizacja gospodarcza poprzez przekształcenie gruntów rolnych, nieużytków i lasów, a także zmiana gospodarki rolnej i leśnej, odwodnienia i zanikania mokradeł oraz terenów podmokłych mają znaczący wpływ na szacowanie odpływu ze zlewni. Ograniczenia zabudowy na terenach zalewowych są w wielu krajach uważane za jedno ze skuteczniejszych metod w ograniczaniu zagrożenia powodziowego. Wzrost istniejącego zagrożenia powodziowego może być zatem spowodowany dalszym zagospodarowywaniem terenów w sąsiedztwie rzek, wpływającym na warunki przepływu wód powodziowych oraz zwiększeniem uszczelnienia powierzchni zlewni, które przyczynia się do przyspieszenia odpływu wód opadowych i roztopowych do odbiornika. Czynnikiem generującym zjawisko na terenach zurbanizowanych może być również źle funkcjonujący system odprowadzania wód opadowych, jak również w przypadku terenów rolniczych i leśnych, zmiana struktury użytkowania gruntów z łąk i lasów na pola uprawne lub tereny pod zabudowę [Krausmann et al. 2003].

W ramach przygotowania planów zarządzania ryzykiem powodziowym przeprowadzono ocenę wpływu prognozowanych zmian klimatu na zagrożenie powodziowe, poprzez ocenę wpływu prognozowanych opadów na odpływ ze zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu w Kłodzku na podstawie wyników symulacji regionalnych, z różnych modeli globalnych. Wybór zlewni Nysy Kłodzkiej podyktowany był analizą obszaru Polski pod kątem powodziowości na podstawie oceny ryzyka powodziowego. Zlewnia rzeki Nysa Kłodzka do wodowskazu w Kłodzku ma charakter górski i podgórski. Zgodnie z raportem opracowania planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych „Raport z zakończenia realizacji zadań w zakresie identyfikacji obszarów szczególnie narażonych na niebezpieczeństwo powodzi i ryzyka powodziowego - Analiza rozkładu przestrzennego zagrożenia i ryzyka powodziowego oraz strat” (lipiec 2014) w obszarze Polski największe zagrożenie powodziowe występuje w obszarach południowych, w zlewniach o charakterze górskim i podgórskim. Stwierdzono zatem, że zlewnia Nysy Kłodzkiej może stanowić dobrą reprezentację obszarów, na których występuje największe zagrożenie powodziowe, a w konsekwencji również największe ryzyko powodziowe w Polsce. Ponadto prognozowane scenariusze zmian opadu dla stacji opadowych w zlewni Nysy Kłodzkiej są znaczne.

Zatem wybór zlewni Nysy Kłodzkiej podyktowany jest wcześniejszą analizą zarówno pod względem wielkości ryzyka powodziowego jak i prognozowanych zmian wielkości opadów.

W ramach przedkładanego opracowania przyjęte zostały następujące założenia:

1. zmiana odpływu ze zlewni będzie podstawą do oceny zmiany zagrożenia powodziowego w badanym obszarze,
2. zmiana odpływu określona zostanie na podstawie modelowania typu opad-odpływ,
3. modelowanie opad-odpływ wykonane zostanie za pomocą oprogramowania HEC-HMS, metodą SCS, ze względu na rodzaj i ilość wymaganych parametrów,
4. zmiana odpływu określona zostanie poprzez porównanie wyników symulacji historycznego zdarzenia opadowego (zdarzenie referencyjne) z podobnymi zdarzeniami z projekcji zmian

klimatu dla 6 scenariuszy - jako zdarzenie referencyjne wybrana została powódź z lipca 1997 r., jako największa z dotychczas zarejestrowanych na analizowanym obszarze,

5. projekcje zmian klimatu wykonane zostaną dla okresu 2011-2030 i 2050-2070 przy zastosowaniu scenariusza globalnych zmian emisji gazów cieplarnianych SRES A1B,
6. w modelu opad-odpływ nie zostaną uwzględnione przyszłe zmiany użytkowania obszaru zlewni, ze względu na brak tego rodzaju prognoz obejmujących horyzont czasowy pokrywający się z prognozami zmian klimatu, w reprezentacji przestrzennej na poziomie zlewni, możliwych do wykorzystania w modelowaniu.

Skutki zmian klimatu dla zasobów wodnych

2

2. Skutki zmian klimatu dla zasobów wodnych

Wielu badaczy skupia się na kwestii czy i w jakim stopniu potencjalne zmiany klimatu wpłyną na środowisko oraz jakie wymuszą procesy adaptacyjne dla przewidywanych zmian w zależności od scenariuszy [MacDonald, Sertoria 1991; Rozenzweig 1989; Solomon i in. 2007]. Zmiany klimatyczne są szczególnie odczuwalne w północnych szerokościach geograficznych, i te właśnie regiony oraz obszary górskie są szczególnie narażone na skutki zmian. W Europie na obszarach górskich obserwuje się i przewiduje się stałe zmniejszanie się lodowców, zmniejszenie się pokrywy śnieżnej, co wpływa zarówno na przyrodę, jak i na gospodarkę (m.in. turystykę). W Europie Północnej obserwuje się również wzrost ilości opadów (1900-2005), a także wzrost częstotliwości fal upałów i obfitych opadów deszczu. Tak sformułowane prognozy skłaniają do prowadzenia analiz na temat wpływu zmian klimatu na systemy hydrologiczne, tj. prognozowanie wielkości odpływu ze zlewni.

Ilość wody występującej w rzekach i jeziorach oraz zasilającej wody podziemne uwarunkowana jest w dużym stopniu przez atmosferyczną część cyklu hydrologicznego, czyli opad i parowanie. Zmiany wielkości i rozkładu opadów i parowania powodują zmiany odpływu.

Globalne mapy zmienności opadów, parowania, temperatury i odpływu opracowane [Raport IPCC] na podstawie modeli klimatycznych bazujących na scenariuszach emisji dwutlenku węgla do atmosfery obrazują, że na obszarach, na których opady deszczu i odpływ są bardzo niskie, nawet małe zmiany odpływu mogą prowadzić do dużych zmian procentowych. Ponadto dostępne badania sugerują, że znacznie zwiększą się częstość występowania i intensywność opadów w wielu regionach świata, w tym takich, w których średnia suma opadów wykazuje tendencję spadkową. Zwiększające się w ten sposób ryzyko powodziowe stawia ogromne wyzwania przed społecznościami użytkującymi dany region. Prawdopodobne jest, że nawet do 20% światowej populacji żyje na terenach, na których do 2080 r. znacznie zwiększy się ryzyko powodziowe. Na większości globu do końca XXI w. opady staną się silniejsze i częstsze. Zwiększy się zatem ryzyko, w tym także ryzyko powodzi błyskawicznych w miastach (ze względu na duży udział terenów nieprzepuszczalnych – zabudowy i ulic). Przyszłe szkody wywołane powodzią będą silnie uzależnione od schematu osadnictwa, sposobu użytkowania ziemi, jakości prognoz powodziowych, systemów ostrzegania i odpowiedzi oraz wartości infrastruktury i innych dóbr zlokalizowanych na obszarach zagrożonych, a także od zmian klimatu samych w sobie [Bates i in. 2008].

Tabela nr 1 Przykłady możliwego wpływu zmian klimatu na zasoby wodne oraz gospodarkę rolno-środowiskową i przemysłową w XXI wieku, w wyniku nawałnych opadów

Kierunek zmian	Zasoby wodne
Opady nawałne: większa częstotliwość na większości obszarów	<ul style="list-style-type: none"> niekorzystny wpływ na jakość wód powierzchniowych i podziemnych, zanieczyszczenie zasobów wodnych, możliwe zmniejszenie niedoboru wody
Częstsze i dłuższe okresy bezopadowe	<ul style="list-style-type: none"> znaczne niedobory wody na dużych obszarach

W: IPCC Technical Paper on Climate Change and Water, 2008.

Prognozowany wpływ zmian klimatu na występowanie powodzi w Europie przedstawia się następująco [Bates i in 2009]:

w latach 20 XXI w. nastąpi wzrost rocznego odpływu w północnej części Europy o 15% oraz spadek na południu kontynentu o 23%, nastąpi zmniejszenie się przepływów letnich czego skutkiem będzie wzrost zagrożenia powodzią zimowymi w Europie Północnej i powodzią po opadach nawałnych na całym kontynencie oraz przesunięcie zagrożenia powodzią wywołanymi topnieniem śniegu z wiosny na zimę;

w latach 70.XXI w. prognozuje się wzrost rocznego odpływu na północy o 30% oraz spadek na południu o 36%, zmniejszenie się przepływów letnich nawet o 80%, czego skutkiem będzie zwiększone zagrożenie suszami w zachodniej i południowej części Europy.

Badacze wnioskują również, że występujące obecnie susze określane mianem „suszy stulecia”, powtarzać się będą częściej niż co 10 lat (szczególnie w niektórych regionach Hiszpanii i Portugalii, zachodniej Francji, zlewni Wisły w Polsce), natomiast powodzie określane dziś mianem „powodzi stulecia” będą się zdarzać co kilka lat w północnej i północno-wschodniej Europie (szczególnie w Szwecji, Finlandii), w Europie Środkowo-Wschodniej (Polska, zlewnie rzek alpejskich) oraz w atlantyckiej części południowej Europy (część Hiszpanii, Portugalii) [Lehner i in. 2005]. Zmiany hydrologiczne mogą nieść skutki, które w niektórych aspektach będą miały charakter pozytywny, a w innych negatywny. Przykładem mogą być skutki zwiększonego rocznego odpływu rzeczno-geologicznego dla niektórych użytkowników wód dzięki zwiększeniu ilości odnawialnych zasobów wody, ale jednocześnie negatywne, ze względu na zwiększone szkody powodziowe.

W ostatnich latach do oceny skutków zmian klimatu i zagospodarowania przestrzennego na odpływ wykorzystuje się modele typu opad-odpływ [Bronstert et al. 2002; Niehoff et al. 2003]. Badacze koncentrują się głównie na ocenie odpływu dla prognozowanych zmienionych warunków meteorologicznych, jako warunków brzegowych. Stosunkowo niewiele literatury badawczej traktuje o prognozowanych zmianach zasobów wodnych, będących skutkiem zmian klimatu, dla obszaru Polski.

Badania Kundzewicza [2001a, b, c, 2002, 2008], w większości zawierają szczegółowe interpretacje danych uzyskanych dla całego kontynentu europejskiego, uzupełnione o lokalne informacje związane z detekcją istniejących zmian przebiegu zjawisk meteorologicznych lub hydrologicznych.

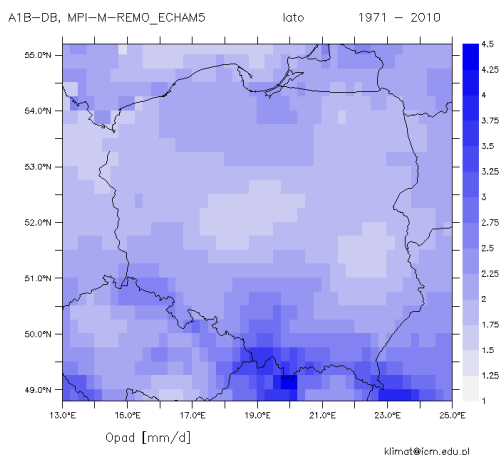
Instytut Ochrony Środowiska-Państwowy Instytut Badawczy w latach 2011-2013 realizował projekt „Opracowanie i wdrożenie strategicznego planu adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu” o akronimie KLIMADA. Podstawę strategii adaptacyjnej stanowiły m.in. ocena oczekiwanych zmian klimatu w Polsce, a także ocena wpływu zmian klimatu oraz wrażliwości społeczeństwa i gospodarki na te zmiany. Wyniki analizy scenariuszy klimatycznych w projekcie KLIMADA wykazują, że temperatura ma wyraźną tendencję wzrostową na obszarze całego kraju. Większe ocieplenie jest spodziewane pod koniec stulecia, a przyrosty temperatury są zróżnicowane regionalnie i sezonowo. Wzrost temperatury jest prawidłowo odzwierciedlony w przebiegu wszystkich wskaźników klimatycznych opartych na tej zmiennej, np. wyraźna jest tendencja wydłużenia termicznego okresu wegetacyjnego, zauważa się jego wcześniejszy początek, maleje liczba dni z temperaturą minimalną mniejszą od 0°C, rośnie liczba dni z temperaturą maksymalną wyższą od 25°C, a przebiegi indeksów są uwarunkowane regionalnie. W przypadku opadu tendencje są mniej wyraźne. Symulacje wskazują na pewne zwiększenie opadów zimowych, dochodzące do około 15% w części północnej kraju w latach 2021–2050 i do ponad 20% w części wschodniej w latach 2071–2100. W lecie oczekiwane jest zmniejszenie opadu pod koniec stulecia, największe na południowym wschodzie. Opady wiosenne w pierwszym okresie nieznacznie maleją w zachodniej części kraju, natomiast w drugim okresie zauważalny jest ich około 10% wzrost w całej Polsce. Dla jesieni tendencje są najslabsze, jedynie można spodziewać się niewielkiego spadku w północnych regionach kraju. Charakterystyki opadowe wykazują wydłużenie okresów bezopadowych, wzrost sumy opadów maksymalnych oraz skrócenie okresu zalegania pokrywy śnieżnej. Zmiany klimatu spowodują znaczne zmiany w zakresie jakości i dostępności zasobów wodnych, wpływając na szereg sektorów, w tym na produkcję żywności, w której woda odgrywa zasadniczą rolę. Plony na ponad 80% powierzchni gruntów rolnych są uzależnione od ilości i rozkładu opadów. Produkcja żywności również zależy od dostępności zasobów wodnych w celu nawadniania. Ograniczona dostępność wody już teraz stanowi problem w wielu regionach Europy i sytuacja ta prawdopodobnie ulegnie dalszemu pogorszeniu. Do 2070 roku spodziewany jest w Europie wzrost powierzchni obszarów ubogich w wodę z 1% w chwili obecnej do 35%.

Badania prowadzone dla wybranych zlewni położonych w różnych częściach kraju na podstawie modeli hydrologicznych połączonych z danymi meteorologicznymi pochodzącymi z modeli GCM zakładających wzrost CO₂ wykazują, że znaczna intensyfikacja opadów nawaalnych może prowadzić do lokalnych wezbrań w lecie, natomiast dłuższe okresy bezopadowe i znaczny deficyt wody oraz wyższe parowanie będą sprzyjać długotrwałym niżówkom rzek górskich i nizinnych [Gutry-Korycka, Rotnicka 1998, Mućka 2000].

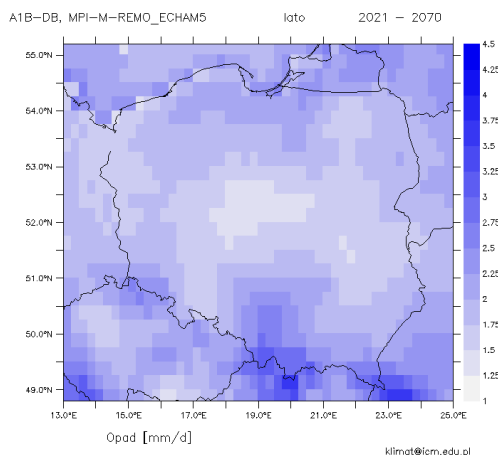
Inny zespół badaczy [Kuchar i in, 2012] dokonał oceny odpływu ze zlewni Kaczawy dla założonych scenariuszy zmian klimatu. Badacze stwierdzili, że w wyniku zakładanych przez analizowane scenariusze zmian klimatu nastąpi wzrost prawdopodobieństwa ekstremalnych wartości odpływów. W dalszym horyzoncie czasowym wraz ze wzrostem temperatury i zmniejszeniem opadów należy spodziewać się zmniejszenia wartości średniej odpływów. Zwiększenie wartości średniej odpływu, a jednocześnie brak zmian lub zmniejszenie wartości średniej opadu może być spowodowane wzrostem parowania potencjalnego, które zwiększa się wraz z temperaturą, i ma wpływ na bilans wodny tylko wówczas, gdy nie występuje opad. Jednocześnie w warunkach opadów o mniejszej intensywności zwiększa się stosunek infiltracji w stosunku do odpływu powierzchniowego.

Badania prowadzone w Instytucie Geofizyki PAN [Liszewska, Osuch 1999] przedstawiają głównie symulacje otrzymanych (interpretowanych) dla Polski według podstawowych rozważanych scenariuszy klimatycznych. Wyniki oszacowanych wielkości i kierunków zmian zasobów wód powierzchniowych Polski uzyskane z modelu hydrologicznego dla poszczególnych scenariuszy klimatycznych są różne, ale wszystkie modele GCM wskazują na zwiększone prawdopodobieństwo częstszego występowania i pogłębiania suszy hydrologicznej w okresie letnim. Ponadto stwierdzono, że do roku 2050 średnia temperatura może być wyższa od obecnej o 1,7–3,6°C, przy stosunkowo niewielkich zmianach opadów. Największe zagrożenia brakiem opadów pojawią się na wschodzie kraju, potem na zachodzie i południu i w końcu na północy. Za ok. 20 lat można oczekiwać pogłębiających się susz, często trwających wiele miesięcy, na Podlasiu, Lubelszczyźnie i w północnej Małopolsce, a następnie na Ziemi Lubuskiej. Przykładowe mapy rozkładu opadu dla Polski, dla wybranych modeli globalnych MPI-M-REMO_ECHAM5 oraz dla scenariusza A1B dla dwóch modeli globalnych, dla dwóch okresów: referencyjnego (1971-2010) oraz dla horyzontu czasowego 2021-2070, przedstawiono na rysunkach 1-4 (http://klimat.icm.edu.pl/serv_climate.php).

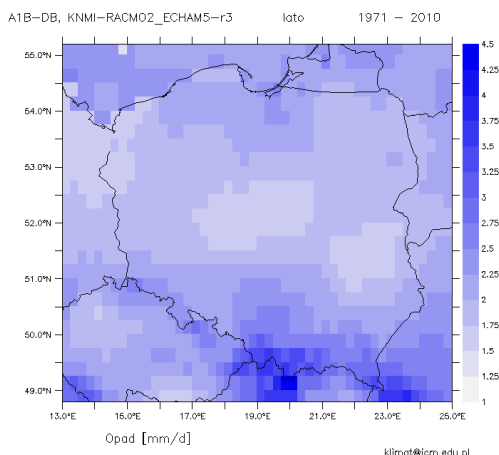
Rysunek nr 1 Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 1971-2010, w mm/dobę, dla wybranego modelu MPI-M-REMO_ECHAM5



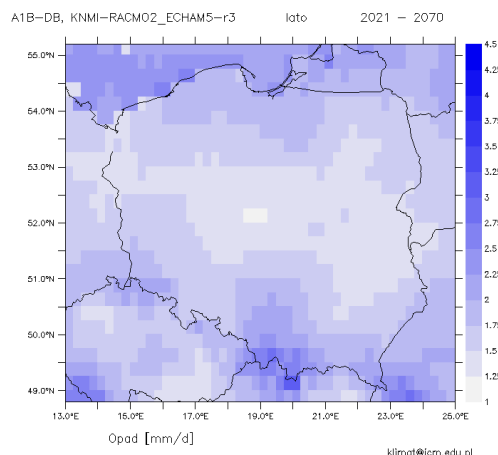
Rysunek nr 2 Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 2011-2070, w mm/dobę, dla wybranego modelu MPI-M-REMO_ECHAM5



Rysunek nr 3 Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 1971-2010, w mm/dobę, dla wybranego modelu KNMI-RECMO2_ECHAM5-r3



Rysunek nr 4 Mapa rozkładu przestrzennego w Polsce średniego opadu w sezonie letnim (VI-VIII) w wieloleciu 2011-2070, w mm/dobę, dla wybranego modelu KNMI-RECMO2_ECHAM5-r3



Badania prowadzone przez zespół IMGW PIB (WBS 1252_Raport i diagnoza problemów zarządzania ryzykiem powodziowym) w ramach projektu pn. „Opracowanie planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych” prowadzone były w kontekście wpływu zmian klimatu na ryzyko powodziowe. Przeprowadzono analizy rozkładów przestrzennych i czasowych temperatury i opadów zarówno dla okresu współczesnego, jak i w odniesieniu do prognozowanych zmian klimatu. Ocenię przeprowadzono na podstawie wyników 8 symulacji

regionalnych z warunkami brzegowymi z 4 różnych modeli globalnych (ARPEGE-model francuski, ECHAM5-model niemiecki, BCM—model norweski i HadCM3Q0), po dwie różne symulacje regionalne dla każdego modelu globalnego. Symulacje te, opracowane w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego, różnią się między sobą dając nieco inny obraz przyszłych zmian. Wiązka została skonstruowana w oparciu o symulacje regionalne udostępnione w projekcie EU ENSEMBLES21, wykorzystano również dane obserwacyjne w siatce regularnej E-OBS. Projekcje dla okresów 2011-2030 i 2050-2070 zostały wykonane przy zastosowaniu scenariusza globalnych zmian emisji gazów cieplarnianych opracowanego przez IPCC SRES A1B, który zakłada gwałtowny rozwój ekonomiczny świata, osiągnięcie maksimum populacji w połowie stulecia oraz uwzględnia zrównoważone wykorzystywanie różnych źródeł energii. Symulacje przeprowadzone dla scenariusza emisji A1B odzwierciedlają obraz średnich zmian w stosunku do scenariuszy skrajnych A2 i B1. Ze względu na politykę adaptacji do nadchodzących zmian klimatu nie jest zalecane wykorzystywanie zbyt radykalnych scenariuszy, a raczej opieranie się na scenariuszu umiarkowanym, co uzasadnia wybór scenariusza emisji A1B.

Opracowane scenariusze klimatyczne umożliwiają określenie zmian elementów klimatu Polski z rozdzielczością przestrzenną około 25x25 km. Wykonano ocenę zmian temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na obszarze Polski w okresach od 2001-2020 do 2071-2090 w stosunku do lat 1971-2000 w różnych skalach czasowych, a także wykazano zróżnicowanie przestrzenne tych zmian. Symulowany klimat jest bardziej wygładzony niż rzeczywisty, przejawia się przeszacowaniem minimów (wartości minimalne z symulacji są wyższe od obserwowanych) i niedoszacowaniem maksimów (wartości maksymalne z symulacji są niższe od obserwowanych). Z tego powodu preferowana jest analiza nie konkretnych wartości poszczególnych elementów klimatu, lecz ich rozkłady, a dokładnie wartości wybranych percentyli. Do analizy zmian temperatury i opadów zastosowano metodę percentyli 10. i 90. Percentyl 10. wskazuje wartości badanych elementów, poniżej których występuje 10% wszystkich wartości w danym okresie, natomiast percentyl 90. odcina 10% największych wartości temperatury. Analizie poddane zostały różnice pomiędzy wyliczonymi wartościami percentyli najlepiej przybliżonych przyszłych warunków i z symulacji referencyjnej.

Badania dowodzą, że sumy roczne opadów nie wykazują żadnego wyraźnego trendu zmian do roku 2030. Należy się jednak liczyć ze wzrastającą częstością występowania opadów nawalnych w dwóch najbliższych dekadach (wywołujące podtopienia i lokalne powodzie błyskawiczne). Rozkład przestrzenny względnych zmian opadu wskazuje na zwiększenie opadu zimowego dochodzące do około 15% w części północnej kraju, w latach 2021 – 2050 i do ponad 20% w części wschodniej w latach 2071 – 2100. W lecie oczekiwane jest zmniejszenie opadu pod koniec stulecia, największe na południowym wschodzie. Opady wiosenne w pierwszym okresie nieznacznie maleją w zachodniej części kraju, natomiast w drugim okresie zauważalny jest ich wzrost o około 10% w całej Polsce. Dla jesieni tendencje są najslabsze, można spodziewać się niewielkiego spadku w północnych regionach kraju.

Scenariusze zmian klimatu dla zlewni Nysy Kłodzkiej

3

3. Scenariusze zmian klimatu dla zlewni Nysy Kłodzkiej

Scenariusze zmian klimatu dla zlewni Nysy Kłodzkiej dla XXI wieku opracowane zostały przez zespół IMGW-PIB z zastosowaniem hydrodynamicznych modeli systemu klimatycznego, atmosfery i oceanu UE ENSEMBLES. Modele te dostarczają trójwymiarowego opisu w czasie zmiennych klimatycznych. Wyniki obarczone są niepewnościami wynikającymi z wielu założeń wstępnych, między innymi rozwoju ekonomicznego i demograficznego świata czyli scenariuszy emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń do atmosfery. Na potrzeby niniejszego opracowania wykorzystano wyniki 6 symulacji regionalnych z warunkami brzegowymi z 3 różnych modeli globalnych (ARPEGE-model francuski, ECHAM5-model niemiecki, BCM—model norweski). Symulacje zostały opracowane w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego. Wiązka została skonstruowana w oparciu o symulacje regionalne udostępnione w projekcie EU ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk.>), wykorzystano również dane obserwacyjne w siatce regularnej E-OBS (<http://eca.knmi.nl/>). Projekcje dla okresów 2011-2030 i 2050-2070 zostały wykonane przy zastosowaniu scenariusza globalnych zmian emisji gazów cieplarnianych SRES A1B. Symulacje różnią się między sobą, dają nieco inny obraz przyszłych zmian.

Tabela nr 2 **Scenariusze wykorzystane do obliczenia projekcji klimatu dla zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko**

L.p.	Model regionalny	Model globalny
1	DMI-HIRHAM5	ARPEGE
2	DMI-HIRHAM5	BCM
3	KNMI-RACMO2	ECHAM5
4	MPI-M-REMO	ECHAM5
5	RM5.1	ARPEGE
6	SMHIRCA	BCM

Na podstawie scenariuszy zmian klimatu opracowane zostały prognozowane dobowe wartości sum opadu dla zlewni Nysy Kłodzkiej do stacji wodowskazowej w Kłodzku dla 14 stacji opadowych: Kłodzko, Łądek Zdrój, Słozów, Niemojów, Międzyziesie, Międzygórze, Stronie Śląskie, Nowy Gierałtów, Chocieszów, Pasterka, Bardo, Bystrzyca Kłodzka, Polanica Zdrój, Bielice. Spośród 22 stacji opadowych zlokalizowanych na obszarze analizowanej zlewni, tylko 14 wybranych stacji posiadało odpowiednio długie ciągi obserwacyjne, pozwalające na uwzględnienie ich w symulacjach zmian klimatu.

Jako metodę oceny jakości modeli przyjmuje się zdolność odtworzenia przez nie klimatu przeszłego. Zakłada się, że rodzaj i wielkość błędów dla okresu referencyjnego są przenoszone przez modele na okres scenariuszowy. W celu oceny jakości prognozowanych opadów, dla stacji opadowych w zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko poddano analizie obserwowane oraz uzyskane w wyniku modelowania klimatycznego maksymalne sumy dobowe opadu dla okresu referencyjnego 1971-2010, jak również częstość sumy dobowej opadów w klasach 70-100 mm oraz >100 mm, określanymi jako opady powodziowe i katastrofalne [Ostojski, Maciejewski, Tokarczyk red. 2011].

Dla 6 z 14 analizowanych stacji symulowana maksymalna suma dobowa opadu w okresie referencyjnym różni się o ponad 10% od wartości obserwowanej. Zauważyć można znaczne

przeszacowanie wartości dla stacji w Słoszowie – wartości symulowane są średnio o 75% wyższe od obserwowanej. Dla stacji o maksymalnej sumie dobowej powyżej 100 mm (poza stacją w Bielicach) obserwuje się natomiast niedoszacowanie wartości, średnio od -3 do -22%. Przeszacowanie minimów i niedoszacowanie maksimów widoczne jest również w liczebności sum dobowych opadów w badanych klasach – obserwuje się znaczący wzrost częstości opadów w poszczególnych klasach dla stacji w Słoszowie, jednocześnie spadek częstości dla ponad połowy stacji w klasie 70-100 mm. W klasie opadów katastrofalnych >100 mm dla większości stacji nie obserwuje się zmian częstości, poza stacjami Łądek Zdrój i Stronie Śląskie (zmniejszenie) oraz Słoszów, Nowy Gierałtów i Bielice – zwiększenie liczebności wystąpień.

Symulowany klimat jest bardziej wygładzony niż rzeczywisty, przejawia się przeszacowaniem minimów (wartości minimalne z symulacji są wyższe od obserwowanych) i niedoszacowaniem maksimów (wartości maksymalne z symulacji są niższe od obserwowanych), co ma zasadniczy wpływ na wielkość odpływu ze zlewni wyznaczonego na podstawie projekcji zmian klimatu.

Tabela nr 3 Maksymalna suma dobowego opadu w wieloleciu referencyjnym 1971-2010 na podstawie obserwacji oraz scenariuszy klimatycznych [mm]

Stacja opadowa	Obserwowane wielolecie 1971-2010	wielolecie 1971-2010 – scenariusze klimatyczne						Średnia ze scenariuszy	Różnica wysokości opadu (scenariusz – wielolecie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	95,6	79.1	81.1	81.7	79.6	82.6	76.8	80.2	-15.5	-16
Łądek Zdrój	159,4	159.6	144.5	166.1	164.7	155.5	134.7	154.2	-5.2	-3
Słoszów	79,9	124.5	147.3	156.3	141.6	155.3	115.5	140.1	60.2	75
Niemojów	95,9	95.7	83.6	87.5	91.5	88.2	73.4	86.7	-9.3	-10
Międzylesie	78,6	73.3	75.9	77.5	71.9	85.9	66.4	75.2	-3.5	-4
Międzygórze	200,1	146.7	155.6	124.7	184.4	171.8	163.9	157.9	-42.3	-21
Stronie Śląskie	159,7	167.2	148.5	171.4	168.8	165.5	144.7	161	1.3	1
Nowy Gierałtów	124,0	122	95.6	119.9	123.3	133.1	96.9	115.1	-8.9	-7
Chocieszów	148,6	119.5	84.6	141.1	114.2	148.2	84.6	115.4	-33.2	-22
Pasterka	85,1	82.8	81.9	84.6	88.2	81.4	78.5	82.9	-2.2	-3
Bardo	90,2	94.8	95.1	94.6	93.9	93.3	87.6	93.2	3	3
Bystrzyca Kł.	95,1	94.3	93.5	73.6	81.8	113.1	88.6	90.8	-4.3	-5
Polanica	137,6	114.7	123.6	132.3	112.6	139.3	96.4	119.8	-17.8	-13
Bielice	157,3	153.7	152.9	154.8	158.6	163.5	158.2	157	-0.3	0

Tabela nr 4 Liczebność sumy dobowego opadu w klasie 70-100 mm (opad powodziowy) dla wielolecia 1971-2010 na podstawie obserwacji oraz scenariuszy klimatycznych

Stacja opadowa	Obserwowane wielolecie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wielolecie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	4	1	3	3	3	2	3	3	-1	-25
Łądek Zdrój	6	5	6	4	2	7	4	5	-1	-17
Słoszów	1	5	3	3	4	1	2	3	2	200
Niemojów	3	5	4	3	2	5	3	4	1	33
Międzylesie	1	3	1	1	1	3	0	2	1	100
Międzygórze	8	5	3	5	5	6	5	5	-3	-38

Stacja opadowa	Obserwowane wieloletnie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wieloletnie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Stronie Śląskie	8	5	6	3	6	5	1	4	-4	-50
Nowy Gierałtów	12	10	15	8	11	12	10	11	-1	-8
Chocieszów	5	5	4	4	2	3	3	4	-1	-20
Pasterka	3	4	1	3	3	2	3	3	0	0
Bardo	6	8	2	4	5	2	3	4	-2	-33
Bystrzyca Kł.	4	4	3	1	3	4	4	3	-1	-25
Polanica	3	4	2	3	4	2	2	3	0	0
Bielice	10	19	15	17	9	8	10	13	3	30

Tabela nr 5 Liczebność sumy dobowej opadu w klasie >100 mm (opad katastrofalny) na podstawie obserwacji oraz scenariuszy klimatycznych

Stacja opadowa	Obserwowane wieloletnie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wieloletnie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lądek Zdrój	2	1	3	1	2	5	3	3	1	25
Słozów	0	2	2	1	1	2	1	2	2	0
Niemojów	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Międzylesie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Międzygórze	4	1	7	2	3	7	2	4	0	0
Stronie Śląskie	2	2	2	2	3	6	3	3	1	50
Nowy Gierałtów	3	1	0	1	1	2	0	1	-2	-67
Chocieszów	1	1	0	1	1	2	0	1	0	0
Pasterka	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bardo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bystrzyca Kł.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Polanica	1	1	2	1	1	2	0	1	0	0
Bielice	10	3	7	2	6	7	4	5	-5	-50

3.1. Charakterystyka prognozowanych opadów

Średnia roczna suma opadów dla wiązki 6 projekcji potencjalnych zmian klimatu w stosunku do średniej rocznej sumy opadów z okresu referencyjnego 1971-2010 w zlewni Nisy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko charakteryzuje się niewielkim wzrostem. W zależności od stacji prognozowane jest zwiększenie średniej rocznej sumy opadów od 1 do 7%.

W kontekście zagrożenia powodziowego istotne znaczenie mają opady dobowe o wysokości 30 mm i wyższe, klasyfikowane jako bardzo silne, które mogą powodować lokalne wezbrania rzek lub podtopienia. Progiem opadowym, z punktu widzenia zagrożenia powodziowego, jest opad, którego suma dobowa przekracza 50 mm, często określane jako opad groźny. Duże zagrożenie powodziowe

stanowią opady o sumie dobowej przekraczającej 70 mm, nazywane również opadem powodziowym. Opady powyżej 100 mm uznawane są za katastrofalne [Ostojski, Maciejewski, Tokarczyk red. 2011].

Tabela nr 6 Średnia suma opadów (rok, półrocze letnie i półrocze zimowe) w wieloleciu 1971-2010 oraz 2021-2070

Stacja opadowa	Położenie. Stacji [m n.p.m.]	Obserwowane wielolecie 1971 – 2010			Prognozowane wielolecie 2021 – 2070			Różnica w %	
		średnia roczna suma opadów [mm]	suma półrocze letnie [mm]	suma półrocze zimowe [mm]	średnia roczna suma opadów [mm]	suma półrocze letnie [mm]	suma półrocze zimowe [mm]	średnia roczna suma opadów 2021-2070 1971-2010	średnia suma dla półrocza letniego opadów 2021-2070 1971-2010
Kłodzko	356	587	412	175	621	440	181	6	7
Lądek Zdrój	460	862	560	302	891	586	305	3	5
Słoszów	555	840	503	337	892	527	365	6	5
Niemojów	570	927	489	438	988	519	469	7	6
Międzylesie	450	866	482	384	916	512	404	6	6
Międzygórze	585	1023	632	391	1071	660	411	5	4
Stronie Śląskie	530	898	584	314	921	601	320	3	3
Nowy Gieraltów	635	972	625	347	984	642	342	1	3
Chocieszów	405	694	439	255	738	468	270	6	7
Pasterka	700	878	542	336	894	542	352	2	0
Bardo	320	673	452	221	703	481	222	4	6
Bystrzyca Kł.	365	713	439	274	762	473	289	7	8
Polanica	390	708	441	267	756	473	283	7	7
Bielice	395	1074	674	400	1091	694	397	2	3

Analizę opadów pod kątem zagrożenia powodziowego przeprowadzono dla wartości sumy dobowej opadów dla półrocza letniego w podziale na klasy:

- 1 klasa: 30-50 mm,
- 2 klasa: 50-70 mm,
- 3 klasa: 70-100 mm,
- 4 klasa: >100 mm,

dla okresu referencyjnego 1971-2010 na podstawie obserwacji, dla scenariuszy zmian klimatycznych dla wielolecia 2031-2070 na podstawie wartości prognozowanych.

Liczebność wystąpień w poszczególnych klasach oraz maksymalną obserwowaną i prognozowaną wartość sumy dobowej opadów przedstawiono w tabelach 7-10.

Tabela nr 7 Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 30-50 mm (opad bardzo silny)

Stacja opadowa	Obserwowane wieloletnie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wieloletnie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	39	62	48	48	43	34	41	46	7	18
Lądek Zdrój	75	80	91	100	76	93	82	87	12	16
Słoszów	44	80	49	60	60	41	59	58	14	32
Niemojów	53	66	64	45	52	57	55	57	4	8
Międzylesie	61	75	78	61	59	62	55	65	4	7
Międzygórze	102	89	128	107	101	110	98	106	4	4
Stronie Śląskie	85	76	86	94	77	91	86	85	0	0
Nowy Gierałtów	97	82	113	117	90	93	96	99	2	2
Chocieszów	60	70	60	60	53	47	59	58	-2	-3
Pasterka	77	71	83	84	68	69	63	73	-4	-5
Bardo	50	65	41	60	50	41	53	52	2	4
Bystrzyca Kł.	56	63	68	53	53	52	50	57	1	2
Polanica	57	75	61	68	56	39	57	59	2	4
Bielice	109	79	105	108	88	111	110	100	-9	-8

Tabela nr 8 Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 50-70 mm (opad groźny)

Stacja opadowa	Obserwowane wieloletnie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wieloletnie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	7	10	19	16	8	11	23	15	8	114
Lądek Zdrój	14	26	24	15	10	24	19	20	6	43
Słoszów	10	15	15	24	8	20	10	15	5	50
Niemojów	9	12	10	8	4	10	9	9	0	0
Międzylesie	6	11	11	10	11	14	14	12	6	100
Międzygórze	16	32	34	21	14	16	22	23	7	44
Stronie Śląskie	18	39	29	21	13	21	25	25	7	39
Nowy Gierałtów	33	42	43	23	19	43	30	33	0	0
Chocieszów	7	17	14	13	7	9	10	12	5	71
Pasterka	10	12	9	17	5	12	15	12	2	20
Bardo	18	19	32	24	11	22	15	21	3	17
Bystrzyca Kł.	13	21	20	21	11	15	21	18	5	38
Polanica	12	16	18	25	7	20	22	18	6	50
Bielice	33	48	37	22	26	35	32	33	0	0

Tabela nr 9 Liczebność sumy dobowej opadu w klasie 70-100 mm (opad powodziowy)

Stacja opadowa	Obserwowane wieloletnie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wieloletnie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	4	9	3	3	1	12	7	6	2	50
Lądek Zdrój	6	9	11	8	8	9	8	9	3	50
Słoszów	1	8	3	3	4	8	11	6	5	500
Niemojów	3	5	3	7	2	9	7	6	3	100
Międzylesie	1	2	4	1	0	6	2	3	2	200
Międzygórze	8	12	12	8	10	11	15	11	3	38
Stronie Śląskie	8	6	13	4	8	8	8	8	0	0
Nowy Gierałtów	12	11	19	9	13	11	15	13	1	8
Chocieszów	5	11	5	5	2	12	8	7	2	40
Pasterka	3	10	7	3	4	7	10	7	4	133
Bardo	6	9	5	3	3	9	10	7	1	17
Bystrzyca Kł.	4	8	8	2	3	10	3	6	2	50
Polanica	3	8	4	4	3	11	7	6	3	100
Bielice	10	12	20	11	15	10	18	14	4	40

Tabela nr 10 Liczebność sumy dobowej opadu w klasie >100 mm (opad katastrofalny)

Stacja opadowa	Obserwowane wieloletnie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica liczebności (scenariusz – wieloletnie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	0	0	1	0	1	0	1	1	1	+
Lądek Zdrój	2	1	4	0	0	6	0	2	0	0
Słoszów	0	0	2	0	1	3	1	1	1	+
Niemojów	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Międzylesie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Międzygórze	4	1	4	0	0	8	1	2	-2	-50
Stronie Śląskie	2	1	3	0	0	6	0	2	0	0
Nowy Gierałtów	3	3	2	1	0	2	1	2	-1	-33
Chocieszów	1	0	2	0	0	3	1	1	0	0
Pasterka	0	0	0	0	1	1	1	1	1	+
Bardo	0	3	0	0	1	0	0	1	1	+
Bystrzyca Kł.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	+
Polanica	1	0	1	0	0	3	0	1	0	0
Bielice	10	4	12	4	2	9	5	6	-4	-40

Dla większości analizowanych stacji opadowych prognozowany jest wzrost częstotliwości pojawiania się opadów powodziowych średnio od 8 do 500%, największy dla stacji Słoszów. Najmniejszym wzrostem

liczebności opadów o sumie dobowej 70-100 mm charakteryzują się stacje Stronie Śląskie, Nowy Gierałtów, Bardo, Międzygórze, Chocieszów i Bielice (<50%). Jednocześnie, poza Bardem, są to stacje, dla których według większości scenariuszy klimatycznych prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej sumy dobowej opadu – w przypadku Międzygórze nawet o około 34%. W odniesieniu do opadów katastrofalnych dla 5 stacji prognozowane jest zwiększenie częstości występowania, przy czym należy podkreślić, iż są to stacje, dla których w okresie referencyjnym opady >100 mm nigdy nie wystąpiły. Jednocześnie dla stacji o dotychczasowo największej częstości pojawiania się opadów katastrofalnych (Bielice, Międzygórze, Nowy Gierałtów) przewidywany jest znaczny spadek liczebności sum dobowych opadu w tej klasie.

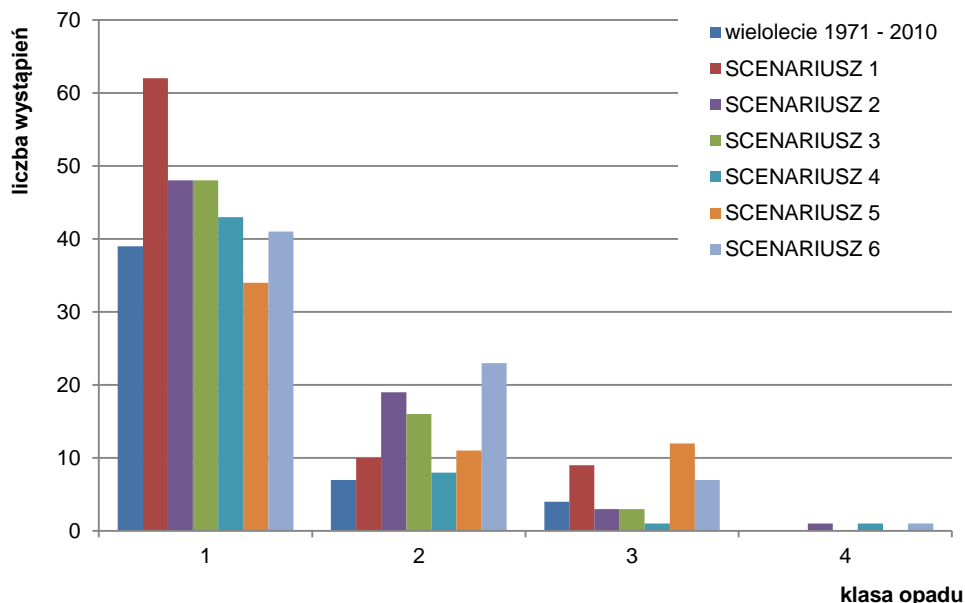
Tabela nr 11 **Maksymalna suma dobowa opadu w wieloleciu referencyjnym 1971-2010 oraz w wieloleciu 2031-2070 wg scenariuszy klimatycznych [mm]**

Stacja opadowa	Obserwowane wielolecie 1971-2010	Scenariusz						Średnia ze scenariuszy	Różnica wysokości opadu (scenariusz – wielolecie)	
		1	2	3	4	5	6		-	%
Kłodzko	95,6	95.8	116.3	89.5	122.8	88.6	114.8	104.6	9	9
Lądek Zdrój	159,4*	115,6	176.4	98.1	93.9	149.9	97.1	123.1	-36.3	-23
Słozów	79,9	87,1	167.6	77.3	117.1	152.6	121.3	127.2	47.3	59
Niemojów	95,9	125.2	88.8	92.4	72.5	96.7	112.6	98	2.1	2
Międzylesie	78,6*	76,1	96.7	71.2	66.7	92.9	96.5	84.8	6.2	8
Międzygórze	200,1*	133,0	171.3	94.8	89.3	174.6	131.5	132.3	-67.8	-34
Stronie Śląskie	159,7*	112,5	179.1	92.9	84.4	162.9	99.8	123.8	-35.9	-22
Nowy Gierałtów	124,0	123,9	142.2	116.3	97.7	131.3	118.2	121.1	-2.9	-2
Chocieszów	148,6	97,7	161.5	99.3	85.4	139.8	122.5	121.7	-26.9	-18
Pasterka	85,1	97,4	93.7	87.5	131.6	116.3	117.2	109.3	24.2	28
Bardo	90,2	123.7	87.1	89.6	116.7	94.5	99.8	101.9	11.7	13
Bystrzyca Kł.	95,1*	91,0	118.6	76.7	82.4	98.2	82.2	91.6	-3.5	-4
Polanica	137,6	92,9	152.2	81.8	83.7	131.1	89.7	107.7	-29.9	-22
Bielice	157,3	137,7	147.6	129.9	151.6	163.7	184.2	155.4	-1.9	-1

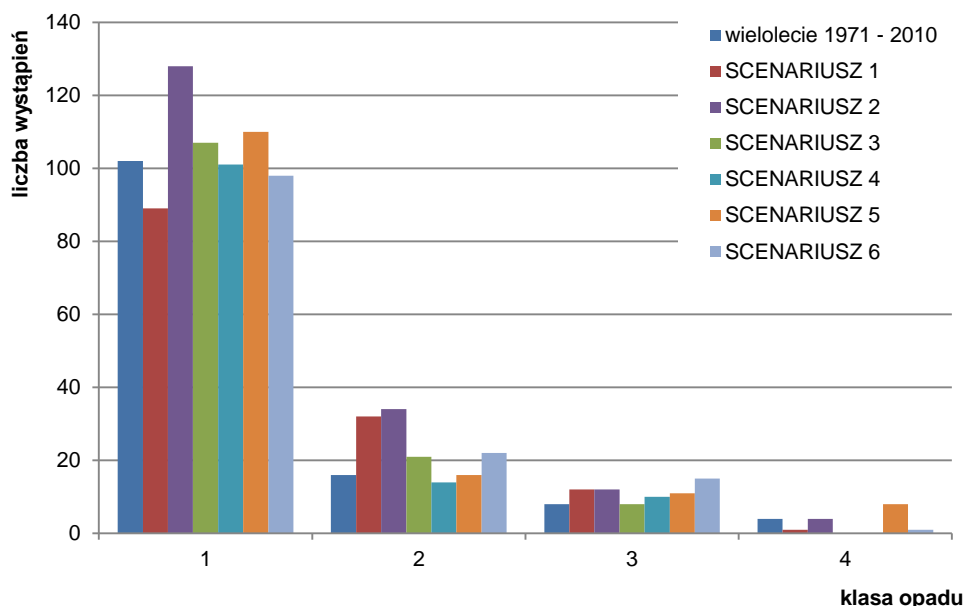
*- maksymalna suma dobową opadu z 1997 r.

Na przeważającej liczbie stacji prognozowany jest spadek maksymalnej sumy dobowej od -1 do -34%. Są to głównie stacje o obserwowanej w wieloleciu 1971-2010 maksymalnej sumie dobowej opadu powyżej 100 mm. Dla pozostałych stacji prognozowany jest wzrost wartości maksymalnej sumy dobowej opadu w wieloleciu 2031-2070 od 2% dla stacji w Niemojowie do 59% dla stacji w Słozowie.

Rysunek nr 5 Liczebność sumy dobowej opadu dla stacji Kłodzko dla wielolecia 1971-2010 oraz dla wielolecia 2031-2070 wg projekcji zmian klimatu w klasach: (1) 30-50 mm, (2) 50-70 mm, (3) 70-100 mm, (4) >100- mm



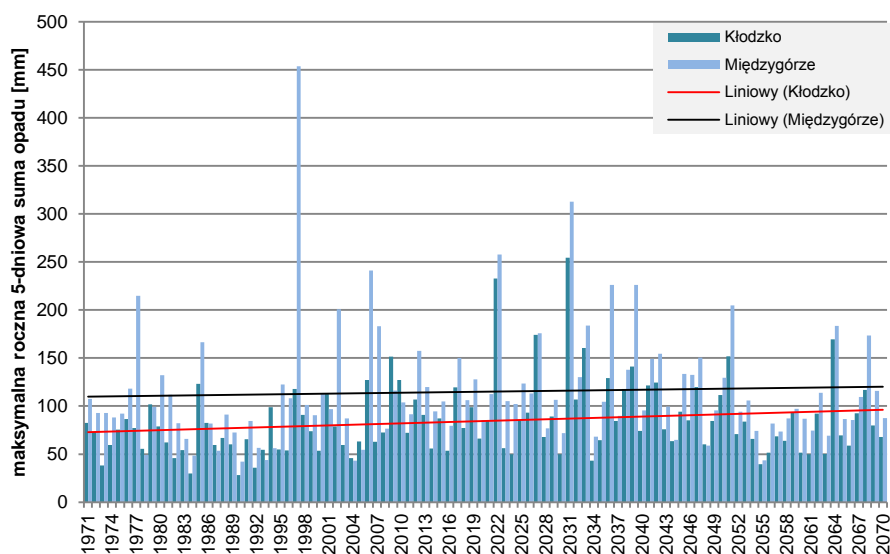
Rysunek nr 6 Liczebność sumy dobowej opadu dla stacji Kłodzko dla wielolecia 1971-2010 oraz dla wielolecia 2031-2070 wg projekcji zmian klimatu w klasach: (1) 30-50 mm, (2) 50-70 mm, (3) 70-100 mm, (4) >100- mm



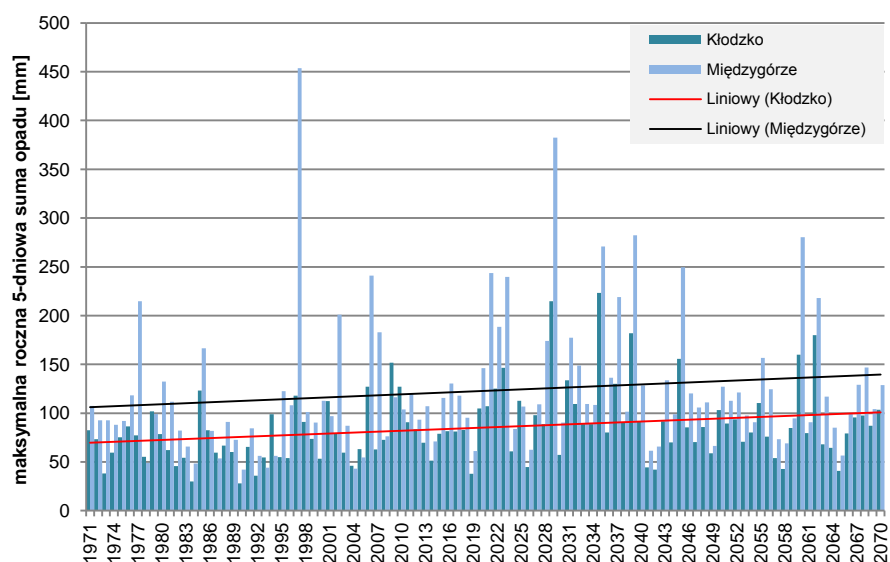
Analizie poddano również przebieg wartości maksymalnej rocznej sumy 5-dniowej opadu dla półrocza letniego w poszczególnych latach. Wybór 5-dniowych sum opadów wynika z faktu, że dla regionu wodnego Środkowej Odry większość epizodów opadowych poprzedzających wezbrania jakie wystąpiły w latach 1971-2005, występowała w okresie 3-5 dni, stąd przedział czasowy 5 dni uznaje się za najlepiej oddający wysokość opadów mogących wywołać wezbrania [Szalińska, Urban, Otop 2008].

Na rysunkach 7-12 przedstawiono zmienność tych wartości w badanym okresie dla wybranych stacji w Kłodzku i Międzygórzu wraz z liniami trendu.

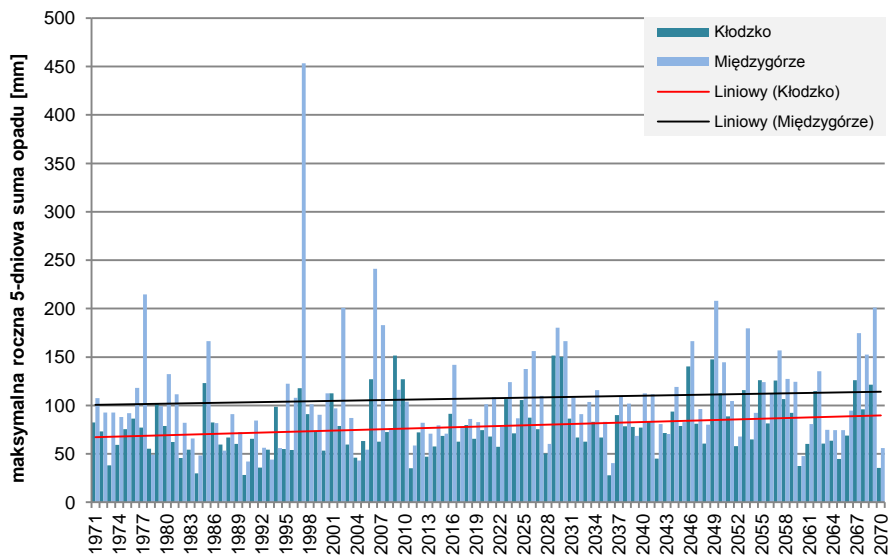
Rysunek nr 7 **Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 1**



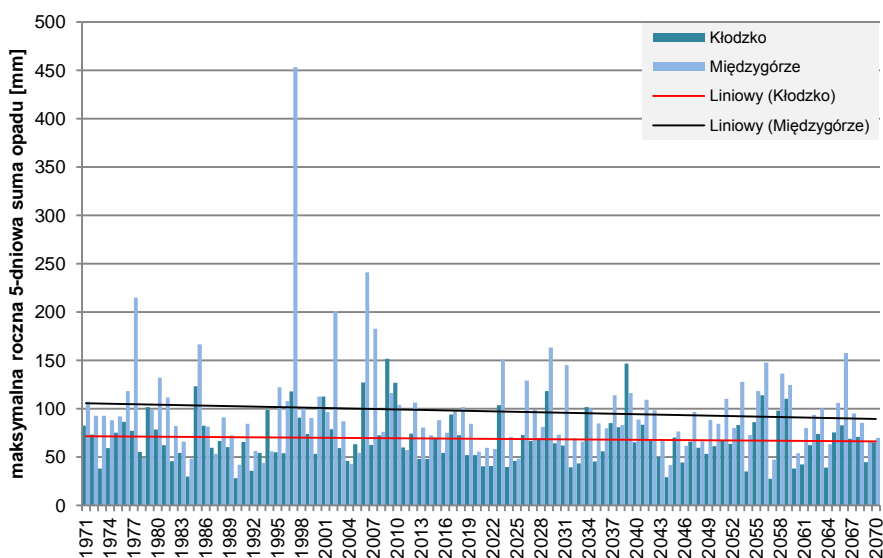
Rysunek nr 8 **Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 2**



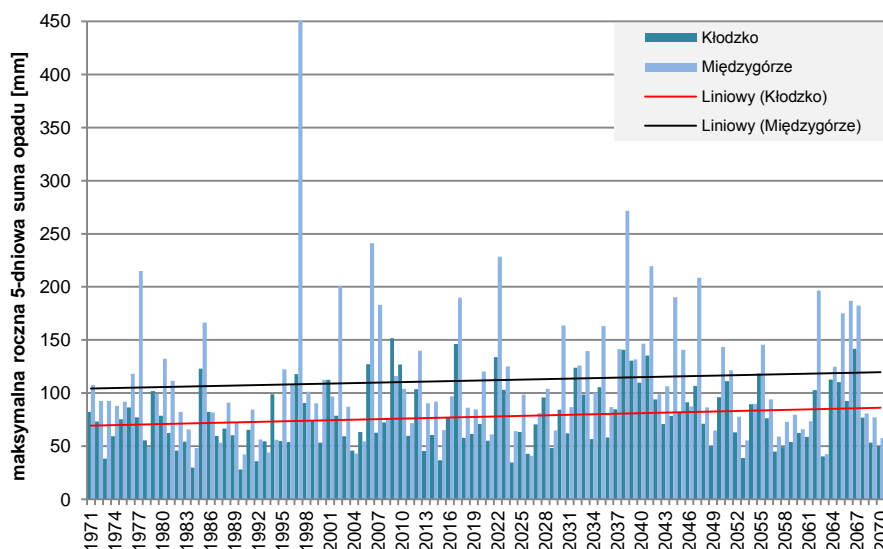
Rysunek nr 9 **Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 3**



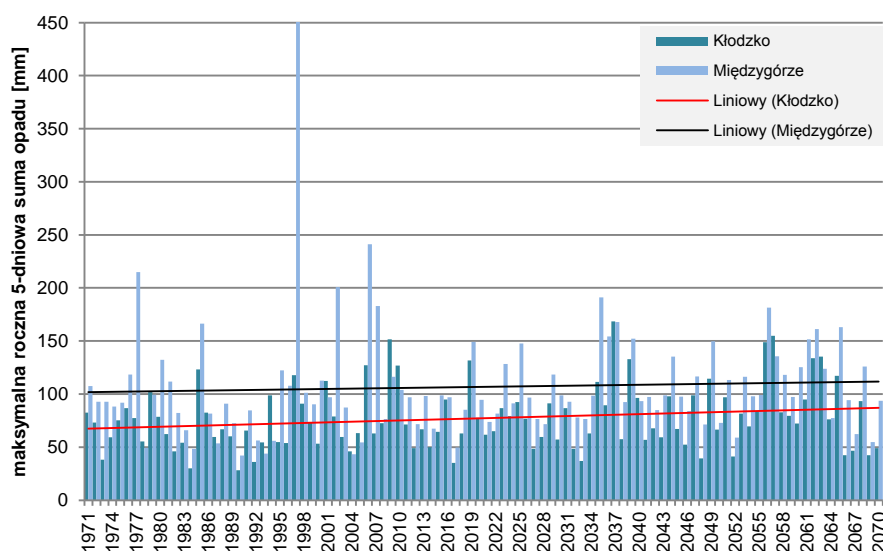
Rysunek nr 10 **Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 4**



Rysunek nr 11 **Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 5**



Rysunek nr 12 **Maksymalna roczna 5-dniowa suma opadu dla stacji Kłodzko i Międzygórze – scenariusz 6**



Analiza zmienności czasowej wskazuje, że maksymalna 5-dniowa suma opadu dla półrocza letniego wykazuje niewielką tendencję wzrostową, poza scenariuszem 4. Dla stacji wyżej położonych, o średniej rocznej sumie opadów około 1000 mm (Międzygórze), obserwuje się znaczne zmniejszenie zarówno wielkości maksymalnej rocznej sumy 5-dniowej opadu, jak i częstości występowania opadów o sumie 5-dniowej powyżej 200 mm, przy jednoczesnym zwiększeniu częstości występowania zdarzeń o maksymalnej sumie 5-dniowej 100-200 mm. Dla stacji niżej położonych (Kłodzko) według większości scenariuszy klimatycznych (poza scenariuszem 4), prognozowany jest wzrost zarówno wielkości maksymalnej rocznej 5-dniowej sumy opadu, jak i częstości występowania opadów o sumie 5-dniowej powyżej 75 mm.

Odływ ze zlewni Nysy Kłodzkiej

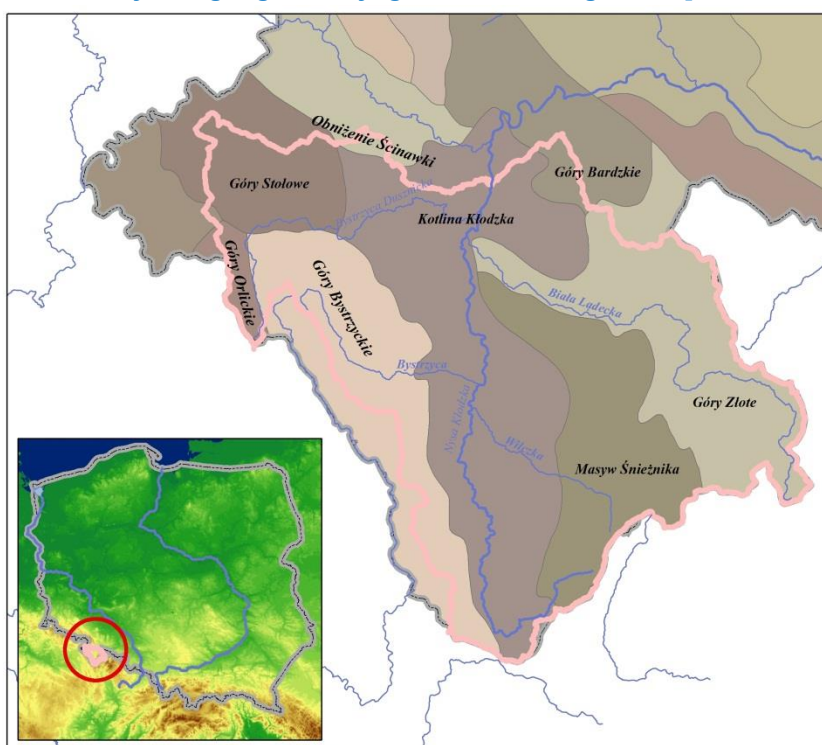
4

4. Odpyływ ze zlewni Nysy Kłodzkiej

4.1. Charakterystyka fizyczno-geograficzna zlewni Nysy Kłodzkiej

Obszar zlewni Nysy Kłodzkiej do profilu Kłodzko obejmuje Kotlinę Kłodzką wraz z otaczającymi ją górami. Jest położony w obrębie megaregionu Masywu Czeskiego, podprovincji Sudety z Przedgórzem Sudeckim. W obrębie Sudetów występują następujące mezoregiony [Kondracki 2002, Fabiszewski (red.) 2003].

Rysunek nr 13 **Podział fizycznogeograficzny, granice mezoregionów [Pawlak W., 1997]**



Obszar ten jest niejednorodny pod względem zasobności wodnej ze względu na złożoną tektonikę, różnorodność litologiczną oraz własności hydrogeologiczne podłoża.

Możliwości gromadzenia wód występują w utworach głównie w warstwach przy powierzchniowych rumoszków i zwietrzelin skalnych. Zasięg strefy rumoszków i zwietrzelin jest niewielki i sięga zwykle tylko kilku metrów poniżej powierzchni terenu. Wraz ze wzrostem głębokości maleje zwykle gęstość uszczelnienia skał. Ze względu na duże spadki charakterystyczne dla terenów górskich, wypełnienie wodą rumoszków, zwietrzelin i szczelin skalnych występuje tylko okresowo po opadach i roztopach śniegu. Wody tego poziomu nie tworzą z reguły stałego i trwałego zwierciadła. Występować może ono jedynie w dolinach rzek i potoków w bezpośrednim kontakcie z wodami powierzchniowymi. Doliny Nysy Kłodzkiej oraz jej głównych dopływów stanowią bazę drenażu wód podziemnych. Poziom zalegania zwierciadła pierwszego poziomu wód podziemnych w Dolinie Nysy Kłodzkiej występuje na głębokości od 0 do 2 m od powierzchni terenu. W Kotlinie Kłodzkiej i na Przedgórzu Sudeckim na głębokości 2-5 m, natomiast na obszarze górskim występuje strefa wód szczelinowych z poziomem wody poniżej 20 m.

4.2. Charakterystyka klimatyczna i meteorologiczna zlewni badawczej

Klimat obszaru badawczego zaliczany jest do kategorii klimatów umiarkowanych o cechach przejściowych między klimatem morskim a kontynentalnym. Charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem przestrzennym warunków klimatycznych, na co wpływ ma przede wszystkim wysokość nad poziomem morza, ekspozycja zboczy górskich, gęstość sieci rzecznej itd.

Przebieg roczny opadów w badanej zlewni ma cechy typu kontynentalnego. Dni z opadem występuje średnio 161 w roku, zazwyczaj są one notowane jednocześnie z pogodą ciepłą (około 70%). Największa suma miesięczna rejestrowana jest w lipcu. Opady minimalne przypadają na luty, w niektórych dolinach rzecznych w styczniu. Ogólnie można stwierdzić, że około 30-40% sumy rocznej opadów przypada na miesiące letnie, od czerwca do sierpnia. Na pozostałą sumę składa się udział opadów kwartału wiosennego i jesiennego na tym samym poziomie 21-24%. Średnie roczne sumy opadów z wielolecia 1971-2010 wahają się od 587 mm dla stacji opadowej w Kłodzku do 1074 mm w Bielicach.

Na obszarze zlewni przeważa liczba dni z pogodą ciepłą – 246 w roku (wg stacji synoptycznej w Kłodzku). Dni z pogodą mroźną występuje 35 w ciągu roku, a z pogodą przymrozkową 84. Maksimum termiczne występuje w lipcu, a średnia temperatura powietrza w tym miesiącu 16°C. Minimalna temperatura rejestrowana jest w styczniu, średnia temperatura powietrza wynosi -3°C. Średnia roczna temperatura waha się od 6°C w Górach Białskich, Masywie Śnieżnika, Górach Orlickich do 7,5°C w Kotlinie Kłodzkiej i w okolicach Barda. Podobny rozkład temperatury występuje w półroczu zimowym i letnim. Najzimniejsze rejony to Masyw Śnieżnika oraz Góry Orlickie, gdzie temperatura wynosi odpowiednio dla półroczu zimowego 0°C, dla letniego 12°C, najcieplejszy zaś to Kotlina Kłodzka ze średnią temperaturą okresu zimowego 1,5°C i letniego 13,5°C.

Dni słonecznych lub z niewielkim zachmurzeniem notuje się tutaj średnio 39 w roku, z czego ponad 60% występuje jednocześnie z pogodą ciepłą. Dni z pogodą pochmurną w rejonie Kłodzka występują średnio 194 razy w roku, w tym 35% to jednocześnie dni z opadem. Wśród dni z pogodą pochmurną największy odsetek stanowią dni z pogodą ciepłą – prawie 71%, natomiast udział dni mroźnych wśród pochmurnych wynosi jedynie 8%. Pozostałe 21% to dni pochmurne jednocześnie przymrozkowe. Pogoda z dużym zachmurzeniem w rejonie Kłodzka występuje średnio około 133 dni w roku, z czego 68% to dni jednocześnie odznaczające się opadem.

4.3. Charakterystyka hydrologiczna zlewni Nysy Kłodzkiej do stacji wodowskazowej w Kłodzku

Wykaz zlewni oraz posterunków wodowskazowych zawiera tabela 12.

Tabela nr 12 Wykaz posterunków wodowskazowych na badanym obszarze

Lp.	Wodowskaz	Rzeka	Powierzchnia zlewni [km ²]	km biegu rzeki	Rzędna zera wodowskazu [m n.p.m.]	Rok założenia
1	Międzylesie	Nysa Kłodzka	50,13	167,0	426,01	1898
2	Bystrzyca Kłodzka	Nysa Kłodzka	260,68	147,8	337,73	1898
3	Kłodzko	Nysa Kłodzka	1081,05	127,4	281,55	1854

Lp.	Wodowskaz	Rzeka	Powierzchnia zlewni [km ²]	km biegu rzeki	Rzędna zera wodowskazu [m n.p.m.]	Rok założenia
5	Wilkanów	Wilczka	35,18	5,2	362,66	1899
6	Bystrzyca Kłodzka	Bystrzyca	64,52	0,4	339,67	1898
7	Lądek Zdrój	Biała Lądecka	162,93	22,4	420,54	1889
8	Żelazno	Biała Lądecka	303,20	4,9	316,65	1893
9	Szalejów Dolny	Bystrzyca Dusznicka	173,73	3,8	304,71	1893
10	Tłumaczów	Ścinawka	255,64	23,6	341,22	1901
11	Gorzuchów	Ścinawka	514,98	8,3	294,51	1904

Wartości przepływów charakterystycznych z wielolecia 1966-2005 zestawiono w tab. 13.

Tabela nr 13 Przepływy charakterystyczne dla wielolecia, zlewnia Nysy Kłodzkiej, 1966-2005

Wodowskaz	Rzeka	Powierzchnia zlewni [km ²]	SNQ [m ³ /s]	SSQ [m ³ /s]	SWQ [m ³ /s]
Międzylesie	Nysa Kłodzka	49,7	0,130	0,685	11,7
Bystrzyca Kłodzka	Nysa Kłodzka	260,0	0,535	4,25	87,7
Kłodzko	Nysa Kłodzka	1083,7	3,62	13,2	184
Wilkanów	Wilczka	35,1	0,221	0,855	10,8
Bystrzyca Kłodzka	Bystrzyca	64,0	0,319	1,03	9,52
Lądek Zdrój	Biała Lądecka	165,5	0,811	3,44	45,4
Żelazno	Biała Lądecka	305,0	1,39	5,06	66,1
Szalejów Dolny	Bystrzyca Dusznicka	174,9	0,712	2,25	39,1
Tłumaczów	Ścinawka	256,2	0,561	2,43	46,3
Gorzuchów	Ścinawka	511,2	1,31	4,45	64,4

Reżim odpływu badanych zlewni kształtuje się podobnie. We wszystkich analizowanych zlewniach średni odpływ ma dwa wyraźne maksima: wiosenne w marcu po roztopach oraz letnie w lipcu. Pod względem gęstości sieci obserwacyjnej obejmującej stacje opadowe i wodowskazowe obszar ten jest dość dobrze monitorowany. Na powierzchnię 1744 km² przypada 11 posterunków wodowskazowych, co daje średnią powierzchnię zlewni monitorowanej 158 km². Pod względem opadowym na jedną stację przypada średnio powierzchnia 87 km². W przypadku stacji opadowych istotne jest rozmieszczenie stacji w piętrach wysokościowych. Lokalizacja stacji nie obejmuje pełnego profilu hipsometrycznego obszaru badawczego, różna jest również gęstość stacji w poszczególnych piętrach wysokościowych. Najwyżej położone partie zlewni Nysy Kłodzkiej w pobliżu Śnieżnika (1425 m n.p.m.) nie są kontrolowane pod względem opadowym. Najwyżej położoną stacją opadową jest Zieleniec (845 m n.p.m.). Najwięcej, bo 7 stacji jest położonych w piętrze wysokościowym 401-500 m n.p.m., w piętrze 301-400 m n.p.m. – jest 6 stacji, po trzy stacje znajdują się w piętrach 501-600 m n.p.m. oraz 601-700 m n.p.m. Najwyższe piętra zlewni 701-800 oraz 801–900 m n.p.m. są monitorowane przez 1 stację w każdym piętrze. Sieć pomiarów opadu jest więc umiejscowiona tylko w dolnej połowie profilu hipsometrycznego. Z punktu widzenia opracowania modeli hydrologicznych typu opad odpływ, ich

kalibracji i weryfikacji liczba stacji opadowych i wodowskazowych monitorujących warunki hydro-meteorologiczne jest wystarczająca.

Model hydrologiczny HEC-HMS

5

5. Model hydrologiczny HEC-HMS

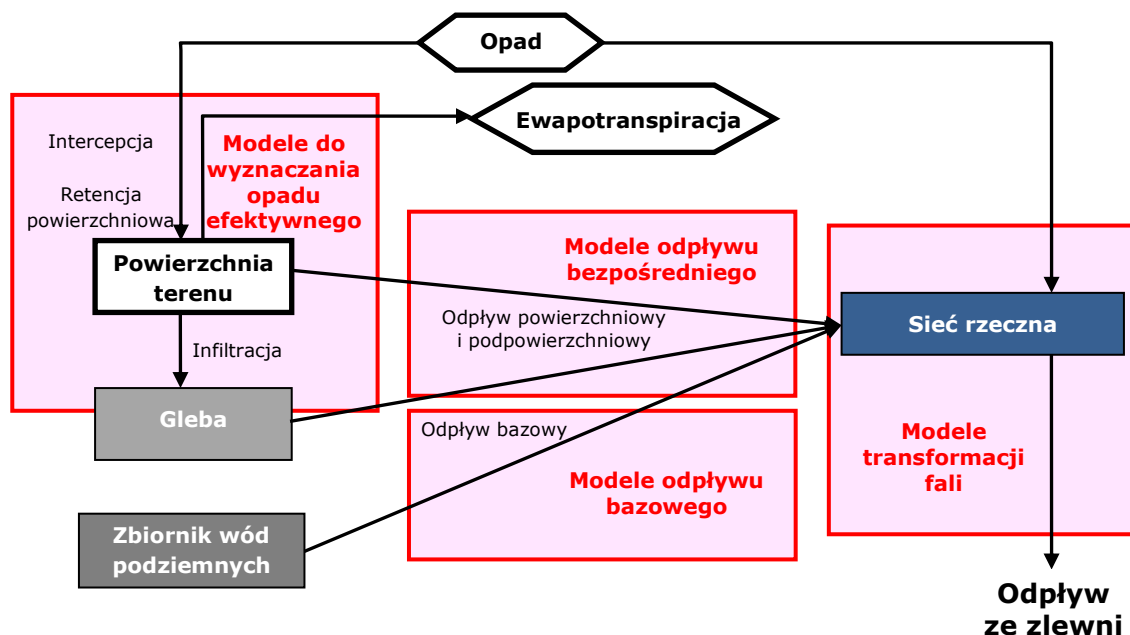
Wybór właściwego rodzaju modelu ma decydujące znaczenie dla osiągnięcia założonego celu modelowania i jakości uzyskiwanych wyników. Często wykorzystuje się modele konceptualne o parametrach skupionych, które charakteryzują się prostą strukturą, mniejszą liczbą wymaganych danych wejściowych. W tych modelach łatwiejszy jest również proces automatycznej kalibracji parametrów [Kunderlik, 2003]. Te czynniki decydują o ich szerokim zastosowaniu. Na potrzeby przeprowadzenia zakładanej oceny modelowanie przeprowadzono wykorzystując program HEC-HMS, należący do grupy programów HEC opracowanych przez U.S. Army Corps of Engineers – Hydraulic Engineering Center.

Program służy do symulacji procesów opad-odpływ oraz transformacji fali z wykorzystaniem następujących komponentów:

- modele służące do obliczania opadu efektywnego (na podstawie wielkości opadu oraz charakterystyk zlewni szacowane są wielkości strat na intercepcję, infiltrację, retencję, ewapotranspirację),
- modele transformacji opadu efektywnego w odpływ bezpośredni,
- modele odpływu bazowego,
- modele transformacji przepływu wody w korytach rzecznych.

Ogólny schemat zlewni zastosowany w modelu HEC-HMS przedstawia rysunek 14.

Rysunek nr 14 Schemat blokowy systemu dynamicznego zlewni w modelu HEC-HMS



Dane wejściowe do modelu HEC-HMS stanowią:

- charakterystyki fizyczno-geograficzne zlewni cząstkowych,
- wielkości parametrów oraz warunków początkowych zależnie od przyjętych poszczególnych modeli składowych,
- dane opadowe w postaci serii czasowych oraz sum opadu.

Istotnym problemem w modelach typu opad–odpływ jest właściwe oszacowanie opadu efektywnego, którym nazywamy tę część opadu całkowitego, która poprzez spływ powierzchniowy kształtuje hydrogram odpływu powierzchniowego [Soczyńska, 1997].

Do wyznaczenia opadu efektywnego zastosowano metodę SCS opracowaną przez Służbę Ochrony Gleb (Soil Conservation Service) w USA. Metoda ta jest jedną z najczęściej stosowanych metod, ponieważ wyróżnia się dużą szczegółowością doboru parametrów oraz daje możliwość obliczenia opadu efektywnego również w zlewniach niekontrolowanych, w których nie są prowadzone pomiary stanów lub przepływów.

W metodzie SCS opad efektywny uzależniony jest od: rodzaju gleb, sposobu użytkowania terenu zlewni oraz uwilgotnienia gleby w zlewni przed wystąpieniem opadu. Wszystkie te czynniki ujmuje jeden bezwymiarowy parametr CN (Curve Number), związany z maksymalną potencjalną retencją zlewni S , o wartościach zmieniających się w zakresie od 0 do 100. Uwzględnione są straty początkowe, a przebieg krzywej strat jest zbliżony kształtem do krzywej infiltracji.

Według założeń metody SCS odpływ bezpośredni rozpoczyna się, gdy wysokość opadu przekroczy wysokość warstwy wody zatrzymanej w procesach intercepcji, retencji powierzchniowej i infiltracji przed rozpoczęciem wezbrania. Ta część opadu, która bierze udział w procesach intercepcji, retencji i infiltracji nazywana jest stratami początkowymi Ia . Aktualna sumowana retencja po rozpoczęciu odpływu powierzchniowego F , kształtowana jest głównie przez infiltrację i rośnie wraz z upływem czasu do tak zwanej maksymalnej możliwej retencji S . Opad efektywny Pe , równy odpływowi bezpośredniemu, również rośnie wraz ze wzrostem opadu całkowitego P . Autorzy metody przyjęli założenie, że stosunek aktualnej sumowanej retencji F do maksymalnej retencji S jest równy stosunkowi opadu efektywnego Pe do wysokości opadu całkowitego P pomniejszonego o straty początkowe Ia :

$$\frac{F}{S} = \frac{Pe}{P - Ia}$$

gdzie: F – odpływ powierzchniowy, S – maksymalna możliwa retencja, Pe – opad efektywny, P – opad całkowity, Ia – straty początkowe.

Równocześnie spełnione jest równanie bilansowe:

$$P = Ia + F + Pe$$

stąd przy założeniu $P > Ia$ oraz wprowadzeniu empirycznej zależności $Ia = 0,2 \cdot S$, uwzględniając wysokości opadu w poszczególnych przedziałach czasu Δt otrzymuje się wzór, pozwalający określić opad efektywny.

$$Pe(t) = \frac{(P(t) - 0,2 \cdot S)^2}{P(t) + 0,8 \cdot S}$$

Występująca we wzorze maksymalna retencja S jest związana funkcyjnie z parametrem CN zależnością:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

W metodzie SCS wyznaczenie opadu efektywnego w pierwszej kolejności opiera się na określeniu rodzaju gleb występujących na terenie zlewni badawczej. Dla potrzeb tej metody dokonano podziału gleb na cztery grupy w zależności od możliwości powstawania odpływu powierzchniowego (poniższy podział na gatunki opracowany został dla nazw gleb zdefiniowanych przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze):

- **A** - gleby o małej możliwości powstawania odpływu powierzchniowego; charakteryzują się dobrą przepuszczalnością i dużymi współczynnikami filtracji (żwiry piaszczyste i gliniaste, piaski luźne),
- **B** - gleby o przepuszczalności powyżej średniej, o średnim współczynniku filtracji (piaski słabo gliniaste, piaski gliniaste lekkie, piaski gliniaste mocne, pyły zwykłe, lessy zwykłe),
- **C** - gleby o przepuszczalności poniżej średniej (gliny lekkie, ropy pyłaste, pyły ilaste, lessy ilaste),
- **D** - gleby o dużej możliwości powstawania odpływu powierzchniowego; przepuszczalność tych gleb i wartości współczynników filtracji są bardzo małe (gliny średnie, gliny ciężkie, ropy zwykłe).

Parametr *CN* określany jest następnie w zależności od użytkowania powierzchni zlewni, grupy glebowej oraz warunków hydrologicznych, które określają możliwość powstania odpływu powierzchniowego wynikającego z gęstości szaty roślinnej.

Zmienność wartości *CN* dla poszczególnych wzebrań wynika głównie z różnic w stanie retencji początkowej zlewni. W metodzie SCS ten stan uwzględnia się poprzez analizę sumy opadów w okresie 5 dni poprzedzających analizowany opad, określając poziom wilgotnościowy *AMC*:

- *AMCI* – najmniejsza możliwość wystąpienia odpływu powierzchniowego, gleby w zlewni są suche (suma opadu z 5 dni poprzedzających analizowany opad <13 mm w okresie poza wegetacyjnym, <35 mm w okresie wegetacyjnym),
- *AMCII* – warunki przeciętne (suma opadu 13-28 mm w okresie poza wegetacyjnym, 35-53 mm w okresie wegetacyjnym),
- *AMCIII* – największe możliwości wystąpienia odpływu powierzchniowego, zlewnia jest nasycona wodą z poprzednich opadów (suma >28 mm w okresie poza wegetacyjnym, >53 mm w okresie wegetacyjnym).

Obszarową zmienność użytkowania powierzchni zlewni, rodzaju gleby, sposobu uprawy i warunków hydrologicznych uwzględnia się w wartości *CN*, obliczając ją jako średnia ważoną [Ignar 1993].

Do transformacji opadu efektywnego w odpływ zastosowano metodę hydrogramu jednostkowego SCS. Pozwala ona na określenie wartości przepływu kulminacyjnego, całkowitej objętości odpływu, kształtu hydrogramu oraz jego przebiegu w czasie. Wartość przepływu kulminacyjnego wyznaczana jest z zależności:

$$q_p = C \cdot \frac{A}{t_p}$$

$$t_p = \frac{\Delta t}{2} + T_{lag}$$

gdzie: *A* – powierzchnia zlewni [km²], *t_p* – czas wznoszenia się fali kulminacyjnej [godz.], *C* – stała konwersji jednostek (*C*=2,08), *T_{lag}* – czas opóźnienia [godz.], Δt – czas trwania opadu efektywnego [godz.].

Czas opóźnienia definiowany jest jako różnica czasu pomiędzy środkiem ciężkości hietogramu opadu efektywnego a wystąpieniem przepływu kulminacyjnego. Dla zlewni kontrolowanych może być wyznaczany w procesie automatycznej optymalizacji parametrów, dla zlewni niekontrolowanych zaleca się szacowanie czasu opóźnienia na podstawie zależności:

$$T_{lag} = 0,6 \cdot t_C$$

gdzie: *t_C* – czas koncentracji [godz.], definiowany jest jako czas splywu wzdłuż najdłuższej drogi splywu od granic wododziału do profilu zamykającego.

5.1. Model HEC-HMS zlewni Nysy Kłodzkiej do stacji wodowskazowej w Kłodzku

Do opracowania charakterystyk fizyczno-geograficznych zlewni oraz parametrów modeli składowych dla Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko wykorzystano następujące materiały:

- Numeryczny Model Terenu w postaci warstwy GRID o rozdzielczości 1 m i dokładności wysokościowej 0,10-0,15 m pozyskany w ramach projektu ISOK;
- Baza Danych Obiektów Topograficznych - BDOT (skala 1:10 000);
- mapa glebowo-rolnicza Polski (skala 1 : 100 000),
- warstwy GIS Mapy Podziału Hydrograficznego Polski MPHP 2010 (skala 1:10 000), w tym:
 - sieć rzeczna,
 - zlewnie elementarne,
 - lokalizacja posterunków wodowskazowych i opadowych IMGW.

Na podstawie Numerycznego Modelu Terenu oraz układu sieci rzecznej MPHP w zlewni Nysy Kłodzkiej do Kłodzka wyznaczono 227 zlewni cząstkowych, dla których wyznaczono następujące parametry fizyczno-geograficzne:

- powierzchnię zlewni,
- spadek zlewni,
- długość cieków,
- spadek cieków,
- najdłuższą drogę spływu.

Rysunek nr 15 Schematyzacja zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko w modelu HEC-HMS

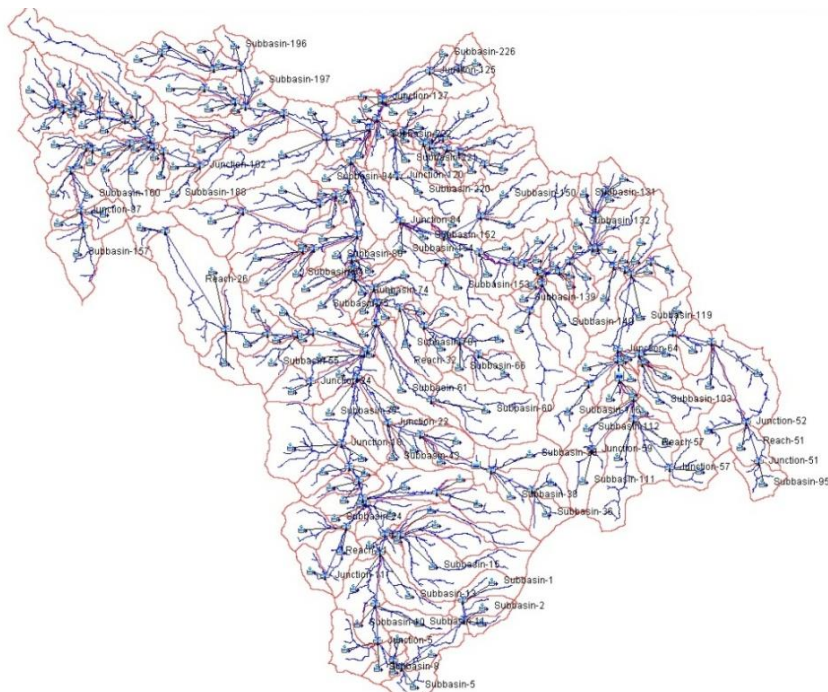


Tabela nr 14 Charakterystyki fizyczno-geograficzne oraz przyjęte parametry modelu dla zlewni cząstkowych

Zlewnia	Pow. zlewni [km ²]	Spadek zlewni [%]	Pow. nieprzepuszczalne [%]	Długość drogi spływu [km]	CN [-]	la [mm]	T _{lag} [min]
Subbasin-1	5.42	18.34	0.23	4803.6	64	29	545
Subbasin-2	4.12	19.75	0.09	4682.89	62	31	546
Subbasin-3	2.44	20.58	0.18	4593.31	62	31	527
Subbasin-4	6.19	14.66	0.32	7179.59	68	24	742
Subbasin-5	5.23	9.21	0.31	4869.16	70	22	644
Subbasin-6	1.01	8.86	0.45	1880.1	71	21	296
Subbasin-7	1.62	9.72	0.02	2969.92	69	23	436
Subbasin-8	3.17	16.67	0.25	3886.68	67	25	440
Subbasin-9	7.8	18.46	0.12	5040.58	62	31	599
Subbasin-10	3.48	10.44	2.32	3904.25	74	18	441
Subbasin-11	6.95	11.78	0.64	6990.3	70	22	760
Subbasin-12	8.22	12.32	0.89	6803.49	68	24	776
Subbasin-13	7.84	8.61	0.32	8032.49	72	20	929
Subbasin-14	3.53	9.26	0.35	3485.13	70	22	491
Subbasin-15	19.41	15.49	0.22	11588.5	73	19	897
Subbasin-16	7.67	13.33	0.17	7936.51	81	12	521
Subbasin-17	0.26	6.72	0	1586.6	78	14	230
Subbasin-18	8.15	17.24	0.18	12183.6	72	20	916
Subbasin-19	0.4	4.62	0.4	1412.17	84	10	193
Subbasin-20	6.48	7.23	0.25	5403.24	82	11	497
Subbasin-21	3.72	13.97	0.02	3286.68	60	34	519
Subbasin-22	7.24	17.28	0.44	5988.76	65	27	650
Subbasin-23	7.2	19.36	0.16	5380.12	61	32	635
Subbasin-24	2.03	13.07	0.37	3628.98	69	23	441
Subbasin-25	0.25	5.5	3.77	919.33	79	14	158
Subbasin-26	8.37	19.16	0.19	7723.85	67	25	711
Subbasin-27	1.16	9.73	0.07	2678.44	81	12	256
Subbasin-28	9.79	3.96	1.02	9044.75	85	9	873
Subbasin-29	4.76	8.75	0.79	4447.74	72	20	574
Subbasin-30	3.08	11.31	0.18	5231.77	70	22	615
Subbasin-31	1.12	8.67	3.63	2638.21	78	14	304
Subbasin-32	4.34	13.21	0.05	4771.65	68	24	564
Subbasin-33	3.25	7.66	0.98	4206.74	74	18	547
Subbasin-34	16.75	18.59	0.3	6695.39	66	26	664
Subbasin-35	13.13	8.89	0.35	7354.5	72	20	852
Subbasin-36	4.91	36.1	0.01	4198.27	74.1	18	251
Subbasin-37	4.41	31.96	0	4610.58	74.1	18	287
Subbasin-38	6.25	23.89	0.21	5560.41	75.4	17	368
Subbasin-39	7.21	24.87	0.15	5822.66	74.1	18	392
Subbasin-40	5.37	24.46	0.88	7544.55	70	22	561
Subbasin-41	4.86	14.54	0.11	4359.16	80	13	323

Zlewnia	Pow. zlewni [km ²]	Spadek zlewni [%]	Pow. nieprzepuszczalne [%]	Długość drogi spływu [km]	CN [-]	la [mm]	T _{lag} [min]
Subbasin-42	6.03	4.93	0.6	6240.35	88	7	488
Subbasin-43	2.39	3.91	0.05	4394.6	87	8	440
Subbasin-44	5.64	6.85	0.83	6796.69	85	9	528
Subbasin-45	6.3	7.97	1.26	5329.58	74	18	648
Subbasin-46	5.74	15.03	0.21	4026.43	63	30	538
Subbasin-47	5.63	14.84	0.43	5723.31	63	30	718
Subbasin-48	0.19	11.17	9.11	852.4	82	11	91
Subbasin-49	4.79	9.86	0	3506.55	67.2	25	523
Subbasin-50	25.05	11.06	0	10443.7	68.4	23	1139
Subbasin-51	5.29	15.29	0.1	5251.71	70.8	21	517
Subbasin-52	7.92	23.99	0.08	8020.53	69.6	22	602
Subbasin-53	3.19	22.92	0.17	3965.61	73.2	19	310
Subbasin-54	1.7	34.49	0.37	3054.54	72	20	214
Subbasin-55	7.6	21.61	0.23	5208.99	74.4	17	381
Subbasin-56	1.04	33.14	1	2129.51	73.2	19	157
Subbasin-57	3.25	29.41	0.2	4912.01	73.2	19	325
Subbasin-58	4.76	9.52	5	5193.31	76	16	539
Subbasin-59	1.67	9.32	11.38	2926.2	78	14	319
Subbasin-60	20.52	22.99	0.29	10269.8	66	26	841
Subbasin-61	11.92	5.33	0.6	12245.2	85	9	960
Subbasin-62	1.44	6.34	1.16	2537.73	82	11	290
Subbasin-63	7.48	27.22	0.1	5439.64	61	32	540
Subbasin-64	5.72	21.15	0.23	4812.66	66	26	478
Subbasin-66	2.61	17.51	0	3259.57	61	32	447
Subbasin-67	5.78	16.27	0.18	4651.29	70	22	467
Subbasin-68	3.07	19.93	0.66	4410.65	71	21	391
Subbasin-69	1.39	14.2	2.38	3175.78	81	12	243
Subbasin-70	7.29	9.39	0.18	6788.17	85	9	451
Subbasin-71	2.81	4.68	1.04	3759.04	87	8	355
Subbasin-72	1.59	6.84	0.45	3574.19	79	14	419
Subbasin-73	6.48	13.27	0.04	6008.7	76	16	513
Subbasin-74	2.56	5.18	0.36	4313.89	79	14	559
Subbasin-75	6.27	7.6	0.08	6334.55	72	20	817
Subbasin-76	0.28	4.08	1.97	1213.47	85	9	173
Subbasin-77	4.71	10.17	0.35	5569.11	72	20	637
Subbasin-78	0.13	6.09	3.03	980.62	86	8	113
Subbasin-79	1.95	5.76	0.04	4694.85	85	9	429
Subbasin-80	6.01	6.52	1.24	5380.41	81	12	546
Subbasin-81	6.78	15.33	0.57	6099.11	68	24	637
Subbasin-82	4.53	18.84	0.17	5752.67	64	29	621
Subbasin-83	0.47	6.33	2.22	1871.16	78	14	270
Subbasin-84	3.02	15.6	0.08	5063.49	69	23	527
Subbasin-85	4.1	5.05	0.18	5154.43	78	14	681

Zlewnia	Pow. zlewni [km ²]	Spadek zlewni [%]	Pow. nieprzepuszczalne [%]	Długość drogi spływu [km]	CN [-]	la [mm]	T _{lag} [min]
Subbasin-86	3.89	12.51	0.74	5843.49	84	10	365
Subbasin-87	12.61	5.76	0.23	7427.87	75	17	959
Subbasin-88	1.55	5.86	0.07	3274.19	79	14	422
Subbasin-91	9.65	16.46	0.16	6777.16	60	34	852
Subbasin-92	9.66	9.32	0.2	10900.3	71	21	1179
Subbasin-93	1.11	5.24	1.46	2288.8	80	13	321
Subbasin-94	4.2	7.88	1.02	3811.82	76	16	463
Subbasin-95	4.7	18.69	0	3846.55	72.5	19	344
Subbasin-96	5.24	26.85	0	5107.99	71.25	21	376
Subbasin-97	7.35	26.7	0	5336.5	72.5	19	374
Subbasin-98	14.9	27.58	0.12	9106.52	73.75	18	539
Subbasin-99	6.1	25.65	0.07	4820.46	72.5	19	351
Subbasin-100	5.53	19.73	0.29	4399.34	77.5	15	310
Subbasin-101	3.98	17.99	0.07	3856.32	73.75	18	336
Subbasin-102	6.47	19.33	0.3	4649.81	77.5	15	327
Subbasin-103	8.83	28.21	0.04	7344.68	73.75	18	449
Subbasin-104	2.04	24.92	0.05	3584.9	73.75	18	269
Subbasin-105	0.39	12.36	0.34	2160.51	82.5	11	178
Subbasin-106	1.06	17.32	3.57	2618.38	87.5	7	134
Subbasin-107	7.69	28.01	0	4482.53	71.25	21	331
Subbasin-108	9.29	27.78	0.18	6146.63	73.75	18	392
Subbasin-109	14.49	30.12	0.1	9800.36	72.5	19	572
Subbasin-110	2.34	20.8	0.3	3830.93	77.5	15	270
Subbasin-111	7.56	32.99	0.02	4901.47	72.5	19	314
Subbasin-112	7.48	27.71	0.41	7271.66	75	17	430
Subbasin-113	0.87	16.15	1.3	2436.14	81.25	12	182
Subbasin-114	2.06	19.92	0.05	2934.07	80	13	201
Subbasin-115	2.11	11.52	3.77	7344.68	88.75	6	346
Subbasin-116	9.36	24.88	0.24	6280.95	75	17	403
Subbasin-117	4.53	19.6	0.8	4309.52	82.5	11	246
Subbasin-118	0.65	6.62	9.42	2363.12	96.25	2	84
Subbasin-119	13.95	17.14	1.17	8382.62	78.75	14	529
Subbasin-120	4.72	21.43	0	3658.45	71.25	21	322
Subbasin-121	1.22	18	3.04	2546.49	83.75	10	159
Subbasin-122	0.22	13.11	7.32	1080.39	93.75	3	45
Subbasin-123	7.03	22.57	0.47	6978.88	80	13	378
Subbasin-124	0.64	17.14	8.43	1687.67	93.75	3	57
Subbasin-125	6.87	12.43	0.77	5553.6	70.4	21	607
Subbasin-126	4.31	17.14	2.3	3996.74	73.7	18	355
Subbasin-127	5.87	24.33	0.16	6208.7	64.9	27	565
Subbasin-128	0.03	8.55	4.75	287.43	77	15	54
Subbasin-129	4.11	23.89	0.07	3417.62	64.9	27	354
Subbasin-130	3.49	23.55	0.29	3935.19	67.1	25	373

Zlewnia	Pow. zlewni [km ²]	Spadek zlewni [%]	Pow. nieprzepuszczalne [%]	Długość drogi spływu [km]	CN [-]	la [mm]	T _{lag} [min]
Subbasin-131	1.92	23.35	3.12	3406.49	67.1	25	333
Subbasin-132	4.19	22.81	0.83	4585.32	66	26	443
Subbasin-133	2.31	18.65	0.59	3146.55	77	15	248
Subbasin-134	3.33	12.71	1.34	4034.73	81.4	12	305
Subbasin-135	0.76	5.73	2.54	2841.52	92.4	4	171
Subbasin-136	0.55	11.97	1.04	2432.88	78.1	14	242
Subbasin-137	2.7	14.1	1.51	3560.05	75	17	340
Subbasin-138	15.66	23.62	0.19	8454.68	69.3	23	639
Subbasin-139	2.34	17.94	0.06	3178.5	70.4	21	323
Subbasin-140	10.29	21.07	0.12	7772.43	69.3	23	633
Subbasin-141	0.74	17.94	1.66	2362.82	74.8	17	219
Subbasin-142	0.12	8.95	7.93	868.97	81	12	108
Subbasin-143	3.25	20.54	0	5119.29	69.3	23	459
Subbasin-144	0.74	7.91	3.71	2431.22	82	11	251
Subbasin-145	5.53	17.4	0.62	4725.85	74.8	17	387
Subbasin-146	3.53	10.47	0.9	4685.14	79	14	420
Subbasin-147	5.4	16.17	0.38	4881.23	67	25	536
Subbasin-148	4.56	12.18	1.54	5481.54	79	14	442
Subbasin-149	12.57	19.81	0.21	8363.2	70.4	21	667
Subbasin-150	9.49	17.85	0.1	6464.98	73.7	18	511
Subbasin-151	4.97	15.9	1.02	6770.53	73	19	576
Subbasin-152	3.8	11.77	0.69	4651.59	76	16	444
Subbasin-153	8.32	18.47	0.09	6571.96	74.8	17	489
Subbasin-154	6.25	18.77	0.26	5971.48	69	23	548
Subbasin-155	10.17	9.06	1.32	8285.92	81	12	654
Subbasin-156	2.06	7.56	0.26	3975.61	82	11	380
Subbasin-157	9.78	23.3	0.54	5797.15	73.2	19	417
Subbasin-158	1.99	29.54	0.02	3545.49	69.6	22	282
Subbasin-159	4.64	12.74	0	4533.6	68.4	23	544
Subbasin-160	3.55	31.45	0.25	4821.53	68.4	23	364
Subbasin-161	3.95	26.94	0.87	4130.46	74.4	17	283
Subbasin-162	1.3	20.43	7.33	2313.71	85.2	9	128
Subbasin-163	6.4	17.88	3.39	4609.35	81.6	11	284
Subbasin-164	0.27	19.7	9.62	1086.54	93.6	3	38
Subbasin-165	0.98	23.94	0.28	1863.59	78	14	139
Subbasin-166	2.54	16.59	3.94	3736.32	87.6	7	181
Subbasin-167	4.23	22.64	0.11	5150.65	74.4	17	369
Subbasin-168	0.73	9.29	8.57	2356.02	93.6	3	103
Subbasin-169	7.11	16.08	0.34	5123.6	81.6	11	325
Subbasin-170	0.16	8.96	2.85	1076.19	90	6	77
Subbasin-171	4.59	13.95	1.07	4571.88	80.4	12	337
Subbasin-172	0.68	5.98	0.23	1779.74	86.4	8	179
Subbasin-173	4.78	12.93	0.01	5062.66	72	20	524

Zlewnia	Pow. zlewni [km ²]	Spadek zlewni [%]	Pow. nieprzepuszczalne [%]	Długość drogi spływu [km]	CN [-]	la [mm]	T _{lag} [min]
Subbasin-174	0.29	6.98	0	969.62	85.2	9	109
Subbasin-175	1.38	13.19	0	2542.94	73.2	19	287
Subbasin-176	2.49	7.91	0.74	2528.21	79.2	13	293
Subbasin-177	2.51	11.77	0.05	4502.66	70.8	21	521
Subbasin-178	1.96	10.26	1.49	3563.36	84	10	271
Subbasin-179	2.58	14.27	0.33	4345.02	74.4	17	405
Subbasin-180	0.76	10.69	3.74	1599.39	88.8	6	106
Subbasin-181	17.56	11.88	0.42	14980.6	70.8	21	1356
Subbasin-182	4.66	10.28	2.75	4351.59	82.8	11	338
Subbasin-183	0.25	14.03	15.14	1376.31	90	6	75
Subbasin-184	8.32	17.93	0.39	7000.71	70.8	21	600
Subbasin-185	0.63	23.36	3.28	1340.1	80.4	12	97
Subbasin-186	2.17	22.93	0.2	2916.43	67.2	25	296
Subbasin-187	4.24	20.41	1.4	4456.26	69.6	22	408
Subbasin-188	4.59	17.93	0.04	5149.46	67.2	25	528
Subbasin-189	3.89	12.99	7.16	4706.63	70	22	527
Subbasin-190	5.97	11.49	0.93	6169.46	75.6	16	572
Subbasin-191	6.8	6.36	0.32	8137.58	82	11	736
Subbasin-192	4.05	20.96	0.09	3609.99	68.4	23	354
Subbasin-193	5.11	11.91	0.53	5373.97	78	14	458
Subbasin-194	2.45	8.23	0.32	3422.77	75	17	431
Subbasin-195	2.29	5.48	0.69	3135.66	84	10	335
Subbasin-196	3.69	11.4	0.09	4090.17	82	11	317
Subbasin-197	4.21	8.15	0.1	3845.9	85	9	307
Subbasin-198	7.28	18.55	0.03	6571.18	68.4	23	607
Subbasin-199	2.17	4.88	0.93	3402.83	75	17	558
Subbasin-200	3.42	10.48	0.42	4377.33	67	25	610
Subbasin-201	0.39	6.91	0.97	1405.18	75	17	231
Subbasin-202	4.11	7.25	1.74	4675.73	84	10	401
Subbasin-203	6	8.17	1.06	5963.78	87	8	389
Subbasin-204	19.99	7.52	1.49	11993.9	79	14	1052
Subbasin-205	4.68	7.54	0.65	6479.35	85	9	485
Subbasin-206	3.45	3.67	0.94	4306.38	88	7	420
Subbasin-207	5.48	17.56	0.34	4394.02	70	22	429
Subbasin-208	2.94	14.99	0.96	3737.26	81	12	269
Subbasin-209	5.52	15.7	0.08	6407.04	70	22	614
Subbasin-210	1.75	12.38	0.76	3078.8	85	9	209
Subbasin-211	1.85	11.91	0.1	3629.75	78	14	335
Subbasin-212	0.77	6.42	2.63	1997.31	88	7	172
Subbasin-213	10.13	16.68	1.04	6123.55	79	14	413
Subbasin-214	1	8.79	0.06	2654.07	87	8	196
Subbasin-215	0.29	7.01	1.51	1105.54	88	7	102
Subbasin-216	2.47	9.77	0.08	4505.32	77	15	457

Zlewnia	Pow. zlewni [km ²]	Spadek zlewni [%]	Pow. nieprzepuszczalne [%]	Długość drogi spływu [km]	CN [-]	la [mm]	T _{lag} [min]
Subbasin-217	2.68	8.18	1.51	3120.64	88	7	217
Subbasin-218	3.31	10.65	1.22	4426.38	84	10	317
Subbasin-219	1.07	5.89	1.64	2248.03	88	7	197
Subbasin-220	8.81	13.83	0.28	6616.1	73	19	606
Subbasin-221	4.59	4.43	0.38	4049.27	88	7	364
Subbasin-222	3.52	5.15	1.39	4759.75	88	7	384
Subbasin-223	1.25	5.53	19.78	2808.44	90	6	212
Subbasin-224	5.13	30.28	0.07	2773.71	68	24	241
Subbasin-225	4.53	21.45	0.49	2773.71	77	15	209
Subbasin-226	1.53	18.71	0	2553.71	81	12	178
Subbasin-227	3.99	12.11	4.76	5287.15	86	8	307
Subbasin-228	3.02	9.65	8.43	4077.68	86	8	280
Subbasin-229	0.02	6.1	77.72	334.71	97	2	16
Subbasin-230	0.98	9.31	22.25	2978.94	91	5	158

Na podstawie mapy glebowo-rolniczej wyznaczono udział poszczególnych typów i gatunków gleb, natomiast na podstawie BDOT określono strukturę użytkowania terenu, w tym procent powierzchni nieprzepuszczalnych w poszczególnych zlewniach cząstkowych.

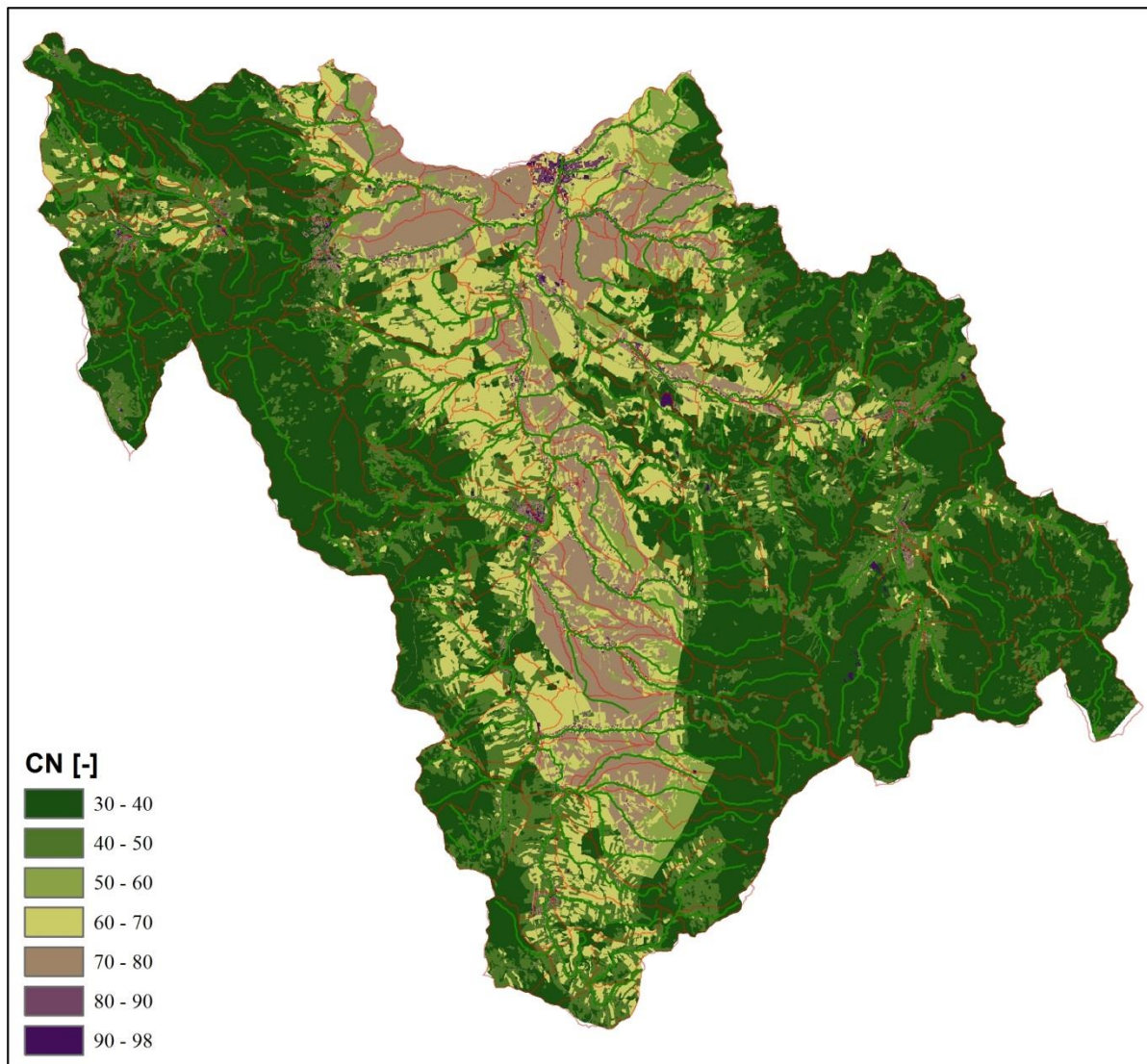
Strukturę użytkowania terenu, w tym procent powierzchni nieprzepuszczalnych określono na podstawie połączenia informacji z następujących obiektów BDOT:

1. Kompleksy pokrycia terenu (PK)
2. Sieci dróg i kolei (SK)
3. Budowle i urządzenia (BB)
4. Kompleksy użytkowania terenu (KU)

Jako tereny nieprzepuszczalne przyjęto:

1. Kompleksy pokrycia terenu:
 - Tereny zabudowy zwartej, gęstej lub luźnej (PK ZB),
 - Inne tereny niezabudowane (PK NT), w tym: Teren pod urządzeniami technicznymi i budowlami (PK NT 01), Plac z nawierzchnią twardą (PK NT 02),
 - Tereny pod drogami kołowymi, szynowymi i lotniskowymi (PK TK),
2. Budowle i urządzenia – Budynki (BB BD),
3. Kompleksy użytkowania terenu: Kompleksy komunikacyjne (KU KO).

Rysunek nr 16 Rozkład przestrzenny wyjściowego współczynnika CN w zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko



Jako dane meteorologiczne wykorzystano informacje ze stacji IMGW:

- sumy godzinowe opadu dla stacji Bolesławów, Długopole, Kamienica, Kłodzko, Łądek Zdrój, Międzylesie, Słoszów, Stronie Śląskie,
- sumy dobowe opadu dla stacji Bielice, Bystrzyca, Chocieszów, Lewin Kłodzki, Międzygórze, Młoty, Niemojów, Nowy Gieraltów, Ołdrzychowice, Pasterka, Podzamek, Polanica, Spalona, Zieleniec.

Rysunek nr 17 Lokalizacja stacji wodowskazowych i opadowych w zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko



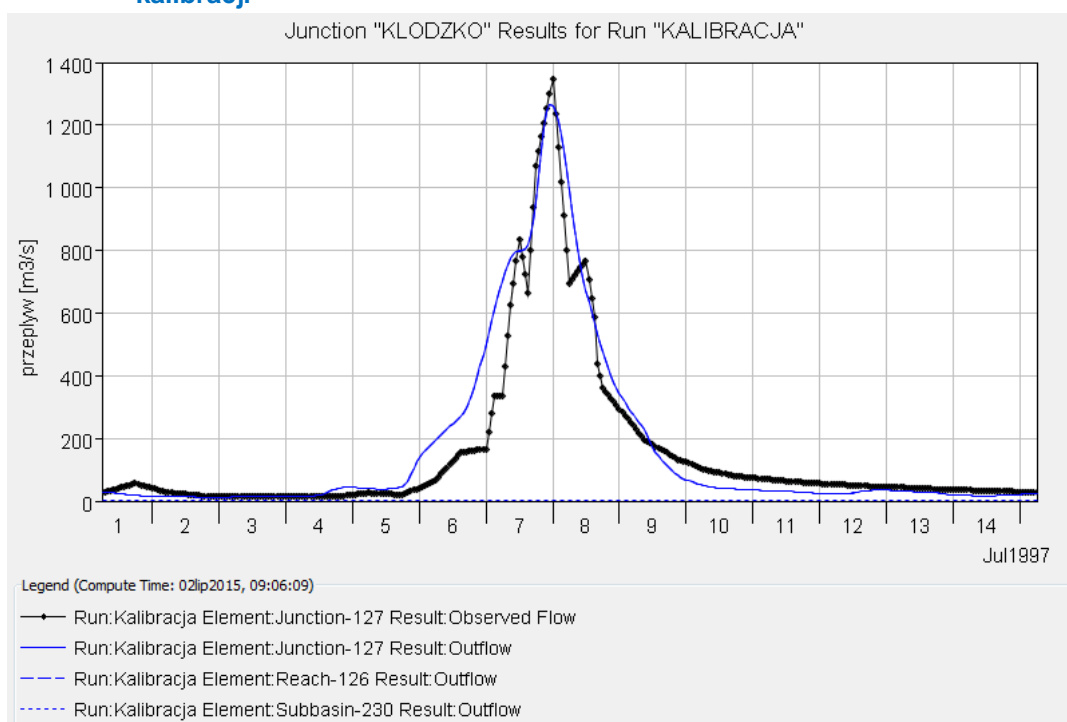
5.2. Kalibracja modelu opad-odpływ zlewni Nysy Kłodzkiej

Model zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko skalibrowany został na podstawie epizodu opadowego z lipca 1997 r. z wykorzystaniem danych opadowych godzinowych, uzupełnionych danymi dobowymi. Zlokalizowane w analizowanej zlewni dwa suche zbiorniki przeciwpowodziowe – zbiornik Stronie Śląskie na rzece Morawka oraz zbiornik Międzygórze na rzece Wilczka, ze względu na ograniczone możliwości uwzględnienia pracy zbiorników zgodnie z instrukcjami gospodarowania wodą, odwzorowane zostały za pomocą hydrogramów przepływów odpowiadających zrzutom w czasie powodzi 1997 r. Uzyskane wyniki dla tak przyjętych warunków zestawiono w tabeli poniżej.

Tabela nr 15 Model HEC-HMS zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko – wyniki kalibracji

	przepływ kulminacyjny [m ³ /s]	czas wystąpienia przepływu kulminacyjnego	objętość fali [mln m ³]
obserwacja	1345,0	35619	180,5
model	1265,2	35618.958	199,3

Rysunek nr 18 Model HEC-HMS zlewni Nysy Kłodzkiej do wodowskazu Kłodzko – wyniki kalibracji



Do oceny odwzorowania zmienności przepływów modelem hydrologicznym HEC HMS wykorzystano współczynnik efektywności Nash-Sutcliffe, zdefiniowany jako:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

Wartość współczynnika E może przyjmować wartości od $-\infty$ do 1. Wartość 1 odpowiada idealnemu dopasowaniu wyników symulacji do wartości obserwowanych. Wartości powyżej 0 uznawane są za satysfakcjonujące, poniżej 0 za niesatysfakcjonujące.

Dla zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko uzyskano wartość współczynnika efektywności E równą 0,905. Model jest satysfakcjonujący. Zatem model ten zostanie wykorzystany do dalszych symulacji odpływu dla prognozowanych wartości opadu dla 6 scenariuszy zmian klimatu.

Ocena wpływu zmian klimatu na zagrożenia powodziowe w zlewni Nysy Kłodzkiej

6

6. Ocena wpływu zmian klimatu na zagrożenie powodziowe w zlewni Nysy Kłodzkiej

6.1. Analiza scenariuszy prognozy opadu dla zlewni Nysy Kłodzkiej

Do oceny przepływów powodziowych z uwzględnieniem zmian klimatu wykorzystuje się modele opad-odpływ, w których warunki brzegowe dostosowane są do ekstremalnych warunków hydrologicznych. Scenariusze zmian klimatu nie są dostosowane do takich wymagań. Rozkład przestrzenny opadu odnosi się do dużych obszarów i przedstawiany jest często jako średni opad z okresów dłuższych [Bronstert 2004]. Przed przystąpieniem do oceny wpływu zmian klimatu na odpływ ze zlewni należy zatem brać pod uwagę niepewność wynikającą nie tylko z samego procesu modelowania, ale również założonych scenariuszy.

Oceny wpływu zmian klimatu na zagrożenie powodziowe w zlewni Nysy Kłodzkiej dokonano na podstawie analizy wyników symulacji odpływu ze zlewni z zastosowaniem modelu hydrologicznego typu opad-odpływ dla prognozowanych opadów według scenariuszy zmian klimatu. W szczególności porównano wyniki symulacji historycznego zdarzenia opadowego (zdarzenie referencyjne) z podobnymi zdarzeniami z projekcji zmian klimatu dla 6 scenariuszy. Jako zdarzenie referencyjne wybrana została powódź z lipca 1997 r., jako największa z dotychczas zarejestrowanych na analizowanym obszarze. Drugim ważnym elementem, z punktu widzenia potencjalnych źródeł wzrostu zagrożenia powodziowego, są zmiany zagospodarowania przestrzennego oraz użytkowania terenu. W przedkładanej pracy element zmiany zagospodarowania przestrzennego oraz użytkowania terenu w czasie nie był brany pod uwagę. Brak jest tego rodzaju prognoz obejmujących horyzont czasowy pokrywający się z prognozami zmian klimatu, w reprezentacji przestrzennej na poziomie zlewni, możliwych do wykorzystania w modelowaniu.

Dla wielolecia 1977-2010 obliczone zostały wartości percentyli rozkładu 5-dniowych sum opadu dla półrocza letniego. Maksymalne 5-dniowe sumy opadów z 1997 r. dla poszczególnych stacji w zlewni Nysy Kłodzkiej odpowiadały wartości percentyli 99,7 – 99,98. Analogicznie wartości percentyli wyznaczone zostały dla prognozowanych 5-dniowych sum opadów dla półrocza letniego w okresie 2011-2070.

Dla 6 scenariuszy zmian klimatu wybrane zostały zdarzenia o maksymalnej 5-dniowej sumie opadu na poziomie percentyla jak dla 1997 r. jako odpowiadające zdarzeniu referencyjnemu. Jako kryterium wyboru epizodu opadowego przyjęto wystąpienie analizowanej sumy opadu na minimum połowie stacji jednocześnie.

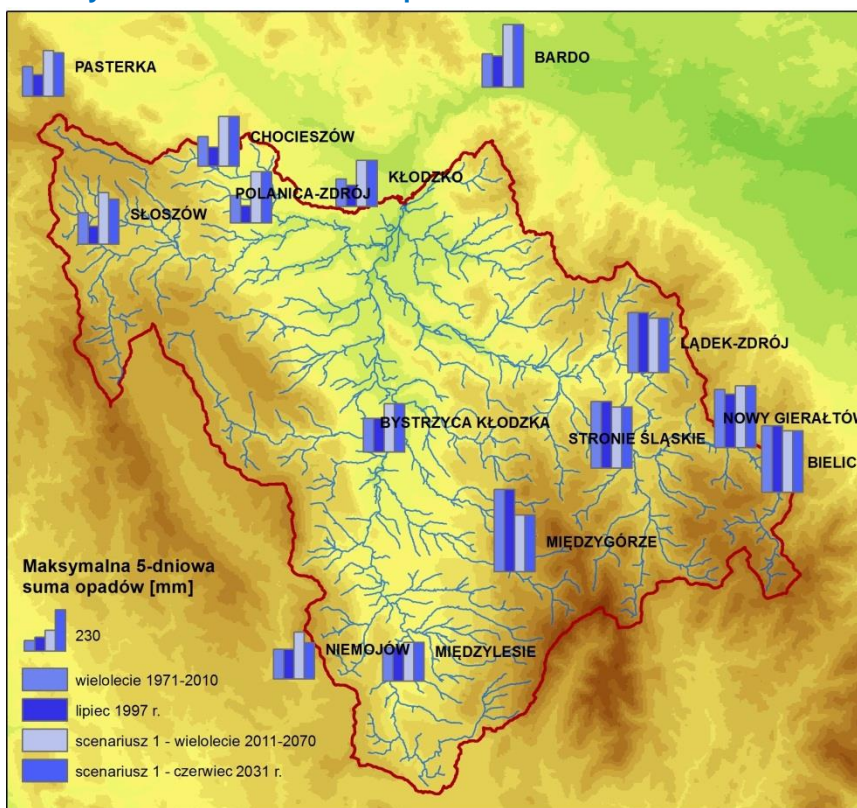
Tabela nr 16 **Percentyl 99 sumy 5-dniowej opadów dla półrocza letniego**

Stacja	Położenie. Stacji [m n.p.m.]	Percentyl	5-dniowa suma opadów dla półrocza letniego [mm] dla scenariusza						
			1997 r.	1	2	3	4	5	6
Kłodzko	356	99,81	117,9	151,1	149,8	125,2	101,7	121,6	124,7
Lądek Zdrój	460	99,98	331,5	301,6	357,2	178,8	195,4	215,9	178,7
Słoszów	555	99,70	97,0	133,2	142,1	122,6	93,9	149,8	126,2
Niemojów	570	99,98	162,7	257,8	235,9	164,7	135,2	192,2	165,4
Międzylesie	450	99,98	184,9	214,3	202,7	142,1	119,5	171,0	145,6
Międzygórze	585	99,98	453,5	312,7	382,4	208,1	163,4	271,6	191,2

Stacja	Położenie. Stacji [m n.p.m.]	Percentyl	5-dniowa suma opadów dla półrocza letniego [mm] dla scenariusza						
			1997 r.	1	2	3	4	5	6
Stronie Śląskie	530	99,98	366,9	337,0	367,9	180,9	197,8	227,8	184,4
Nowy Gieraltów	635	99,97	295,3	280,8	309,5	204,3	199,3	202,9	190,2
Chocieszów	405	99,76	104,7	156,7	170,4	124,0	92,8	150,4	125,0
Pasterka	700	99,73	120,2	136,8	128,8	120,3	101,3	129,6	125,7
Bardo Śląskie	320	99,95	170,6	222,6	197,8	169,6	151,3	162,7	172,7
Bystrzyca Kł.	365	99,98	184,7	265,6	246,0	150,5	136,6	178,0	158,4
Polanica Zdrój	390	99,65	94,7	132,8	127,1	111,9	86,7	134,4	97,2
Bielice	395	99,98	365,7	338,9	368,1	250,7	231,2	270,8	234,4

Dla scenariusza 1, jako odpowiadające powodzi z lipca 1997 r., wybrane zostało zdarzenie dla czerwca 2031 r. Dla rozpatrywanego zdarzenia maksymalna 5-dniowa suma opadu była najwyższą z prognozowanych na lata 2011-2070 dla 11 analizowanych stacji opadowych (za wyjątkiem Słoszowa, Niemojowa i Pasterki). Jednocześnie dla scenariusza 1 dla stacji opadowych, dla których zanotowana w wieloleciu referencyjnym 1977-2010 maksymalna 5-dniowa suma opadu wynosiła 150-330 mm prognozowany jest wzrost maksymalnej 5-dniowej sumy opadów, natomiast dla stacji o sumie powyżej 330 mm (Łądek Zdrój, Międzygórze, Stronie Śląskie, Bielice), generujących znaczną część odpływu w zlewni Nysy Kłodzkiej do wod. Kłodzko, prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadu od 27 mm dla stacji Bielice do aż 141 mm dla Międzygórza.

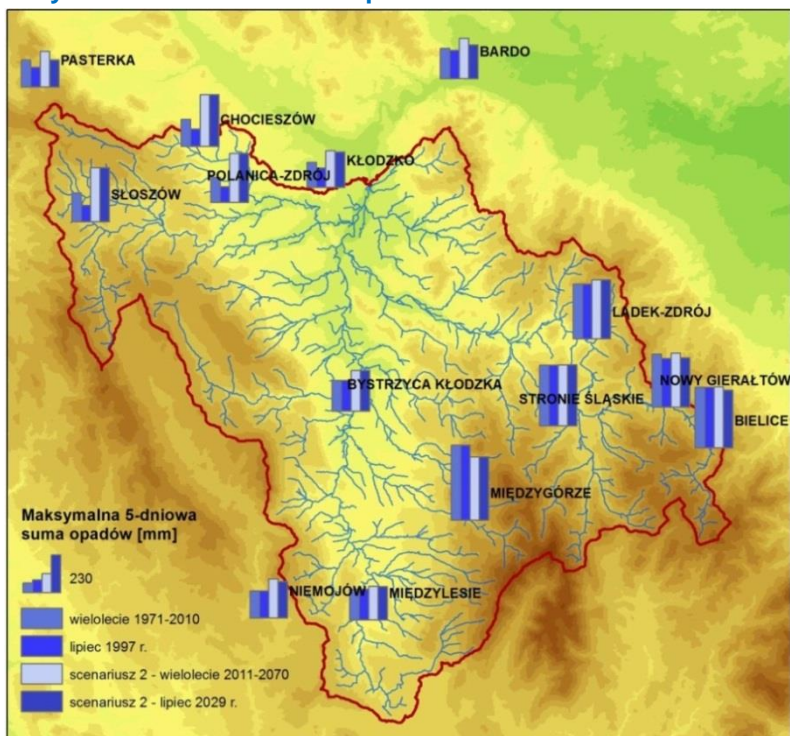
Rysunek nr 19 **Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 1**



Dla scenariusza 2 wybrano zdarzenie z lipca 2029 r. Dla analizowanego zdarzenia maksymalna 5-dniowa suma opadu była najwyższą z prognozowanych na lata 2011-2070 dla 7 analizowanych stacji opadowych. Jednocześnie dla scenariusza 2 dla wszystkich stacji opadowych poza Międzygórzem prognozowany jest wzrost maksymalnej 5-dniowej sumy opadów od 1 mm dla Stronia

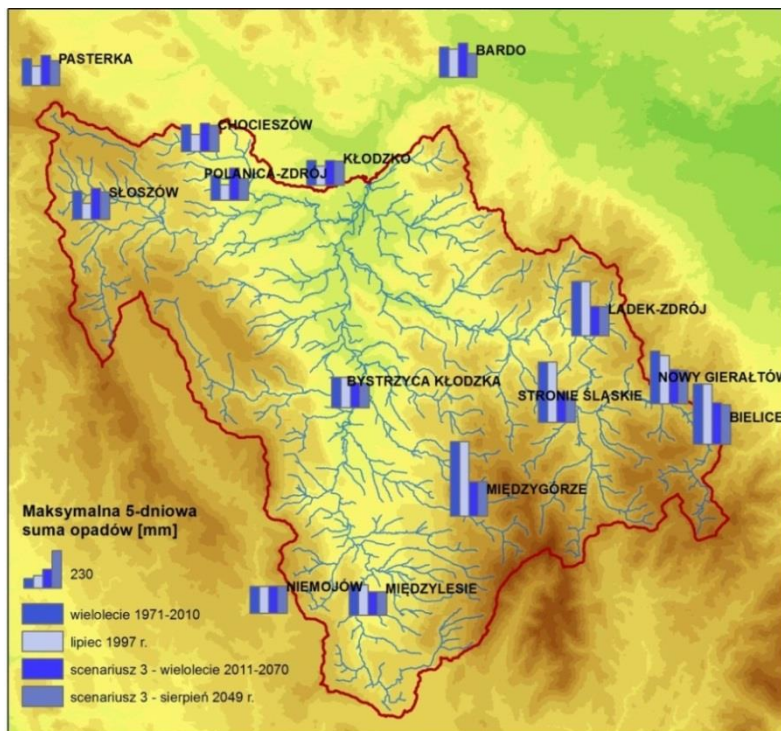
Śląskiego do 152 mm dla Słoszowa. Dla Międzygórza prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadu o 71 mm.

Rysunek nr 20 **Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 2**



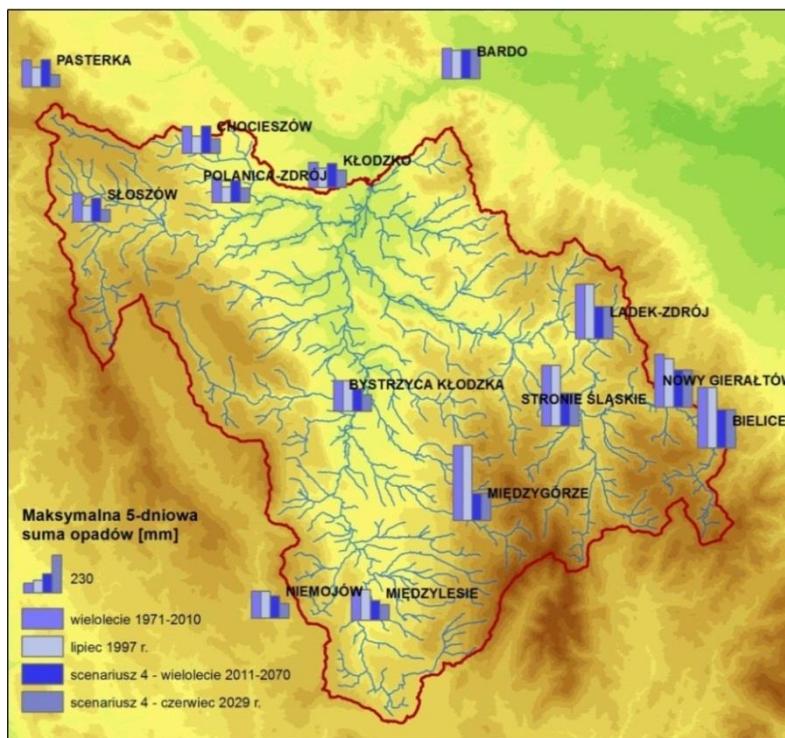
Dla scenariusza 3, jako odpowiadające powodzi dla lipca 1997 r., wybrane zostało zdarzenie - sierpień 2049 r. Maksymalna 5-dniowa suma opadu była najwyższą lub bardzo zbliżoną do maksimum prognozowanego na lata 2011-2070 dla 7 analizowanych stacji opadowych. Jednocześnie dla scenariusza 3 dla 7 stacji opadowych prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadów w wieloleciu 2011-2070 (dla Międzygórza aż o 245 mm), natomiast dla pozostałych stacji bardzo niewielki wzrost (do 45 mm dla Polanicy-Zdrój).

Rysunek nr 21 **Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 3**



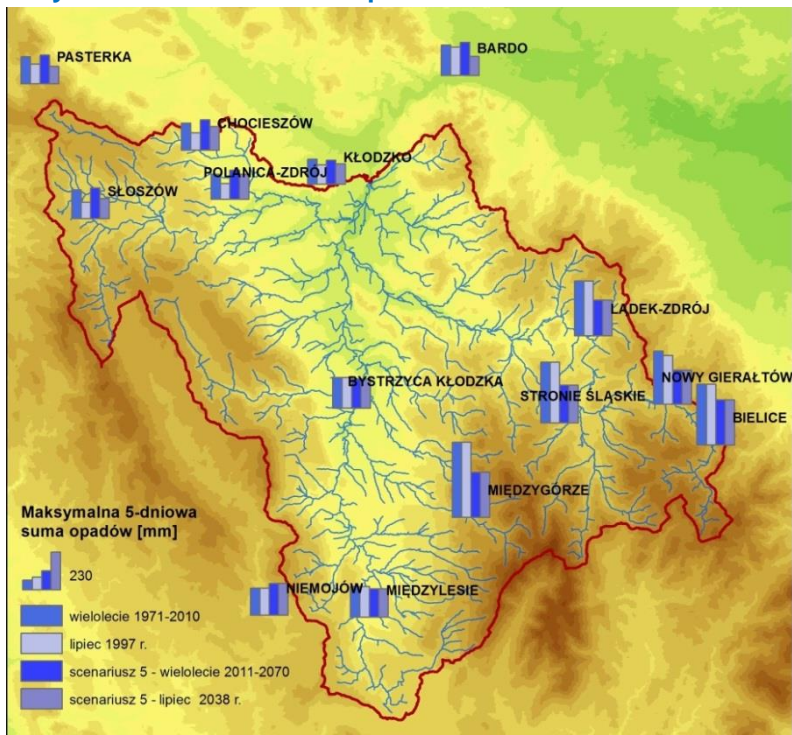
Dla scenariusza 4 wybrane zostało zdarzenie dla czerwca 2029 r. Dla rozpatrywanego zdarzenia maksymalna 5-dniowa suma opadu była najwyższą z prognozowanych na lata 2011-2070 dla 6 analizowanych stacji opadowych (w tym dla stacji o zan otowanej w wieloleciu 1977-2010 maksymalnej 5-dniowej sumie opadu powyżej 320 mm). Jednocześnie dla scenariusza 4 prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadów w wieloleciu 2011-2070 dla prawie wszystkich stacji poza Chocieszowem i Pasterką. Dla stacji, dla których dotychczas notowane były największe opady, prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadu od 94 mm dla Nowego Gierałtowa do aż 290 mm dla Międzygórza.

Rysunek nr 22 **Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 4**



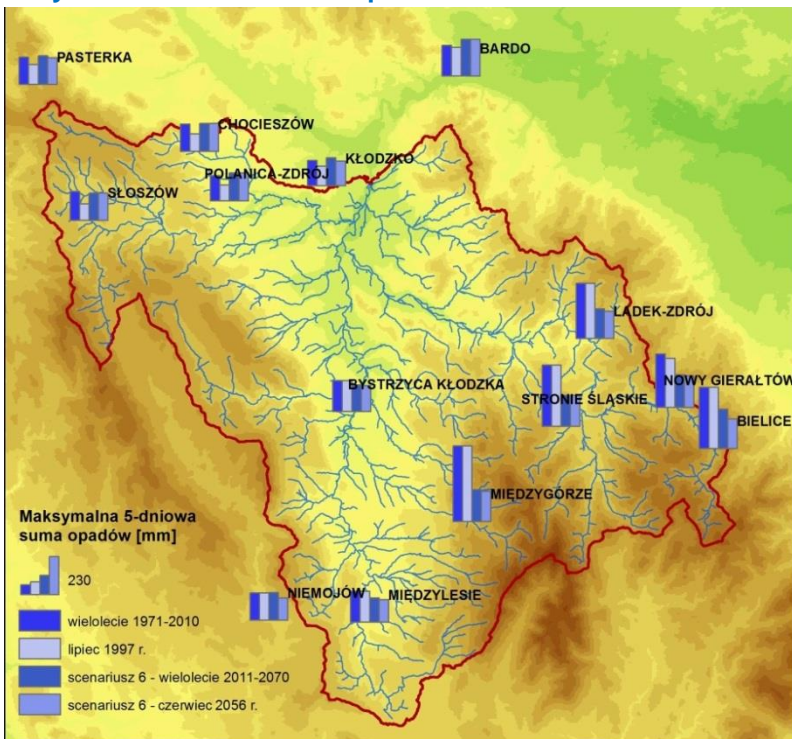
Dla scenariusza 5, do analizy wybrane zostało zdarzenie z okresu lipiec-sierpień 2038 r. Dla rozpatrywanego zdarzenia maksymalna 5-dniowa suma opadu była maksymalną z prognozowanych na lata 2011-2070 dla 8 analizowanych stacji opadowych, w tym dla stacji gdzie dotychczas notowane były największe opady. Jednocześnie dla scenariusza 5, podobnie jak dla 3, dla 8 stacji opadowych prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadów w wieloleciu 2011-2070 (dla Międzygórza o 182 mm), natomiast dla pozostałych stacji bardzo niewielki wzrost (do 30 mm dla Niemojowa).

Rysunek nr 23 **Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 5**



Dla scenariusza 6 do analizy wybrane zostało zdarzenie dla okresu czerwiec/lipiec 2056 r. Dla rozpatrywanego zdarzenia maksymalna 5-dniowa suma opadu była najwyższą lub bardzo zbliżoną do maksimum prognozowanego na lata 2011-2070 dla 8 analizowanych stacji opadowych. Jednocześnie dla scenariusza 6 również prognozowane jest zmniejszenie maksymalnej 5-dniowej sumy opadu w wieloleciu 2011-2070, głównie dla stacji opadowych o dotychczas zanotowanej maksymalnej 5-dniowej sumie opadu powyżej 320 mm – od 124 mm dla Nowego Gieraltowa do 262 mm dla Międzygórza.

Rysunek nr 24 **Maksymalna 5-dniowa suma opadu - scenariusz 6**



Rozkład sumy 5-dniowej dla prognozowanych opadów zgodnie z zastosowanymi scenariuszami ulega zmianie. Prognozuje się wyższe sumy opadów dla stacji niżej położonych, na których dotychczas notowane są stosunkowo niskie opady, natomiast dla stacji położonych wyżej, o dotychczasowo wysokich opadach, prognozuje się zmniejszenie ich sumy. Można zatem przypuszczać, że zmieni się rozkład opadów i zmieni się wpływ tj. wzrośnie znaczenie obszarów o dzisiaj mniejszej powodziowości. Może to skutkować również zmianą odpływu i rozkładem obszarów zagrożonych powodziami.

6.2. Odpływ ze zlewni Nysy Kłodzkiej dla opadów prognozowanych

Obliczenia wykonane zostały z uwzględnieniem danych opadowych w postaci sum dobowych opadu dla 14 stacji, dla których wykonane zostały projekcje zmian klimatu. Dla takich warunków początkowych została wykonana również symulacja dla scenariusza referencyjnego dla lipca 1997 r. z zastosowaniem parametrów skalibrowanego modelu opisanego w poprzednim rozdziale. Ze względu na brak informacji o prognozowanej instrukcji pracy zbiorników scenariusz referencyjny oraz scenariusze klimatyczne obliczone zostały dla warunków całkowitego otwarcia urządzeń zrzutowych na podstawie krzywych pojemność zbiornika-odpływ. W warunkach rzeczywistych w okresie powodziowym gospodarowanie wodą na zbiornikach odbywa się poprzez sterowanie otwarciem zasowy, w zależności od rejestrowanego stanu wody w zbiorniku i tendencji jego zmiany (opadanie/wzrost):

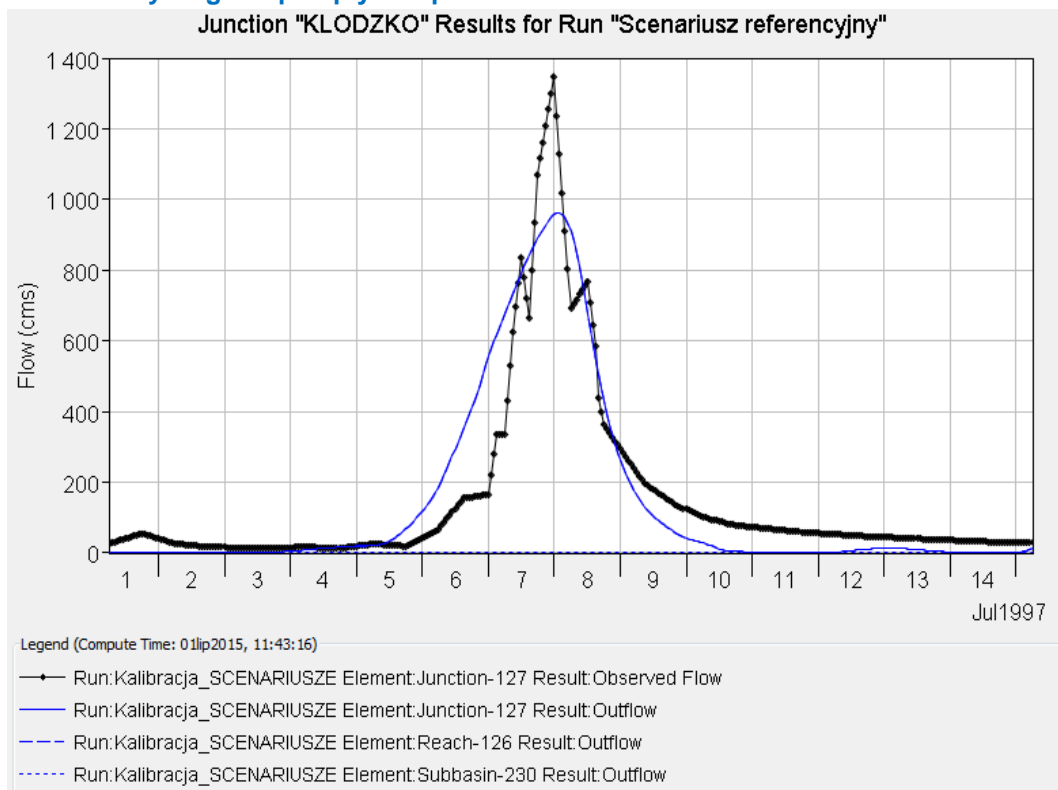
- dla zbiornika Międzygórze upustu dennego prawego,
- dla zbiornika Stronie Śląskie upustu środkowego.

Zmniejszenie liczby stacji opadowych jako wejścia do modelu, zmiana kroku czasowego oraz zmiana pracy urządzeń zrzutowych wpłynęła na wyniki symulacji zarówno w odniesieniu do przepływu maksymalnego wezbrania, jak i jego objętości. Dla tak przyjętych warunków dla scenariusza referencyjnego (dla lipca 1997 r.) uzyskano przepływ kulminacyjny 985,1 m³/s oraz objętość fali 173,7 mln m³. Współczynnik Nasha-Stutcliffa E dla symulowanego okresu referencyjnego wynosi 0,85. Model jest satysfakcjonujący.

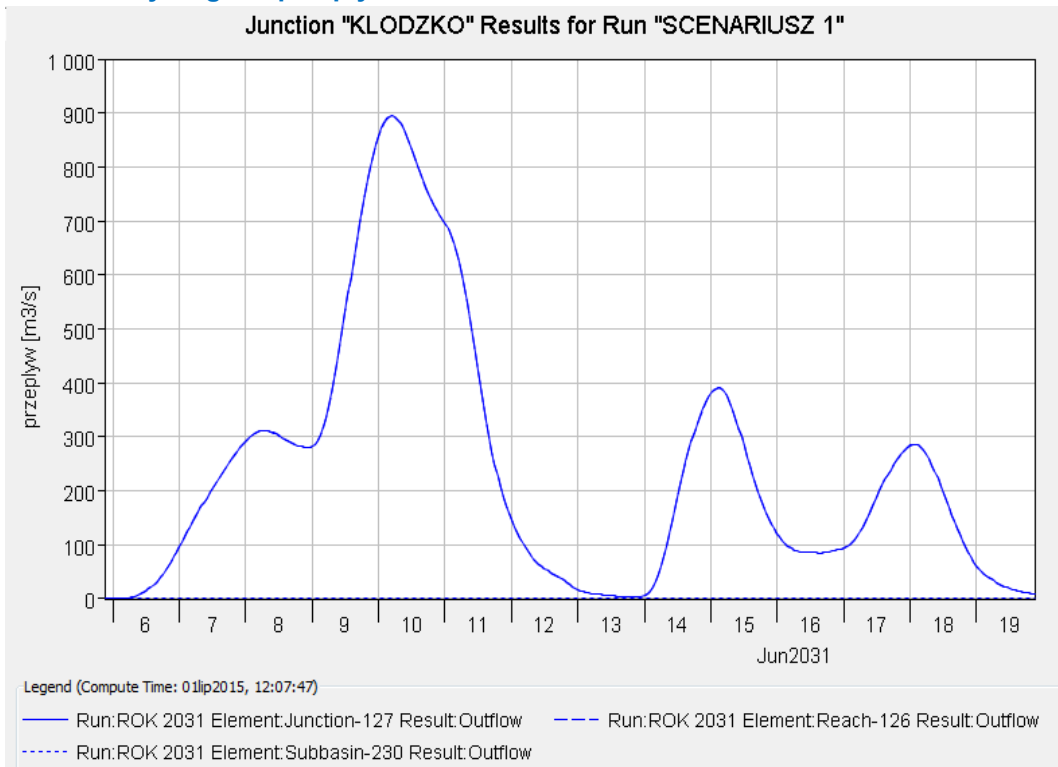
Tabela nr 17 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wodowskaz Kłodzko

Scenariusz	Epizod opadowy	Przepływ maksymalny Q _{max} [m ³ /s]	Objętość wezbrania V [mln m ³]
referencyjny	lipiec 1997 r.	985,1	173,7
1	czerwiec 2031 r.	894,4	288,1
2	lipiec 2029 r.	1152,6	241,7
3	sierpień 2049 r.	584,5	100,9
4	czerwiec 2029 r.	397,7	121,6
5	sierpień 2038 r.	605,5	136,9
6	czerwiec-lipiec 2056 r.	593,2	118,3

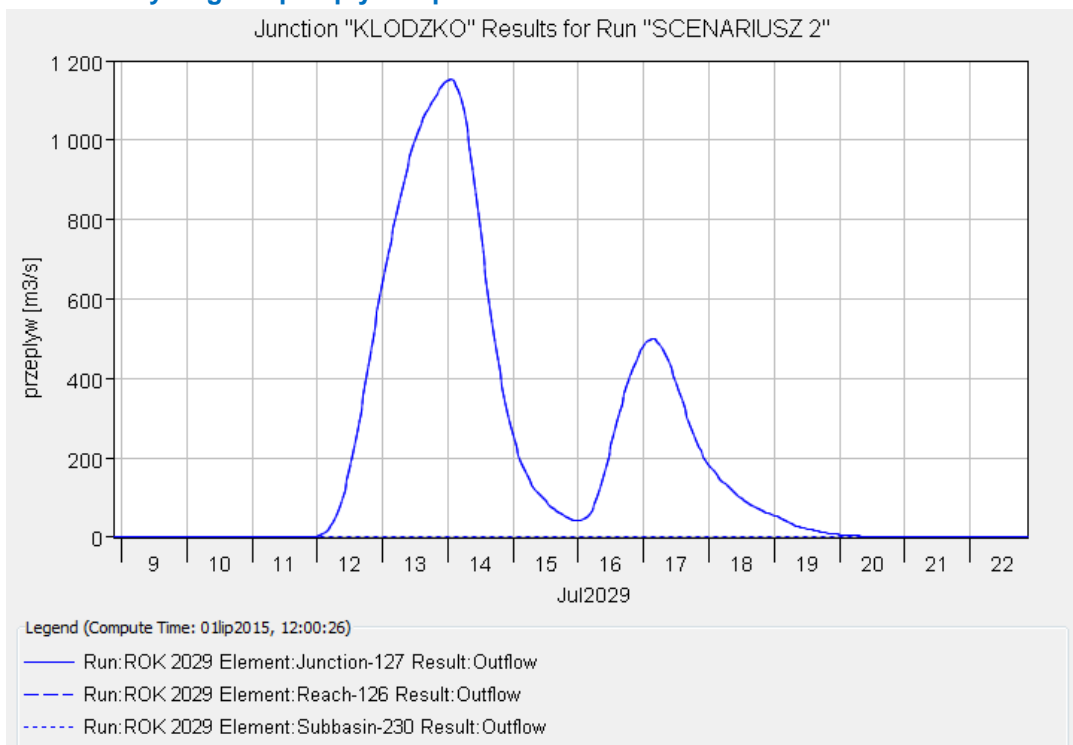
Rysunek nr 25 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nisy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu lipiec 1997 r.



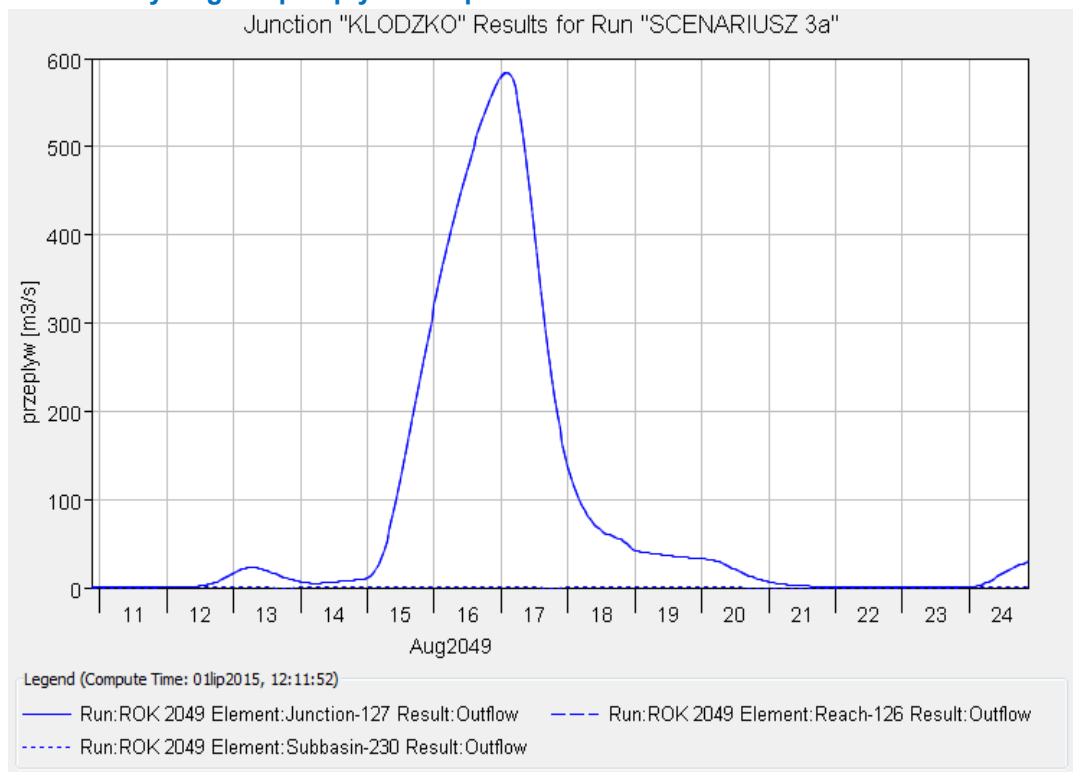
Rysunek nr 26 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nisy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu czerwiec 2031 r. scenariusz 1



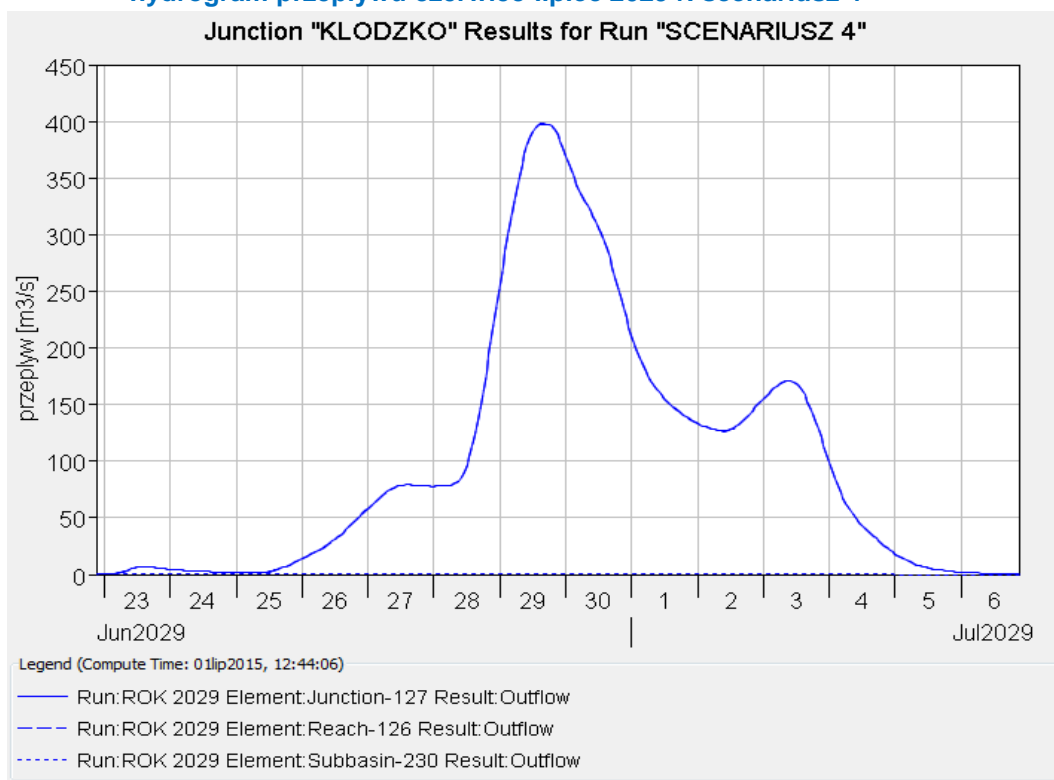
Rysunek nr 27 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nisy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu lipiec 2029 r. scenariusz 2



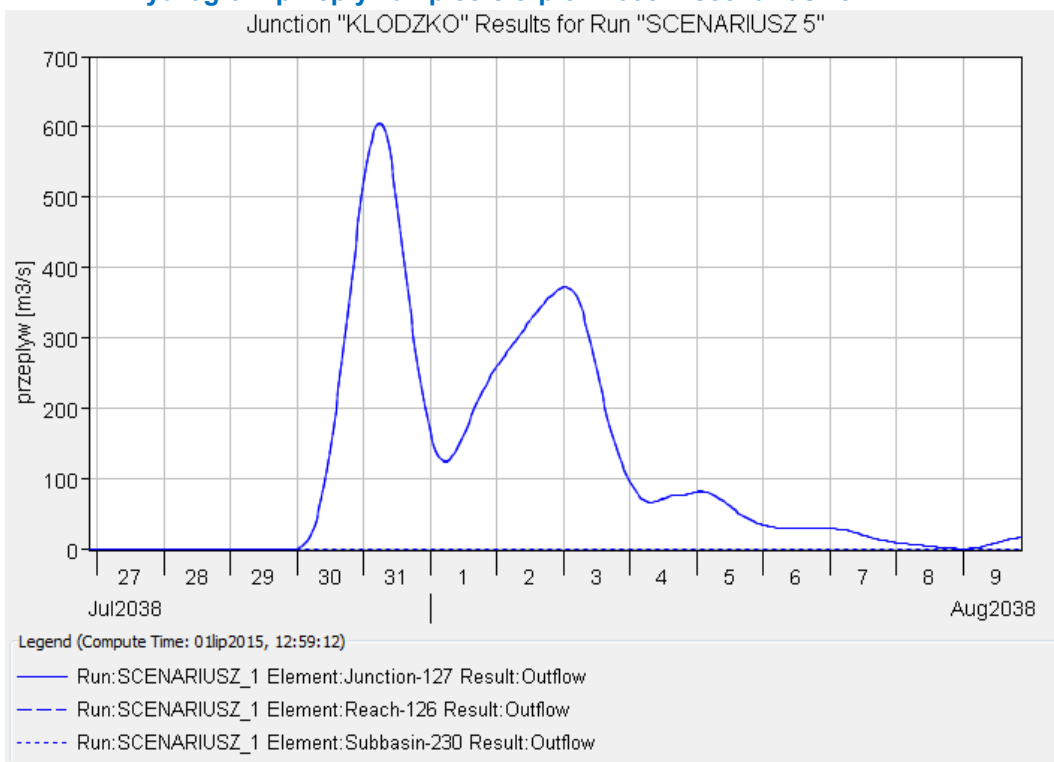
Rysunek nr 28 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nisy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu sierpień 2049 r. scenariusz 3



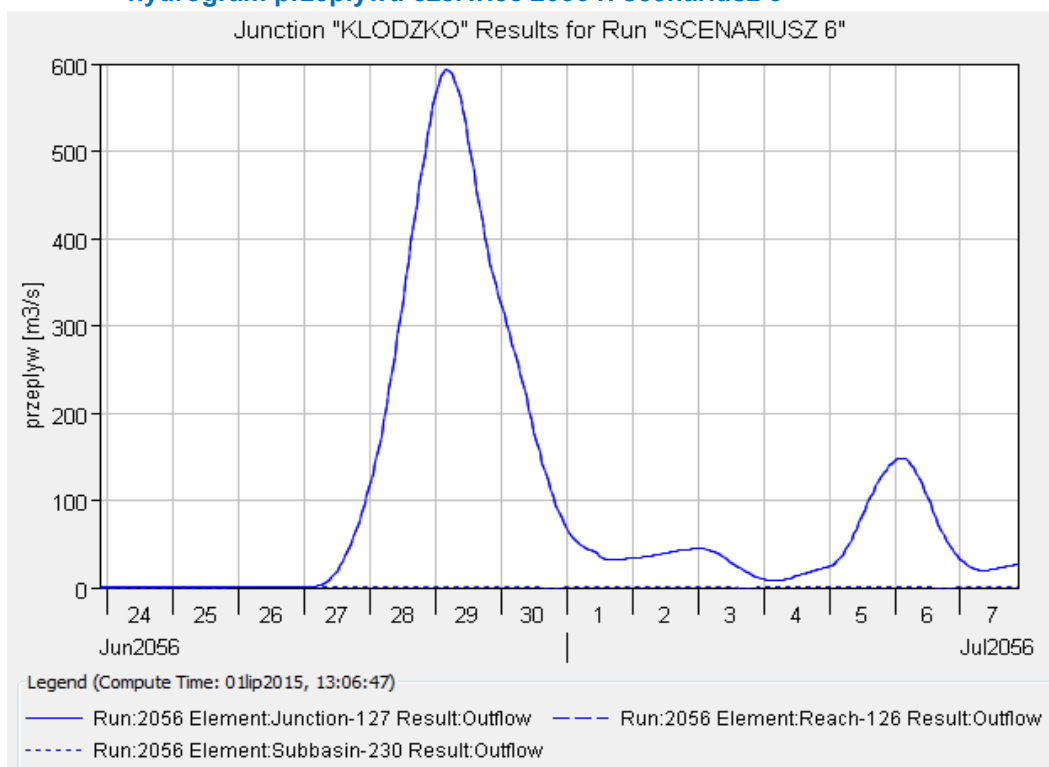
Rysunek nr 29 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nisy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu czerwiec-lipiec 2029 r. scenariusz 4



Rysunek nr 30 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nisy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu lipiec-sierpień 2038 r. scenariusz 5



Rysunek nr 31 Wyniki modelu HEC HMS dla zlewni Nysy Kłodzkiej, wodowskazu Kłodzko - hydrogram przepływu czerwiec 2056 r. scenariusz 6



Porównanie hydrogramów odpływu przeprowadzonych symulacji dla prognozowanych opadów oraz dla okresu referencyjnego wskazuje, że przepływ maksymalnych średnio zmniejszył się o 28 %, natomiast objętość wezbrania średnio zmniejszyła się o 3%, tabela 18.

Tabela nr 18 Porównanie odpływów symulowanych dla założonych scenariuszy prognozy opadów oraz okresu referencyjnego

Scenariusz	Epizod opadowy	Przepływ maksymalny Qmax [m ³ /s]	Porównanie przepływu maksymalnego [%]	Objętość wezbrania V [mln m ³]	Porównanie objętości wezbrania [%]
referencyjny	lipiec 1997 r.	985,1	-	173,7	-
1	czerwiec 2031 r.	894,4	-9	288,1	66
2	lipiec 2029 r.	1152,6	17	241,7	39
3	sierpień 2049 r.	584,5	-41	100,9	-42
4	czerwiec 2029 r.	397,7	-60	121,6	-30
5	sierpień 2038 r.	605,5	-39	136,9	-21
6	czerwiec-lipiec 2056 r.	593,2	-40	118,3	-32
średnia			-28		-3

Przyjęte założenia modelowania dotyczące prognozowanych opadów oraz pracy urządzeń zrzutowych, a także brak uwzględnienia przyszłych zmian użytkowania w zlewni wpływają na jakość uzyskanych wyników symulacji. Zwiększenie kroku czasowego z 1 godziny do 1 doby, redukcja liczby stacji opadowych z 22 do 14 skutkują zmianą rozkładu przestrzennego i czasowego opadów w zlewni, co powoduje pogorszenie wyników symulacji odpływu. Na niepewność wyników modelowania opad-odpływ nakłada się wielkość błędu modeli klimatycznych – stopień przeszacowania wartości minimalnych i niedoszacowania maksimum.

Uzyskane wyniki nie dają zatem podstaw do jednoznacznego określenia zmiany w odpływie ze zlewni Nisy Kłodzkiej po wodowskaz Kłodzko dla prognozowanych opadów.

Podsumowanie 7

7. Podsumowanie

Zastosowanie modeli opad-odpływ do oceny zagrożenia powodziowego wydaje się odpowiednim narzędziem. Należy jednak mieć świadomość, że powinny być prowadzone badania regionalne, które uwzględniają zarówno zmianę warunków hydro-meteorologicznych, ale również zmiany w użytkowaniu gruntów oraz zmiany zagospodarowania przestrzennego. Wyniki prowadzonych symulacji obarczone są niepewnością, trudną do oszacowania.

W procesie modelowania typu opad-odpływ uwzględniających zmiany klimatu i związany z nimi wpływ na elementy środowiska, należy:

- 1) postawić cel, i w tym kontekście zdefiniować ważne procesy hydrologiczne, dobrać odpowiednie skale czasowe i przestrzenne danych wejściowych oraz uwzględnić rolę anomalii hydrologicznych,
- 2) sprawdzić, czy wybrany model opad-odpływ zawiera/reprezentuje odpowiednie procesy, które mają być modelowane, dla spełnienia założonego celu,
- 3) skalibrować i zweryfikować model na danych obserwowanych,
- 4) ocenić jakość modelu, poprzez porównanie wyników modelu uzyskanego na podstawie aktualnych warunków brzegowych dla danych obserwowanych z wynikami modelu dla prognozowanych danych,
- 5) sprawdzić tendencje zmian klimatu (scenariuszy), zmian zagospodarowania terenu oraz rozwoju zagospodarowania przestrzennego w skalach czasowych i przestrzennych dostosowanych do zlewni,
- 6) ocenić niepewność całego systemu modelowanego, w tym zarówno niepewności w ramach procedury modelowania opad-odpływ (dane, proces, parametry) oraz niepewność przyjętych scenariuszy (warunek brzegowy).

Spełnienie tak postawionych założeń, pozwala na stwierdzenie, że modele opad-odpływ mogą służyć jako odpowiednie narzędzia do oceny skutków zmian klimatu. Jednak, wyniki obarczone są dużą niepewnością, co ma ogromne znaczenie w dostarczaniu odpowiedzi.

Z punktu widzenia symulacji ekstremalnych zdarzeń w zlewniach buduje się modele zdarzeniowe, w których wprowadza się opad z odpowiednim krokiem czasowym, np. 1 godz. Zastosowanie innego kroku czasowego powoduje zwiększenie niepewności modelowania (niepewność danych wejściowych, parametrów procesu), na którą nakłada się niepewność związana z przyjętym scenariuszem zmiany klimatu.

Wnioski 8

8. Wnioski

Podstawę oceny wpływu zmian klimatu na wielkość odpływu ze zlewni stanowią scenariusze zmian klimatu, które zostały opracowane na podstawie dobowych wartości temperatury i sum opadu. Analizę przeprowadzono na podstawie obliczonych wartości temperatury i opadów z ich indeksów klimatycznych. Szacowanie zostało przeprowadzone na podstawie wiązki symulacji klimatu przy wykorzystaniu modeli regionalnych z różnymi warunkami brzegowymi. Modele nie opisują rzeczywistości dokładnie. Wartości obserwowane różnią się zawsze od symulowanych. Symulowany klimat jest bardziej wygładzony niż rzeczywisty, przejawia się przeszacowaniem minimów (wartości minimalne z symulacji są wyższe od obserwowanych) i niedoszacowaniem maksimów (wartości maksymalne z symulacji są niższe od obserwowanych), co ma zasadniczy wpływ na wielkość odpływu ze zlewni wyznaczonego na podstawie projekcji zmian klimatu.

Analiza zmienności czasowej wskazuje ponadto, że maksymalna 5-dniowa suma opadu dla półrocza letniego wykazuje niewielką tendencję wzrostową, poza scenariuszem 4. Dla stacji wyżej położonych, o średniej rocznej sumie opadów około 1000 mm (Międzygórze), obserwuje się znaczne zmniejszenie zarówno wielkości maksymalnej rocznej sumy 5-dniowej opadu, jak i częstości występowania opadów o sumie 5-dniowej powyżej 200 mm, przy jednoczesnym zwiększeniu częstości występowania zdarzeń o maksymalnej sumie 5-dniowej 100-200 mm. Dla stacji niżej położonych (Kłodzko) według większości scenariuszy klimatycznych (poza scenariuszem 4), prognozowany jest wzrost zarówno wielkości maksymalnej rocznej 5-dniowej sumy opadu, jak i częstości występowania opadów o sumie 5-dniowej powyżej 75 mm. Ponadto analiza rozkładów opadów, a dokładnie wartości wybranych percentyli wskazuje na zmianę rozkładu przestrzennego opadów. Rozkład 5-dniowej sumy opadów dla prognozowanych opadów zgodnie z zastosowanymi scenariuszami ulega zmianie. Prognozuje się wyższe sumy opadów dla stacji niżej położonych, na których dotychczas notowane są stosunkowo niskie sumy opadów, natomiast dla stacji położonych wyżej – prognozowane są niższe sumy opadów, podczas gdy obecnie dla tych stacji charakterystyczne są wysokie sumy opadów. Można zatem przypuszczać, że zmiana rozkładu przestrzennego opadów wpływa na zmianę rozkładu obszarów zagrożenia powodziowego, wzrośnie znaczenie obszarów o dzisiejszym mniejszym zagrożeniu powodziowym. Może to skutkować również zmianą odpływu i rozkładem obszarów zagrożonych powodziami.

Analiza odwzorowania okresu referencyjnego przez modele klimatyczne wskazuje na prawdopodobne zaniżenie prognozowanego odpływu, jednocześnie prognozowane jest zwiększenie częstości pojawiania się opadów powodziowych oraz nieznaczne katastrofalnych. Przeprowadzone symulacje, z uwagi na jakość oraz ilość danych wejściowych (zastosowanie kroku czasowego 1 doba, 22 stacje do kalibracji modelu opad-odpływ zredukowane do 14 stacji dla symulacji zmian klimatu), a przede wszystkim dużą niepewność wyników modelowania klimatycznego, nie dają jednoznacznie podstaw do określenia ilościowej zmiany odpływu i wnioskowania na temat wielkości obszarów zagrożenia powodziowego. Powyższe wnioski dają podstawę do stwierdzenia, że zagrożenie powodziowe wskutek występowania zdarzeń ekstremalnych (opadów katastrofalnych) będzie mniejsze podczas gdy zagrożenie powodziowe wywołane deszczami o mniejszej intensywności może wzrosnąć.

Ze względu na dużą niepewność prognozowanych sum dobowych opadów, brak możliwości uwzględnienia takich elementów jak zmiany zagospodarowania przestrzennego oraz użytkowania terenu, należy postawić pytanie, czy zasadne jest przeprowadzanie podobnych analiz dla innych zlewni, zwłaszcza że zlewnia Nysy Kłodzkiej reprezentuje obszar zróżnicowany pod względem położenia (górski, podgórski), o dużym ryzyku powodziowym oraz obszar na którym prognozowane zmiany sum opadów są znaczące. Wobec powyższego prowadzenie eksperymentu na innych zlewniach nie daje gwarancji uzyskania jednoznacznej odpowiedzi o ilościowej zmianie odpływu dla prognozowanych zmian klimatu.

Literatura 9

9. Literatura

1. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. (eds.), 2008. „Climate Change and Water”. Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.
2. Bronstert A., 2004. “Rainfall-runoff modelling for assessing impacts of climate and land-use change”, *Hydrol. Process.* 18, 567-570.
3. Covey C., Achutarao K.M., Cubasch U., Jones P.D., Lambert S.J., Mann M.E., Phillips T.J., Taylor K.E. 2003. “An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)”. *Global and Planetary Change*. Vol. 3. s. 103–133. Lehner B., Czisch G., Vassolo S., 2005. The impact of global change of the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energ. Policy*, 33, pp. 839-855.
4. Gutry-Korycka M., Rotnicka J., 1998. “The hydrological regime of rivers in the light of scenarios of global climatic change”. *Geographia Polonica* 71.
5. Kuchar L., Iwański S., Jelonek L., Szalińska W., 2012. „Modelowanie przepływów w rzece Kaczawa w perspektywie lat 2030 i 2050 (półrocze letnie)”. *Wyd. ITP, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t.12 z. 2 (38), ss 143-147.
6. Kundzewicz Z. W., Kowalczak P., 2008. „Zmiany klimatu i ich skutki”. Wydawnictwo Kurpisz, Poznań.
7. Kundzewicz Z. W., „Ciepło, coraz cieplej, 2001a”. *Wiedza i Życie* 7/01, ss.50–53.
8. Kundzewicz Z. W., „Czy wystarczy wody? 2001b”. *Aura* 4/01, ss.19–21.
9. Kundzewicz Z. W., Przymusińska I., 2002. „Zmiany temperatury powietrza w Polsce 1961–2000. Fakty i interpretacja”. *Wiadomości IMGW*, 4, ss.63–72.
10. Kundzewicz Z. W., „Recepta na wiek niedostatku wody, 2001c”. *Aura* 6/01, ss. 8–10.
11. Kundzewicz Z. W., 2002. „Czy ryzyko powodzi ulega zmianom? W: Detekcja zmian klimatu i procesów hydrologicznych”. Pr. zb. pod red. Kundzewicza i Radziejewskiego. ZBŚRiL PAN, Poznań.
12. Kundzewicz Z. W., Przymusińska I., 2002. „Ocieplenie klimatu Polski? W: Detekcja zmian klimatu i procesów hydrologicznych”. Pr. Zb. Pod. Red. Kundzewicza i Radziejewskiego. ZBŚRiL PAN, Poznań.
13. Lehner B., Czisch G., Vassolo S., “The impact of global change of the hydropower potential of Europe: a model-based analysis”. *Energ. Policy*, 33, 2005, pp. 839-855.
14. Liszewska M., Osuch M., 1999. „Analiza wyników globalnych modeli klimatu dla Europy Środkowej i Polski. [W:] Zmiany i zmienność klimatu Polski. Ich wpływ na gospodarkę, ekosystemy i człowieka”. *Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej*, Łódź, 4–6 XI 1999, ss.129–142.
15. MacDonald G., Sertorio L. (red.) 1991. „The global climate and ecosystems change”. New York. Plenum Press. ISBN 978-0306437151 ss. 268.

16. Maciejewski M., Ostojski M., Tokarczyk T. (red.) 2011. „Dorzecze Odry monografia powodzi 2010”. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa
17. Mućka A., 2000. „Modelowanie wpływu zmian klimatu na proces odpływu i zasoby wodne zlewni”. Rozprawa doktorska (maszynopis), SGGW, Warszawa.
18. Okruszko T., Kijańska M., 2009. „Zmiany klimatu a gospodarowanie wodami”. Wyd. Instytut na rzecz Ekorozwoju, W: Eko-Herkules. Program aktywnej edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju, Warszawa.
19. Pawlak W., 1997. Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego. Uniwersytet Wrocławski, Pracownia Atlasu Dolnego Śląska, Polska Akademia Nauk – Oddział we Wrocławiu, Wrocław
20. Rosenzweig C. 1989. “Global climate change: Predictions and observations”. American Journal of Agricultural Economics. Vol. 71 s. 1265–1271.
21. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (red.) 2007. “Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. Cambridge. Cambridge University Press ss. 996.
22. Szalińska W., Urban G., Otop I., 2008. “Próba oszacowania wysokości opadów wywołujących wezbranie letnie w dorzeczu środkowej Odry”. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, nr 9/2008, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, s. 227-238

