

UNIWERSYTET ŚLĄSKI W KATOWICACH
WYDZIAŁ NAUK PRZYRODNICZYCH
INSTYTUT NAUK O ZIEMI

mgr inż. Karol Mikołajewski

Hietogramy wzorcowe do modelowania
miejskich systemów odwodnienia w Polsce

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:
Dr hab. Marek Ruman, prof. UŚ

Opiekun pomocniczy:
Prof. dr hab. inż. Paweł Licznar
RETENCJAPL sp. z o.o.

Sosnowiec, 2024 rok

Autor składa serdeczne podziękowania

*Promotorowi dr. hab. Markowi Rumanowi, prof. UŚ
za możliwość udziału w programie „Doktorat wdrożeniowy”,
pomoc udzieloną w czasie studiów, wsparcie i mobilizację na każdym etapie.*

*Opiekunowi pomocniczemu prof. dr. hab. inż. Pawłowi Licznarowi
za inspirację, nieocenioną pomoc, wsparcie merytoryczne
i wskazówki podczas prac badawczych.*

*Prezesowi firmy RETENCJAPL mgr. Tomaszowi Grochowskiemu
za stworzenie warunków do realizacji projektu
i wdrożenie wyników badań.*

*Mojej Żonie Kamili i Naszym Synom
za ogromne wsparcie i wyrozumiałość.*

*Wszystkim przyjaciółom i współpracownikom,
dzięki którym udało mi się osiągnąć ten cel.*

Spis treści

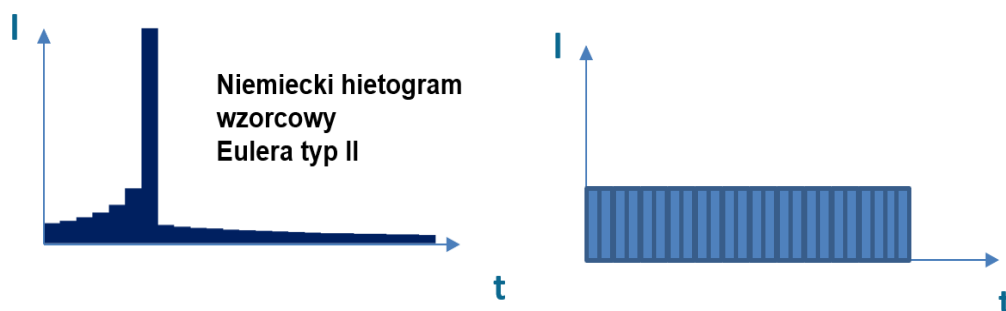
1. Wstęp.....	5
2. Cele pracy.....	9
2.1. Cel naukowy rozprawy doktorskiej.....	9
2.2. Cel wdrożeniowy badań	9
3. Przedmiot badań.....	10
4. Metodyka.....	13
4.1. Adaptacja metodyki.....	13
4.2. Wydzielanie opadów nawalnych dla sieci 100 lokalizacji na terenie całej Polski... 13	13
4.3. Normalizacja hietogramów	14
4.4. Podział znormalizowanych opadów na skupienia.....	14
4.5. Regionalizacja uzyskanych hietogramów	16
5. Wyniki badań i dyskusja	17
5.1. Wydzielone opady nawalne.....	17
5.2. Normalizacja hietogramów i podział na skupienia	21
5.3. Regionalizacja zbiorów hietogramów wzorcowych	30
6. Wdrożenie	33
6.1. Generator hietogramów wzorcowych	35
6.2. Aplikacja do transformacji systemu odwodnienia w model hydrodynamiczny..... 41	41
6.3. Prowadzenie symulacji z użyciem silnika obliczeniowego SWMM	55
6.4. Testy transformacji projektu w model oraz niezawodności symulacji	56
7. Podsumowanie i wnioski.....	59
Spisy i wykazy	62
Literatura	62
Wykaz tabel.....	64
Wykaz rysunków	65
Streszczenie w języku angielskim.....	69
Streszczenie w języku polskim	70

Publikacje wchodzące w skład rozprawy

1. **MIKOŁAJEWSKI Karol**, RUMAN Marek, KOSEK Klaudia, GLIXELLI Marcin, DZIMIŃSKA Paulina, ZIĘTARA Piotr, LICZNAR Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 829, p. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154588>; 200 punktów MNiSW; Journal IF 8,2 (2023)
2. **MIKOŁAJEWSKI Karol**, STACH Alfred, KUNDZIEWICZ Zbigniew, RUMAN Marek, KOSEK Klaudia, LICZNAR Paweł, 2023, Heavy storms and their model hyetographs in Poland, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>; 140 punktów MNiSW; Journal IF 5,8 (2023); 5-year Journal IF 6,2 (2023)

1. Wstęp

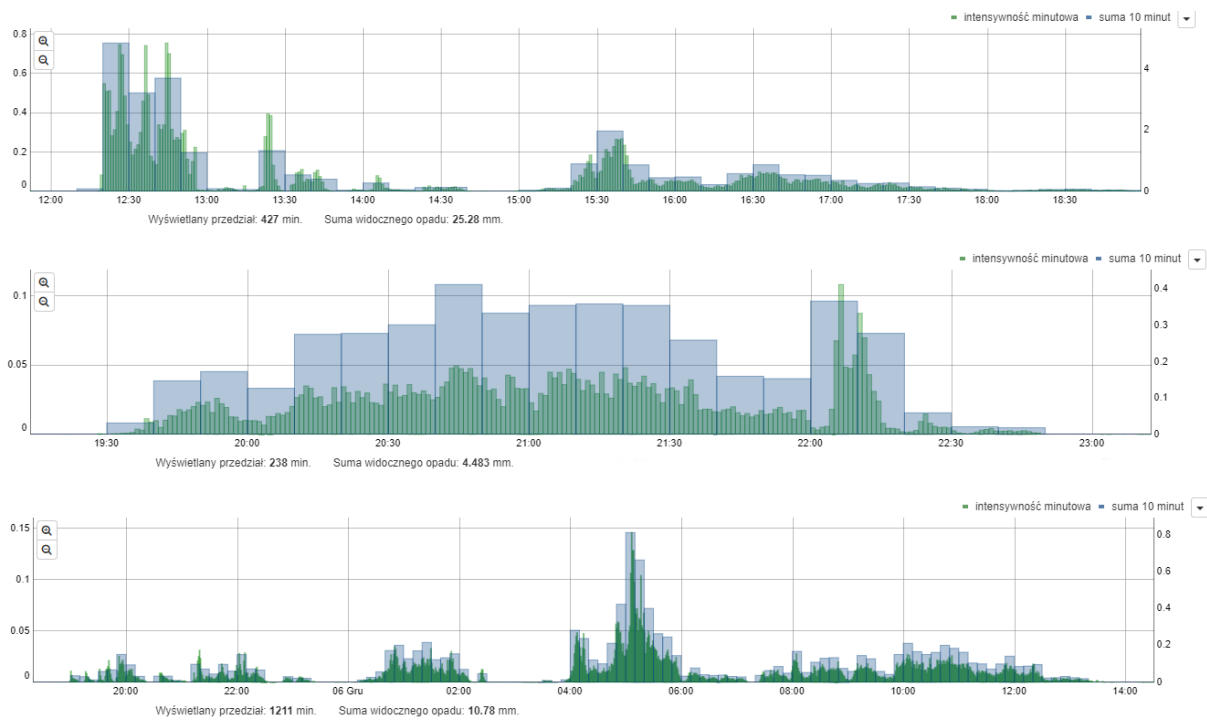
Na początku lat 70-tych XX wieku została zaprezentowana pierwsza wersja modelu komputerowego dla systemów kanalizacji deszczowej. Pod nazwą SWMM (Storm Water Management Model) (Wikipedia, 2024) otrzymaliśmy proste narzędzie pozwalające na prowadzenie symulacji odpływu wód opadowych z systemów kanalizacyjnych dla pojedynczych deszczy, które z biegiem lat było rozwijane i pozwoliło na symulacje ciągłe, w oparciu o różne szeregi czasowe deszczy. Podczas prób prowadzenia skomplikowanych symulacji z wykorzystaniem wielu rzeczywistych ciągów opadowych zarejestrowanych przez stacje meteorologiczne wyposażone w deszczomierze, szybko okazało się, że wydajność obliczeniowa ówczesnie dostępnych komputerów klasy PC nie jest wystarczająca. Symulacje dla wielu deszczy trwały bardzo długo, a oprogramowanie bardzo często generowało błędy lub przerywało obliczenia ze względu na niewystracające zasoby sprzętowe. Sytuacja ta oraz często napotykanym drugim problemem związanym po prostu z brakiem danych pomiarowych, które wykorzystane mogłyby być do takich symulacji, spowodowała, że w modelowaniu zaczęto przyjmować pojedynczy deszcz wzorcowy lub grupę deszczów wzorcowych. Zakładano, że takie wzorce dla różnych czasów trwania i różnych prawdopodobieństw mogą być traktowane jako wiarygodne dane wejściowe zasilające modele projektowanej kanalizacji deszczowej. Wzorce takie otrzymuje się, posługując się tabelą natężeń deszczy miarodajnych, z których dla określonego prawdopodobieństwa wystąpienia deszczu i czasu jego trwania odczytywana jest szacowana warstwa sumaryczna deszczu syntetycznego, które rozkładana jest potem w czasie za pomocą przyjmowanej zwykle metody deterministycznej. W praktyce, w Polsce, zgodnie z niemiecką wytyczną ATV-118 (ATV 118, 1999), często stosuje się metodę rozkładu według modelu Eulera typ II lub stałej wartości natężenia w czasie, potocznie nazywane opadami „blokowymi”.



Rysunek 1. – Stosowane hitogramy wzorcowe
a) rozkład Eulera II b) opad „blokowy” (opracowanie własne)

Przyjmowane w taki sposób dystrybucje opadu w czasie dalekie są, w większości przypadków, od typowych rejestrowanych hietogramów deszczy naturalnych, których przykłady przedstawiono poniżej.

Bardzo szeroki zakres, w którym zastosowanie swoje znalazł deszcz modelowy tworzony w sposób opisany powyżej powoduje, że coraz częściej pojawia się pytanie, czy takie rozwiązanie jest uzasadnione. Metoda przyjmowania jednego deszczu jako „wzorca” dla obciążania opadem atmosferycznym nowoprojektowanych lub modernizowanych układów kanalizacji deszczowej może przynieść nieporwane wyniki. Odgórne założenia, że na każdy analizowany system pada deszcz o identycznym przebiegu w czasie, jest dużym uogólnieniem. Z prowadzonych obserwacji meteorologicznych wynika, że występujące w rzeczywistości deszcze mają różny przebieg (rozkład) w czasie, a od ich charakterystycznego kształtu zależy realna odpowiedź istniejącego lub modelowanego układu kanalizacyjnego.



Rysunek 2. – Hietogramy trzech przykładowych deszczy zarejestrowanych na stacji Katowice (opracowanie własne na podstawie danych z aplikacji RainBrain)

Aktualnie już duża część warsztatu powiązanego z projektowaniem i wymiarowaniem elementów systemów odwodnieniowych w Polsce i na świecie coraz częściej opiera się na

wynikach uzyskiwanych w oprogramowaniu do modelowania takich układów. Wynik modelowania jest tym dokładniejszy, im dokładniejsze są dane wejściowe wykorzystywane do prowadzenia obliczeń matematycznych. Projektanci do tej pory borykali się z dwoma podstawowymi problemami w pozyskiwaniu właśnie tych informacji wejściowych, czyli aktualnymi danymi o natężeniach deszczy oraz o dystrybucją tych natężeń w czasie. Problem pierwszy (brak aktualnych i lokalnych wartości natężeń deszczy) został poniekąd rozwiązany przez stworzenie Atlasu PANDa (Licznar i in., 2020). Atlas ten został stworzony przy współpracy firmy RETENCJAPL i Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB w Warszawie. Problem drugi, czyli lokalne wzory dystrybucji natężeń deszczu w czasie, dalej pozostawał nierozwiązany. Celem badań prowadzonych podczas prac nad doktoratem było stworzenie bazy danych lokalnych hietogramów wzorcowych (lokalnych wzorów dystrybucji natężeń deszczu w czasie) oraz udostępnienie jej w formie narzędzia inżynierskiego za pomocą aplikacji internetowej. Wydaje się, że takie podejście do rozwiązania problemu pozwoli na błyskawiczny dostęp do lokalnych zbiorów wzorców opadów, których stosowanie umożliwi modelowanie na podstawie aktualnych i lokalnych wartości opadów zagregowanych do reprezentacyjnych zbiorów usprawniających cały proces oraz skracających znacznie czas obliczeń zwiększając dokładność wyniku. Aktualny trend związany z digitalizacją narzędzi pokazuje, że takie podejście do modernizacji i poprawy warsztatu projektowego ma sens oraz sprawdza się w realnym życiu. Narzędzia udostępniane w ten sposób stają się powszechnie użytkowane, a niektóre z nich wchodzą do standardów użytkowania w poszczególnych obszarach inżynierii. Ze względu na dość duży obszar badania (terytorium całego kraju), a także konieczność przeanalizowania ogromnej ilości danych, zdecydowano o podziale całego zadania na dwa etapy. Etap I – przeanalizowanie zjawiska w skali lokalnej i etap II, który został zrealizowany z wykorzystaniem stworzonych narzędzi oraz wniosków z etapu I i objął terytorium całego kraju. Etap pierwszy zakłada analizę danych pochodzących z obszaru tylko jednego miasta. Na miasto pilotażowe wybrany został Kraków, ze względu właśnie na zgromadzoną przez Wodociągi Miasta Krakowa historię danych opadowych. Podczas prac badawczych prowadzonych podczas etapu pierwszego, została sprawdzona i zoptymalizowana stworzona metodyka oraz wybrane narzędzia pracy. Wnioski wyciągnięte podczas pracy posłużyły do realizacji etapu II.

Zagadnienie, które zostało zbadane, oraz jego wyniki opisane i udostępnione, są ściśle związane z aktualnymi zagadnieniami zmiany klimatu, adaptacją miast do nowych warunków, projektowaniem systemów odwodnieniowych, zielono-niebieską infrastrukturą. W chwili obecnej, przy podejściu do realizacji niektórych z tych zadań, widać potrzebę

usystematyzowania części obszarów, ujednoczenia procedur i unifikacji danych. Wprowadzenie narzędzia, o którym była mowa wcześniej, wydaje się być sensowne nie tylko z powodu możliwości przekazania zainteresowanym aktualnej wiedzy w postaci danych, ale również ze względu na możliwość wprowadzenia do standardów jednolitego procesu, w którym dane takie będą wykorzystywane.



Rysunek 3. – Wynik modelowania hydrodynamicznego przedstawiony na mapie miasta Gliwice (RETENCJAPL)

Prezentowany doktorat wdrożeniowy został oparty prawnie na założeniach tzw. „doktoratów wdrożeniowych” zawartych w ustawie z dnia 21 kwietnia 2017 roku o zmianie ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2017 r. poz. 859). Tego typu rozwiązanie, mające na celu umożliwienie prowadzenia studium doktoranckiego we współpracy pomiędzy jednostkami naukowymi a przedsiębiorcami, zostało zaczerpnięte z doświadczeń państw zachodnich.

2. Cele pracy

2.1. Cel naukowy rozprawy doktorskiej

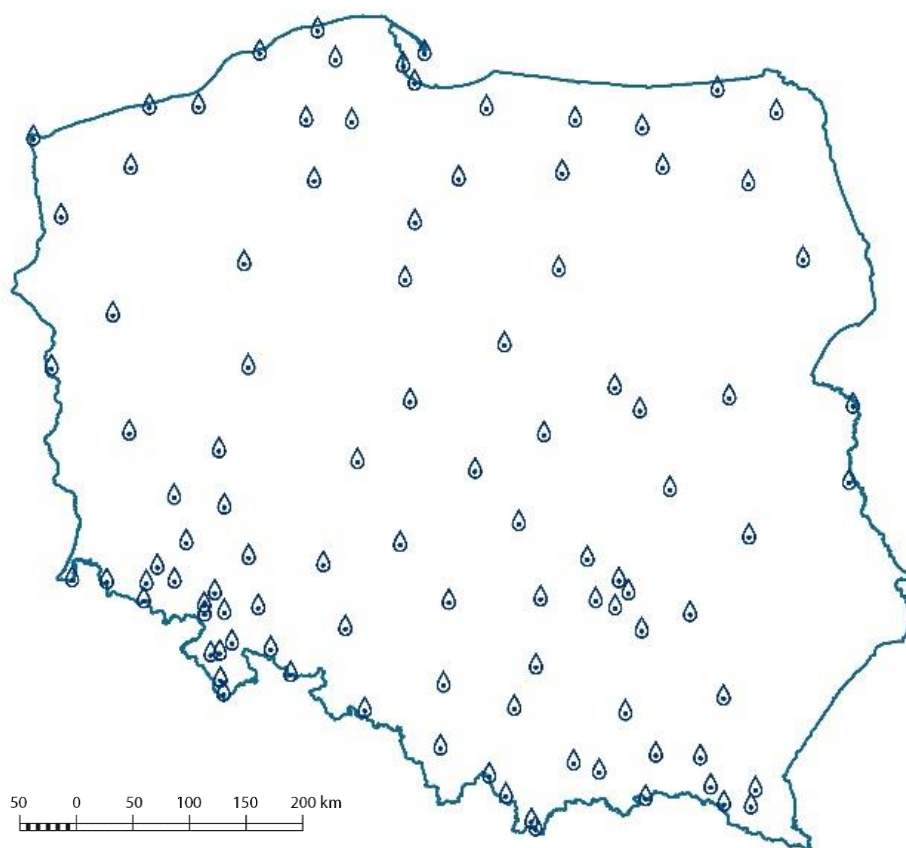
Podstawowym celem naukowym realizowanym podczas rozprawy doktorskiej pt. „Hietogramy wzorcowe do modelowania miejskich systemów odwodnienia w Polsce” było stworzenie i sprawdzenie metodyki pozwalającej na obiektywną klasyfikację oraz grupowanie deszczy do kilku wzorców reprezentujących wszystkie analizowane deszcze. Wszystkie badania wykonano na bazie danych projektu PANDa, która stworzona została podczas projektu realizowanego wspólnie przez firmę RETENCJAPL sp z o.o. oraz Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB w Warszawie (Licznar i in., 2020). Baza ta zawiera informacje o opadach zgromadzone w Polsce na 100 stacjach meteorologicznych w latach 1986-2015. Podczas badań (Mikołajewski i in., 2022) stworzony i opisany został pełen proces przygotowania i przetworzenia wstępnego danych, które potem, za pomocą algorytmów analizy skupień, zostały przeszukane i uporządkowane tak, aby można było wnioskować o występowaniu klastrów, a więc grup deszczów o podobnych przebiegach.

2.2. Cel wdrożeniowy badań

Głównym celem wdrożeniowym rozprawy doktorskiej było przygotowanie zestawu hietogramów wzorcowych dla 100 obszarów w Polsce, które wykorzystane będą jako dane wejściowe w aplikacji internetowej wspomagającej wymiarowanie systemów odwodnieniowych w kraju. Aplikacja w formie narzędzia inżynierskiego ma wspierać proces projektowania i modelowania takich systemów. Wyniki uzyskane podczas badań naukowych, udostępnione w sposób pośredni projektantom i inżynierom sanitarnym, w znaczący sposób wpłyną na zwiększenie dokładności prowadzonych obliczeń oraz pomogą w lepszym wymiarowaniu i doborze elementów układów odwodnieniowych. Baza hietogramów wzorcowych umożliwi błyskawiczny dostęp do zbiorów wzorców opadów, których stosowanie podczas prowadzenia symulacji obliczeniowych pozwoli na pracę w oparciu o aktualne i lokalne wartości opadów zagregowanych do reprezentacyjnych zbiorów usprawniających cały proces oraz skracających znacznie czas obliczeń. Można z pewnością stwierdzić, że wprowadzenia takiego narzędzia wpłynie w dużym stopniu na ujednoczenie warsztatu modelowania systemów odwodnieniowych w kraju.

3. Przedmiot badań

Przedmiotem badań była krajowa baza opadów projektu Polskiego Atlasu Natężeń Deszczu (PANDa). Baza została opracowana w latach 2016-2017 i obejmowała dane z trzydziestu lat rejestracji opadów z 100 deszczomierzy w Polsce, w tym stacji synoptycznych (I i II rzędu), stacji klimatycznych (III i IV rzędu) oraz stacji opadowych (V rzędu). Rozmieszczenie stacji na terenie Polski oraz pełna ich lista została przedstawiona poniżej.



Rysunek 4. – Rozmieszczenie deszczomierzy projektu PANDa na mapie Polski (opracowanie własne na podstawie danych z RETENCJAPL)

L.P.	Nazwa stacji	Szerokość geogr.	Długość geograf.	Wys. m n.p.m.	L.P.	Nazwa stacji	Szerokość geogr.	Długość geograf.	Wys. m n.p.m.
1	Baligród Mchawa	49°21'14"	22°17'01"	430	51	Miechów	50°21'46"	20°01'58"	299
2	Bardo	50°30'33"	16°44'39"	320	52	Międzylesie	50°09'12"	16°40'15"	450
3	Białystok	53°06'26"	23°09'44"	148	53	Mikołajki	53°47'21"	21°35'23"	127
4	Biebrza	53°39'02"	22°34'42"	115	54	Mława	53°06'15"	20°21'40"	147
5	Biecz-Grudna	49°44'07"	21°17'44"	285	55	Namysłów	51°03'59"	17°43'00"	150
6	Bielsko-Biała	49°48'29"	19°00'04"	390	56	Niezabyszewo	54°08'18"	17°25'24"	160
7	Bodzentyn	50°56'49"	20°57'05"	270	57	Nowy Sącz	49°37'38"	20°41'19"	292
8	Bogatynia	50°53'59"	14°58'50"	295	58	Olsztyn	53°46'07"	20°25'17"	133
9	Bolków	50°55'30"	16°05'55"	310	59	Opole	50°37'37"	17°58'08"	163
10	Chojnice	53°42'55"	17°31'57"	164	60	Otmuchów	50°28'20"	17°09'59"	210
11	Chwałkowice	51°26'54"	16°36'47"	180	61	Piła	53°07'50"	16°44'50"	72
12	Cisów	50°45'31"	20°54'10"	326	62	Płock	52°35'18"	19°43'33"	106
13	Częstochowa	50°48'43"	19°05'30"	294	63	Polanica Zdrój	50°25'31"	16°31'06"	390
14	Długopole	50°14'59"	16°38'00"	365	64	Polkowice	51°30'02"	16°03'22"	160
15	Dobrogoszcz	50°45'31"	17°01'02"	175	65	Poznań	52°25'00"	16°50'05"	88
16	Dzierżoniów	50°43'11"	16°39'10"	260	66	Prabuty	53°44'22"	19°12'54"	100
17	Elbląg	54°13'24"	19°32'37"	189	67	Pszemno	50°51'14"	16°32'35"	225
18	Gdańsk-Port Północny	54°23'59"	18°41'52"	2	68	Racibórz	50°03'40"	18°11'27"	206
19	Gdynia	54°31'08"	18°33'34"	2	69	Resko	53°45'49"	15°23'36"	52
20	Głucholazy	50°18'08"	17°23'14"	350	70	Rzeszów - Jasionka	50°06'39"	22°02'32"	206
21	Gołdap	54°18'31"	22°16'14"	160	71	Sandomierz	50°41'48"	21°42'57"	217
22	Gorzów	52°44'28"	15°16'38"	71	72	Siedlce	52°10'52"	22°14'41"	152
23	Grudziądz	53°26'15"	18°42'34"	25	73	Skierniewice	51°57'55"	20°09'37"	128
24	Hala Gąsienicowa	49°14'38"	20°00'21"	1523	74	Słubice	52°20'55"	14°37'11"	53
25	Hel	54°36'13"	18°48'43"	1	75	Staszów	50°35'42"	21°11'06"	219
26	Jabłonka	49°28'20"	19°41'45"	614	76	Sulejów	51°21'12"	19°51'59"	188
27	Jelenia Góra	50°54'01"	15°47'20"	342	77	Suwałki	54°07'51"	22°56'56"	184
28	Kalisz	51°46'52"	18°04'51"	137	78	Szczecin	53°23'43"	14°37'22"	1
29	Karpacz	50°46'44"	15°46'10"	575	79	Świder	52°06'57"	21°14'15"	94
30	Katowice	50°14'26"	19°01'58"	278	80	Świeradów Zdrój	50°53'54"	15°21'31"	500
31	Kętrzyn	54°04'02"	21°22'00"	106	81	Świerzawa	51°00'46"	15°54'10"	300
32	Kielce	50°48'38"	20°41'32"	260	82	Święty Krzyż	50°51'34"	21°03'05"	575
33	Kłodzko	50°26'13"	16°36'51"	356	83	Świnoujście	53°55'24"	14°14'32"	5
34	Koło	52°11'59"	18°39'37"	115	84	Tarnów	50°01'48"	20°59'02"	209
35	Kołobrzeg	54°10'57"	15°34'47"	3	85	Terespol	52°04'43"	23°37'19"	133
36	Koszalin	54°12'16"	16°09'19"	33	86	Toruń	53°02'31"	18°35'44"	69
37	Kościerzyna	54°07'43"	17°57'43"	190	87	Ustka	54°35'18"	16°51'15"	3
38	Kozienice	51°33'53"	21°32'37"	123	88	Walim	50°42'10"	16°26'21"	490
39	Kraków - Bielany	50°04'40"	19°47'42"	237	89	Warszawa Bielany	52°16'53"	20°57'48"	98
40	Krosno	49°42'24"	21°46'09"	329	90	Wieluń	51°12'40"	18°33'28"	200
41	Legnica	51°11'33"	16°12'28"	122	91	Wisłoczek	49°30'03"	21°51'56"	520
42	Lesko	49°27'59"	22°20'30"	420	92	Wisłok Wielki	49°22'43"	21°59'57"	540
43	Leszno	51°50'08"	16°32'05"	91	93	Włochów	51°05'56"	20°36'44"	345
44	Lębork	54°33'11"	17°45'25"	39	94	Włodawa	51°33'12"	23°31'46"	177
45	Lidzbark Warmiński	54°08'09"	20°35'10"	90	95	Wrocław	51°06'12"	16°54'00"	120
46	Limanowa	49°41'37"	20°25'06"	515	96	Wymysłów	50°49'53"	20°05'38"	250
47	Lubachów	50°45'50"	16°25'43"	310	97	Wysowa	49°26'17"	21°10'21"	519
48	Lublin	51°13'00"	22°23'35"	238	98	Zakopane	49°17'38"	19°57'37"	855
49	Łeba	54°45'13"	17°32'05"	2	99	Zawoja	49°36'43"	19°31'07"	697
50	Łódź	51°43'06"	19°23'14"	175	100	Zielona Góra	51°55'48"	15°31'29"	192

Tabela 1. – Lista deszczomierzy projektu PANDa (Licznar i in., 2020)

Przygotowanie bazy opadów PANDa opierało się na zapisach analogowych (taśmach pluwiograficznych) poddanych digitalizacji z zastosowaniem metodologii zaproponowanej przez Licznar i in. (2011) oraz zapisach cyfrowych z elektronicznych deszczomierzy. Dane analogowe w postaci taśm pluwiograficznych dotyczyły głównie obserwacji z ciepłego półrocza hydrologicznego (od maja do października), natomiast dane cyfrowe z elektronicznych deszczomierzy zazwyczaj obejmowały już pełne, roczne zapisy. Dane opadowe zarejestrowane w bazie przyjęły formę szeregów czasowych o standardowej rozdzielczości czasowej wynoszącej 1 minutę. Wszystkie serie opadów w bazie zostały zweryfikowane pod kątem dokładności, porównując je z alternatywnymi zapisami opadów i analizując ich strukturę przy użyciu metod badań multifrakalnych. Szczegółowe informacje na temat cyfrowej bazy opadów PANDa i jej weryfikacji można znaleźć w pracach: Burszta-Adamiak i in. (2019) oraz Wilk i in. (2020).

Baza danych zawiera wartości rejestrowane w latach 1986-2015. Ze względu na luki w danych obserwacyjnych, około 2% zasobów bazy zostało uzupełnionych zapisami z wcześniejszych lat (sięgającymi 1980 roku) oraz z późniejszego roku 2016. Około 40% danych z analizowanego okresu w bazie PANDa stanowiły generalnie całoroczne obserwacje z elektronicznych deszczomierzy, a około 60% stanowiły dane analogowe wymagające digitalizacji pluwiografów pochodzących z pluwiografów stosowanych w okresach ciepłego półrocza. W dalszej analizie danych cała przygotowana baza została zaimportowana do aplikacji internetowej RainBrain.

4. Metodyka

4.1. Adaptacja metodyki

Etap I prac badawczych rozpoczęto od adaptacji metodyki podziału znormalizowanych opadów nawalnych na skupienia, zaproponowanej pierwotnie na etapie opracowania koncepcji projektu WaterFolder Connect. Na udostępnionym przez Wodociągi Miasta Krakowa S. A. poligonie 23 deszczomierzy przeprowadzono badania pozwalające na wypracowane rozszerzonej metodyki analizy skupień hietogramów opadów nawalnych, uzupełnionej o obiektywne ustalenie liczby klas, ocenę wyników klasyfikacji oraz profilowanie klastrów. W efekcie analizy zbioru 1806 deszczy nawalnych z Krakowa stwierdzono prawidłowe funkcjonowanie metodyki klasyfikacji hietogramów wzorcowych oraz wykazano, że hietogramy wzorcowe wydzielane z rejestracji deszczomierzy w różnych lokalizacjach wykazują wzajemną zgodność na obszarze dużego miasta. Przeprowadzone badania są prezentowane w publikacji w czasopiśmie *Science of the Total Environment* (Mikołajewski i in., 2022).

4.2. Wydzielanie opadów nawalnych dla sieci 100 lokalizacji na terenie całej Polski

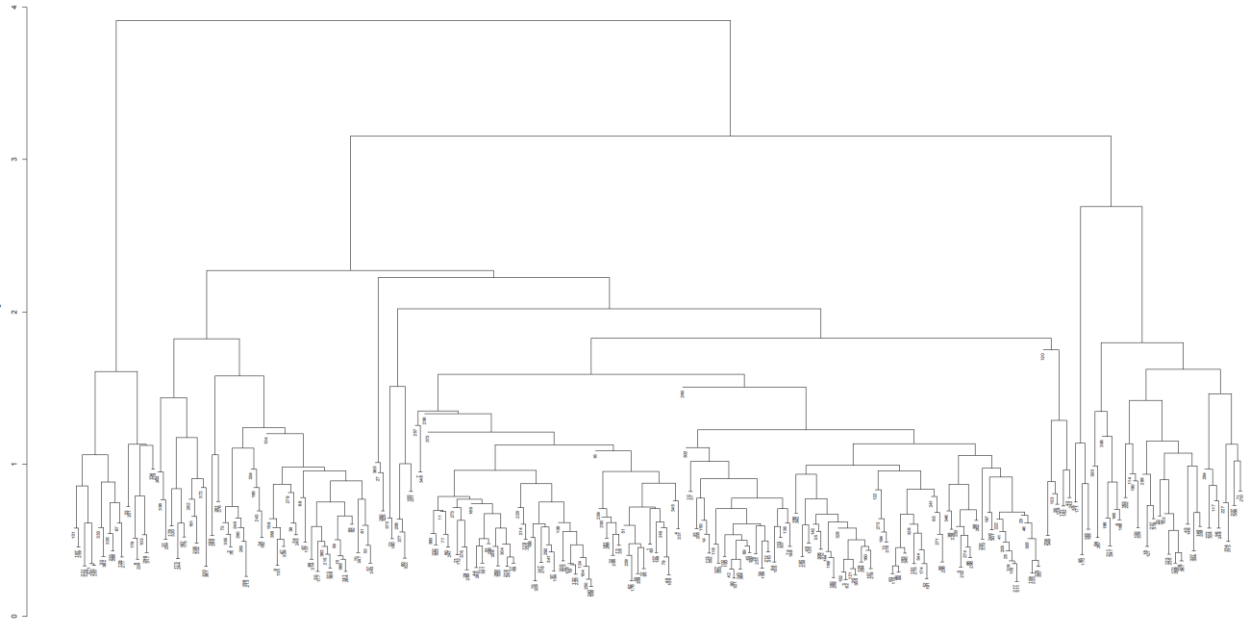
Dla każdej ze 100 stacji wchodzącej w skład cyfrowej bazy projektu Polskiego Atlasu Natężeń Opadów (PANDa) (Wilk i in., 2020) wydzielono z 30-letnich szeregów opadowych o wysokiej rozdzielczości czasowej (nie gorszej od 10 min) zbiory opadów nawalnych. Opady nawalne wydzielono w sposób automatyczny w aplikacji RainBrain (z podłączoną bazą danych projektu PANDa) z wykorzystaniem specjalnie przygotowanej funkcji, uwzględniającej kryteria wyszukiwania opadów nawalnych, zgodne z Komentarzem do ATV-A 118 (Schmitt T. G., 2000) , tj. minimalna wysokość opadu 10 mm i minimalna przerwa między opadami 4 godziny. Dla wszystkich stacji uzyskano reprezentatywne zbiory opadów nawalnych liczące co najmniej 200 zdarzeń opadowych. Niemniej w przypadku trzech stacji konieczne było w tym celu uzupełnienie bazy danych o dodatkowe rejestracje opadów nawalnych z bazy IMGW-PIB dla Poznania z lat 2018 i 2019, dla Biebrzy z 2017 r. i dla Chwałkowic z lat 2016 i 2017. Łącznie wydzielono zatem i przyjęto do dalszych badań 31646 deszczy nawalnych.

4.3. Normalizacja hietogramów

Z uwagi na różniące się czasy trwania i sumaryczne wysokości wydzielonych opadów nawalnych, do dalszej analizy zbiorów, tj. do wzajemnego porównania i do identyfikacji typowych (miarodajnych, wzorcowych) rozkładów w czasie opadów, dokonano podwójnej normalizacji skumulowanych hietogramów. Operację tę przeprowadzono zgodnie z metodyką opisywaną w publikacji Licznara i in. (2017), która odpowiadała metodyce sporządzania hietogramów bezwymiarowych przez Huffa (Huff, 1967). W tym celu dla każdego opadu ustalono całkowity czas trwania i sumaryczną wysokość opadu. Następnie każdy skumulowany hietogram opadu nawalnego o znanym całkowitym czasie trwania dzielono na 100 równych przedziałów czasu. Dla każdego z kolejnych przedziałów ustalano odpowiadający mu skumulowany przyrost opadu. Kolejne skumulowane przyrosty opadów dzielono przez sumaryczną warstwę opadu uzyskując jednostkowe skumulowane przyrosty opadów. W efekcie kształt każdego z deszczów nawalnych był odwzorowany przez hietogram znormalizowany do zakresu od 0 do 100% dla czasu trwania i do zakresu od 0 do 1 (100%) dla warstwy opadu.

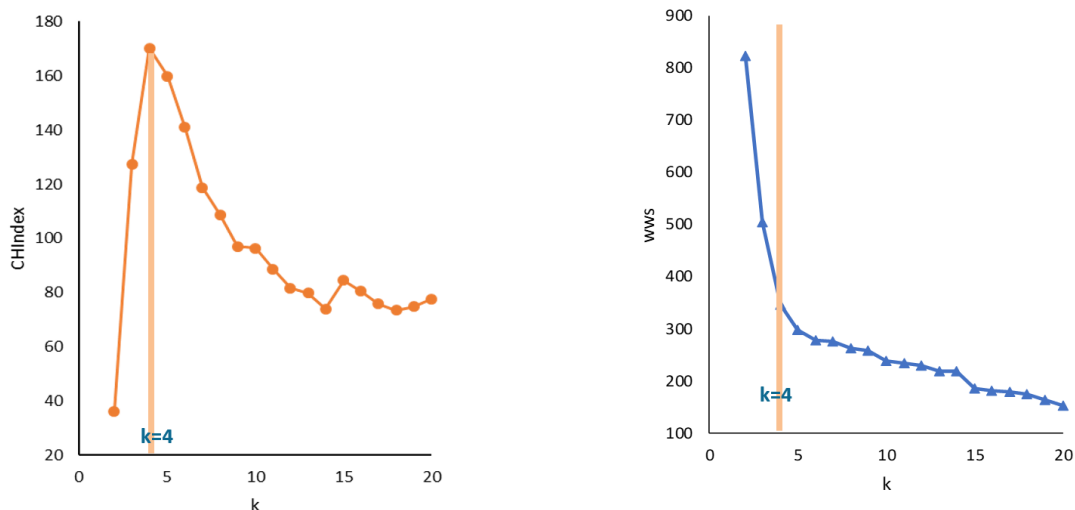
4.4. Podział znormalizowanych opadów na skupienia

Dla wszystkich wydzielonych opadów nawalnych zestawiono ich skumulowane, znormalizowane hietogramy. Następnie, z użyciem metody hierarchicznej aglomeracji, sporządzono dendrogramy podobieństwa przebiegów w czasie opadów w analizowanych zbiorach z poszczególnych deszczomierzy. Na rysunku 5. przedstawiono przykładowy dendrogram otrzymany dla stacji Katowice. Tak przygotowane dendrogramy zostały poddane ocenie eksperckiej w celu usunięcia z nich opadów osobliwych, czyli takich, dla których odległość wiązania względem innych opadów była znacząco większa od pozostałych. Były to głównie opady, które zostały zarejestrowane przez deszczomierz w sposób nieprawidłowy, wynikający z błędnej lub zakłóconej pracy urządzenia.



Rysunek 5. – Dendrogram znormalizowanych opadów dla deszczomierza Katowice (opracowanie własne)

Na kolejnym etapie badań dla poszczególnych stacji obliczono wartości parametru wss (ang. total within sum of squares) oraz indeksu Calińskiego i Harabasza (CHIndex). Przykład takich obliczeń dla deszczomierza z Karpacza jest prezentowany na rysunku 6. Na podstawie analizy wykresów poszukiwano optymalnej, a zarazem maksymalnej liczby skupień k , dla której obserwowane było najbardziej wyraźne zmniejszenie gradientu spadku wartości wss, a zarazem występowało maksimum wartości indeksu CHIndex. W przypadku deszczomierza z Karpacza za optymalną liczbę skupień przyjęto $k=4$. Prawidłowość przyjęcia optymalnej liczby skupień była weryfikowana na etapie grupowania zbiorów hietogramów metodą k -średnich z zastosowaniem metody bootstrap (z 150-krotnym powtórzeniem algorytmu grupowania dla każdego ze zbiorów) poprzez kontrolę osiągnięcia dla każdego ze skupień wartości średniej indeksu Jaccarda na poziomie minimum 0,6. W przypadku niższej wartości indeksu Jaccarda, dla któregośkolwiek ze skupień, zredukowano liczbę skupień i powtarzano obliczenia metodą bootstrap.



Rysunek 6. – Wykresy parametrów CHIndex oraz wws dla deszczomierza w Karpaczu (Mikołajewski i in., 2024)

Na koniec, dla wydzielonych klastrów, wyznaczono uśrednione skumulowane hietogramy bezwymiarowe opadów nawałnych. Ponadto dla każdej ze stacji obliczono częstość występowania opadów nawałnych o rozkładzie w czasie zbliżonym do wyznaczonych hietogramów wzorcowych.

4.5. Regionalizacja uzyskanych hietogramów

Ostatnim etapem było podjęcie próby stworzenia regionów w naszym kraju, w której zestawy hietogramów charakteryzowałyby się taką samą liczbą skupień. W tym celu zestawiono mapę Polski obrazującą zasięgi 18 regionów fizycznogeograficznych i porównano ją z rozkładem ilości skupień uzyskanych wzorców opadów.

5. Wyniki badań i dyskusja

W rozdziale 5. przedstawione zostały wyniki badań, które uzyskano podczas opracowywania lokalnych hietogramów wzorcowych dla obszaru całego kraju. W kolejnych punktach zaprezentowano tylko najważniejsze z nich, które mają największy związek z celem wdrożeniowym badań naukowych. Pełen obraz uzyskanych efektów prac w szczegółach opisany jest w opublikowanych artykułach, które załączone są do niniejszej rozprawy (Mikołajewski i in., 2022 oraz Mikołajewski i in., 2024).

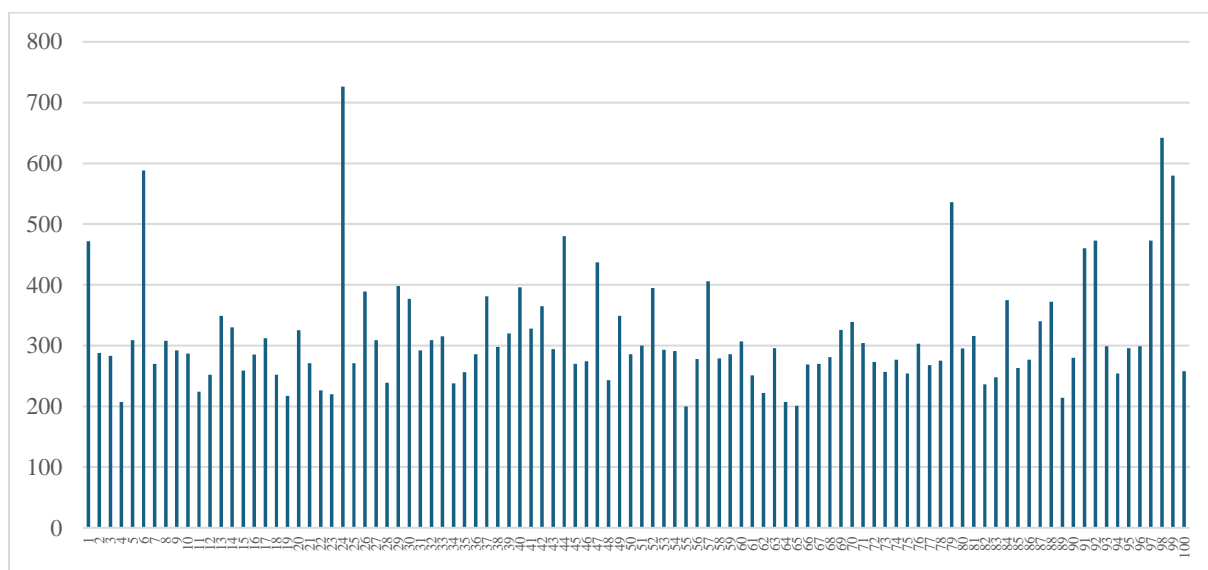
5.1. Wydzielone opady nawalne

W wyniku analizy całego zbioru bazy danych PANDa powiększonego o kilka lat obserwacji dla 3 dodatkowych stacji pomiarowych, wydzielono w sumie 31 646 deszczy spełniających przyjęty warunek deszczu nawalnego. Po wydzieleniu opadów zidentyfikowane zostały deszcze osobliwe (wynikające z nieprawidłowej pracy deszczomierza), które zostały usunięte. Było to łącznie tylko 29 zdarzeń opadowych zarejestrowanych na 11 stacjach. Procedurę identyfikacji i usuwania deszczy osobliwych opisano w dalszej części pracy. Liczba wydzielonych opadów nawalnych (z pominięciem opadów silnie odstających o szczególnie osobliwych wzorcach opadowych) wahała się w zakresie od 200 do 726 w obrębie 100 analizowanych stacji opadowych. Daje to średnią na poziomie 316,5 deszczy na lokalizację i częstotliwość występowania 10,55 deszczu na rok w każdym analizowanym deszczomierzu. Zestawienie wydzielonych dla poszczególnych lokalizacji i liczbę opadów przedstawia poniższa tabela 2.

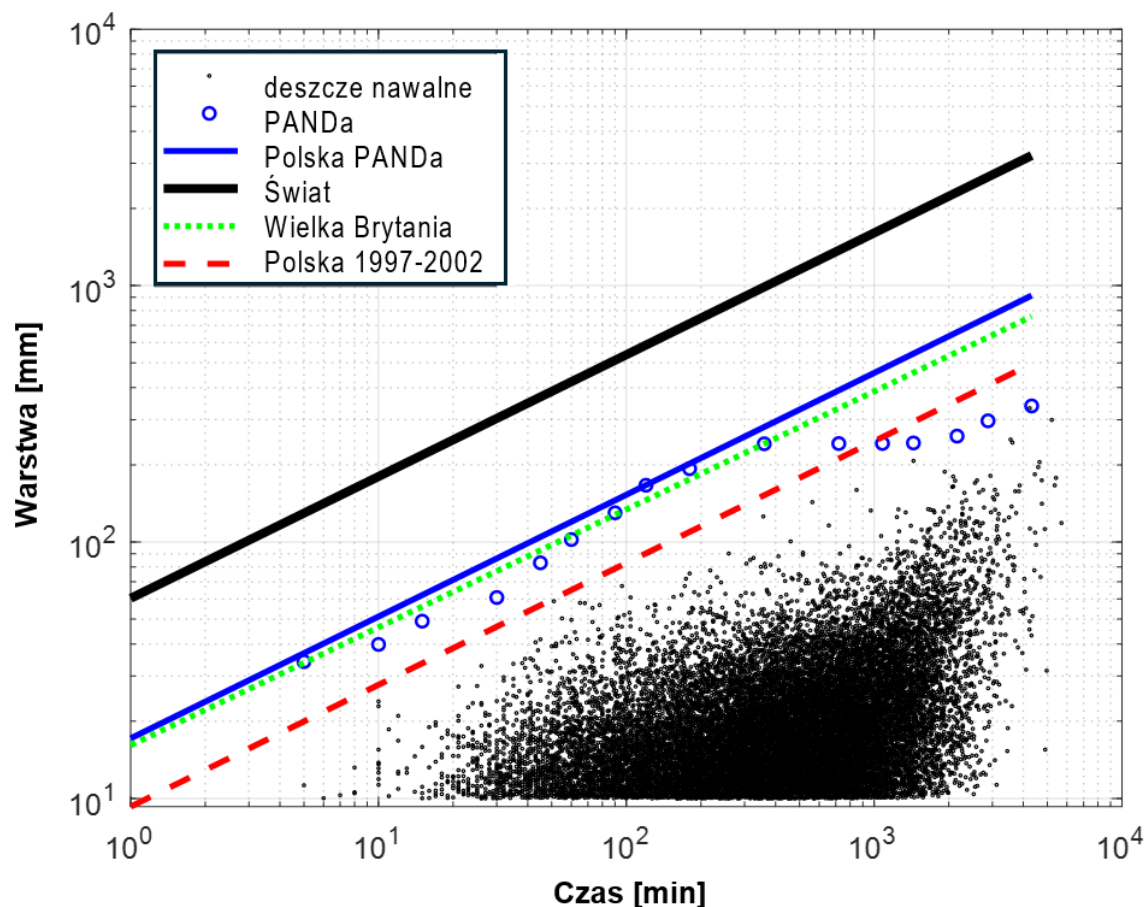
L.P.	Nazwa stacji	Ilość deszczy nawalnych	L.P.	Nazwa stacji	Ilość deszczy nawalnych
1	Baligród Mchawa	472	51	Miechów	300
2	Bardo	288	52	Międzylesie	395
3	Białystok	283	53	Mikołajki	293
4	Biebrza	207	54	Mława	291
5	Biecz-Grudna	309	55	Namysłów	200
6	Bielsko-Biała	588	56	Niezabyszewo	278
7	Bodzentyn	270	57	Nowy Sącz	406
8	Bogatynia	308	58	Olsztyn	279
9	Bolków	292	59	Opole	286
10	Chojnice	287	60	Otmuchów	307
11	Chwałkowice	224	61	Piła	251
12	Cisów	252	62	Płock	222
13	Częstochowa	349	63	Polanica Zdrój	296
14	Długopole	330	64	Polkowice	207
15	Dobrogoszcz	259	65	Poznań	201
16	Dzierżoniów	285	66	Prabuty	269
17	Elbląg	312	67	Pszemno	270
18	Gdańsk-Port Północny	252	68	Racibórz	281

19	Gdynia	217	69	Resko	326
20	Głucholazy	325	70	Rzeszów - Jasionka	339
21	Gołdap	271	71	Sandomierz	304
22	Gorzów	226	72	Siedlce	273
23	Grudziądz	220	73	Skierniewice	257
24	Hala Gąsienicowa	726	74	Słubice	277
25	Hel	271	75	Staszów	254
26	Jablonka	389	76	Sulejów	303
27	Jelenia Góra	309	77	Suwałki	268
28	Kalisz	239	78	Szczecin	275
29	Karpacz	398	79	Świder	536
30	Katowice	377	80	Świeradów Zdrój	295
31	Kętrzyn	292	81	Świerzawa	316
32	Kielce	309	82	Święty Krzyż	236
33	Kłodzko	315	83	Świnoujście	248
34	Koło	238	84	Tarnów	375
35	Kołobrzeg	256	85	Terespol	263
36	Koszalin	286	86	Toruń	277
37	Kościerzyna	381	87	Ustka	340
38	Kozienice	298	88	Walim	372
39	Kraków - Bielany	320	89	Warszawa Bielany	214
40	Krosno	396	90	Wieluń	280
41	Legnica	328	91	Wisłoczek	460
42	Lesko	365	92	Wisłok Wielki	473
43	Leszno	294	93	Włochów	299
44	Lębork	480	94	Włodawa	254
45	Lidzbark Warmiński	270	95	Wrocław	296
46	Limanowa	274	96	Wymysłów	299
47	Lubachów	437	97	Wysowa	473
48	Lublin	243	98	Zakopane	642
49	Łeba	349	99	Zawoja	580
50	Łódź	286	100	Zielona Góra	258

Tabela 2. – Ilość deszczy nawaalnych wydzielonych dla każdej lokalizacji (Mikołajewski i in., 2024)



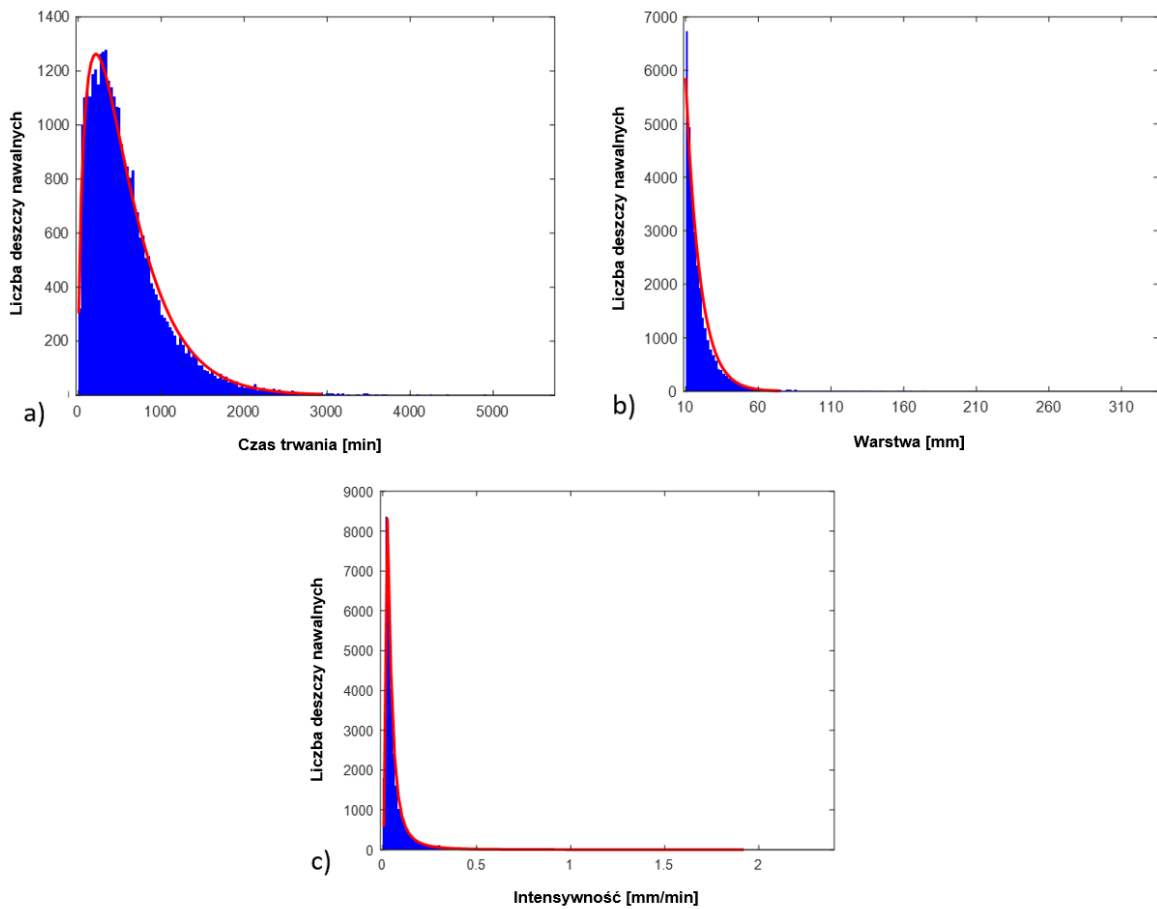
Rysunek 7. – Liczba wydzielonych deszczy dla wszystkich 100 lokalizacji (opracowanie własne)



Rysunek 8. – Zestawienie warstwy i czasu trwania wszystkich wydzielonych deszczy w porównaniu maksymalnych wartości prawdopodobnych opadów (PMP) dla świata, Wielkiej Brytanii i Polski (Mikołajewski i in., 2024)

Zgodnie z oczekiwaniami, całkowite sumy opadów intensywnych nie przekroczyły maksymalnych ilości opadów interwałowych wyznaczonych w ramach realizacji projektu PANDa (Licznar i in., 2020) ani wartości opisanych przez zależność skali maksymalnych prawdopodobnych opadów (PMP) opracowanych przez Banasika i Ostrowskiego (Banasik i Ostrowski, 2010). Można też zauważyć, że są około 3,5 razy niższe niż PMP określone globalnie przez Paulhus w roku 1965 (Paulhus J. L. H., 1965). Histogramy wszystkich 31 646 wydzielonych deszczy prezentujące ich liczbę w funkcji czasu trwania, warstwy i intensywności, przedstawione zostały na rysunku 9. Do opisu tych rozkładów, po przeprowadzeniu testów dopasowania za pomocą programu EasyFit, zostały wybrane funkcje

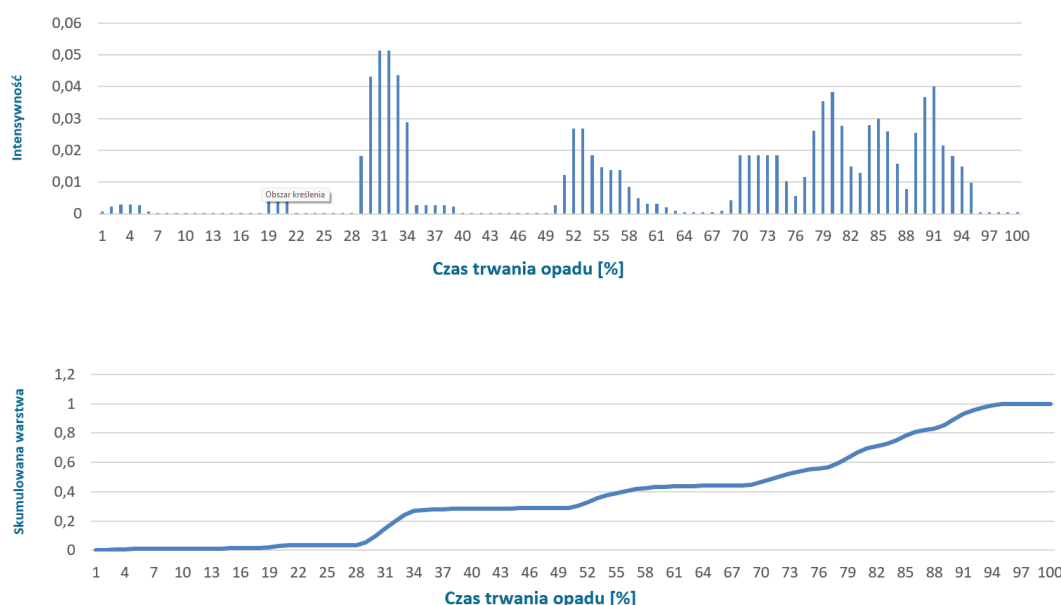
gamma (parametry: $a=1,584$, $b=367.3$), wykładnicza (parametry $\lambda=9,819$, $\gamma=10,00$) oraz GEV (parametry $\mu=0,0295$, $\sigma=0,0209$, $k=0,6101$).



Rysunek 9. – Histogramy ilości deszczy w funkcji czasu trwania, warstwy oraz intensywności wraz z dopasowanymi funkcjami dystrybucji (Mikołajewski i in., 2024)

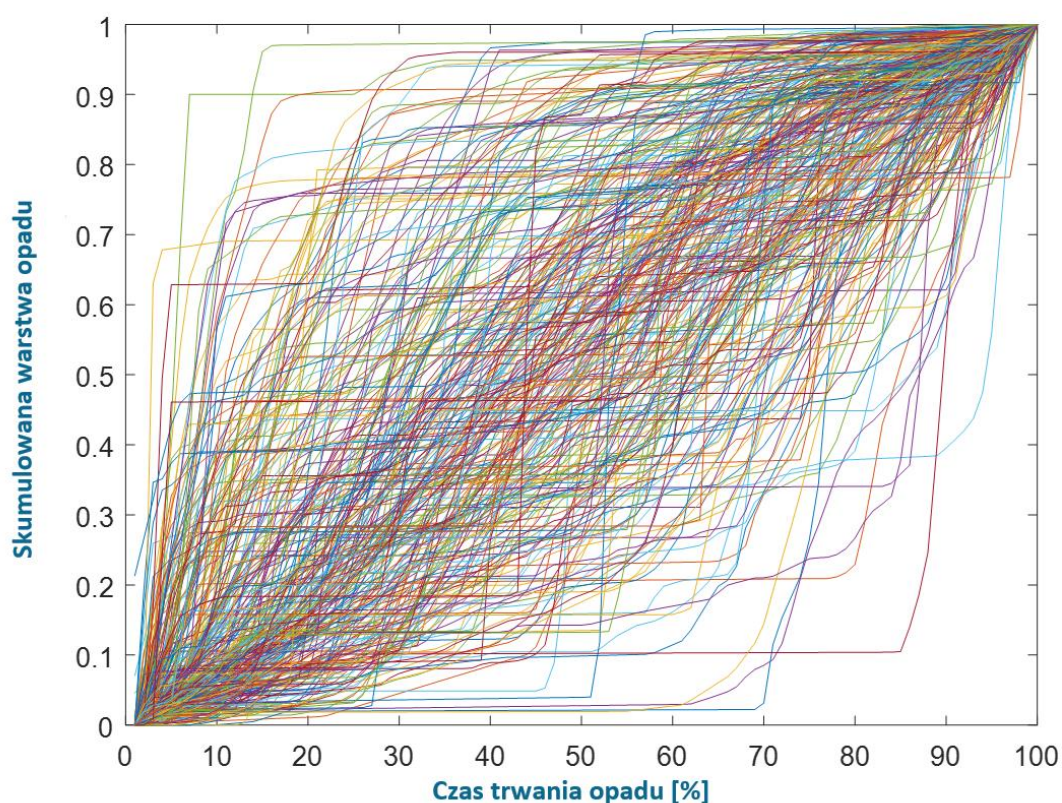
5.2. Normalizacja hietogramów i podział na skupienia

W celu przygotowania danych do dalszej analizy należało je wszystkie ujednoczyć tak, aby możliwa była obiektywna ich analiza. Proces normalizacji hietogramów, podobnie jak proces wydzielenia deszczy nawalnych, został przeprowadzony automatycznie w oparciu indywidualny skrypt zaimplementowany do silnika aplikacji RainBrain. Operacja normalizacji przeprowadzona została osobno dla każdego ze 100 deszczomierzy. Ostatecznie najpierw otrzymano hietogramy znormalizowane, prezentujące rozkład intensywności opadu w czasie, które potem przekształcono do hietogramów znormalizowanych prezentujących skumulowany opad narastający. Przykłady takich opadów znormalizowanych przedstawiono na rysunku 10.



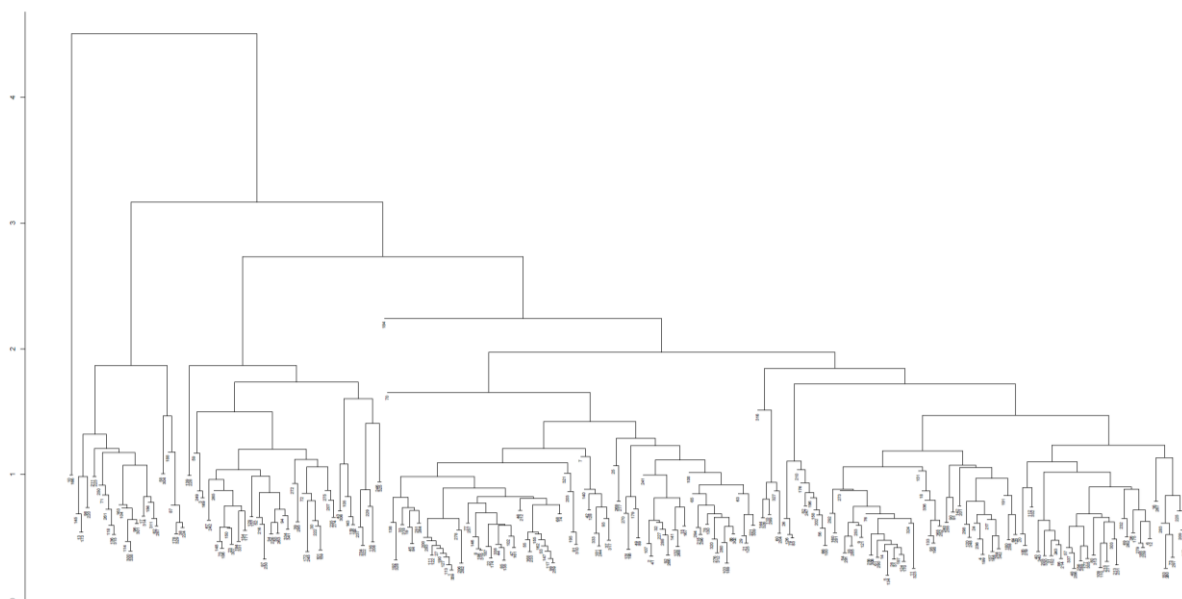
Rysunek 10. – Dwa wykresy prezentujące przykładowy opad znormalizowany przedstawiony w formie intensywności (górny) oraz narastającej warstwy opadu (dolny) (opracowanie własne)

Proces normalizowania wszystkich wydzielonych deszczy przebiegł poprawnie i ostatecznie otrzymano 63 292 plików CSV zawierających zarówno pierwszy, jak i drugi typ hietogramów. Po zestawieniu hietogramów z narastającą warstwą opadu dla każdej ze stacji otrzymano bazę składającą się ze 100 zestawów, która została poddana kolejnym analizom.



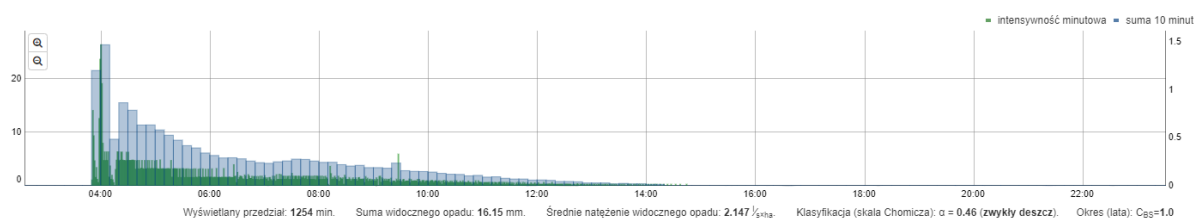
Rysunek 11. – Zestawienie znormalizowanych hietogramów dla stacji meteorologicznej Kraków (50°04'40"N i 19°47'42"E) (Mikołajewski i in., 2022)

Kolejnym krokiem było stworzenie dendrogramów obrazujących podobieństwa przebiegów w czasie dla każdej z analizowanych lokalizacji. Posłużono się w tym celu metodą hierarchicznej aglomeracji, a wszystkie zadania zrealizowano w oprogramowaniu Rstudio, w którym, za pomocą przygotowanych do tego celu skryptów, stworzono 100 dendrogramów. Przykładowy dendrogram dla stacji Ustka zaprezentowano na rysunku 12.



Rysunek 12. – Dendrogram opadów znormalizowanych dla stacji Ustka (opracowanie własne)

Analizując wygenerowane dendrogramy zauważono opady osobliwe, które zostały usunięte. W przypadku stacji Ustka, odstającymi hietogramami cechowały się opady nawałne nr 10 i 166 (lewa skrajna gałąź dendrogramu na rysunku 12.), których odległości wiązania względem innych opadów wynosiła ponad 4,5 przy pozostałych odległościach wiązania nieprzekraczających 3,1. Analizując przebieg tych deszczy stwierdzono, że nieprzystający do reszty zarejestrowanych opadów kształt został zarejestrowany przez niepoprawnie funkcjonujący deszczomierz. Bazując na doświadczeniu związanym z instalacją i obsługą deszczomierzy korytkowych, jednoznacznie można było stwierdzić, że sposób rejestracji tych zdarzeń opadowych wynikał z awarii mechanizmu korytka deszczomierza, jego zabrudzeniu lub wręcz zatkaniu leja deszczomierza. W całym analizowanym zbiorze zostało usuniętych tylko 29 deszczy zarejestrowanych na 11 stacjach (tabela 3.). Należy zauważyć, że jest to liczba zdarzeń, która nie ma wpływu statystycznego na prowadzone w dalszych etapach badania.

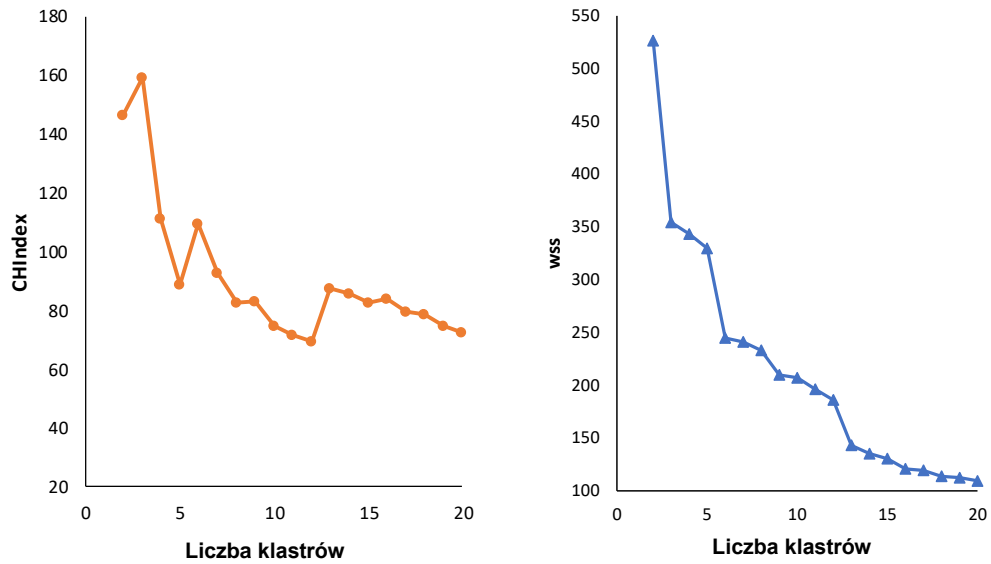


Rysunek 13. – Przykład usuniętego deszczu, który zarejestrowany został przez deszczomierz z zapchanym lejkiem (opracowanie własne na podstawie danych z aplikacji RainBrain)

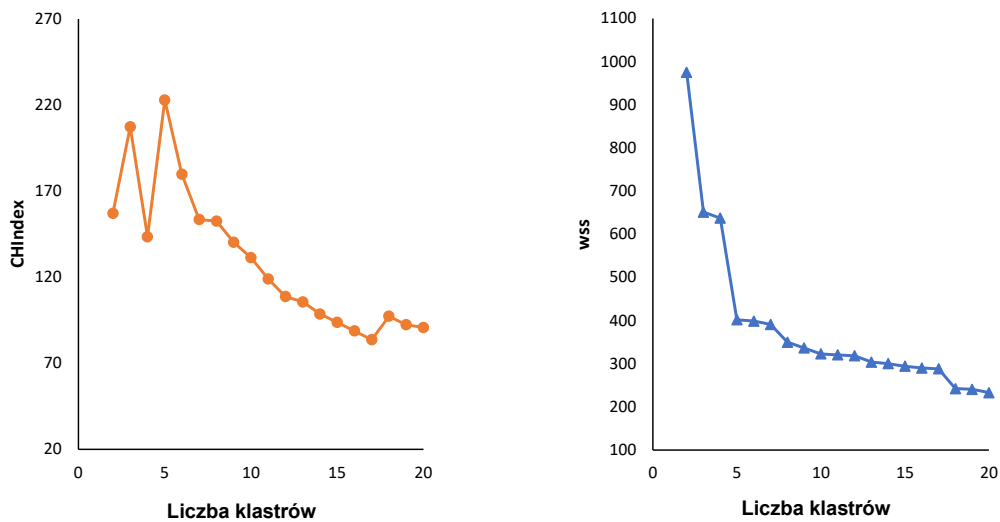
Numer stacji	Nazwa stacji	Liczba usuniętych deszczy	Numery usuniętych deszczy
3	Białystok	1	61
25	Hel	1	221
26	Jabłonka	1	113
27	Jelenia Góra	2	182, 125
29	Karpacz	3	161, 177, 288
45	Lidzbark Warmiński	4	78, 88, 79, 136
47	Lubachów	4	15, 131, 204, 281
48	Lublin	3	31, 233, 275
58	Olsztyn	2	160, 229
69	Resko	6	31, 105, 137, 270, 287, 328
87	Ustka	2	10, 166

Tabela 3. – Lista stacji na których usunięto opady osobliwe (opracowanie własne)

Na kolejnym etapie badań dla poszczególnych stacji obliczono wartości parametru wss oraz indeksu CHIndex. Przykłady takich obliczeń dla deszczomierza z Warszawy i z Lęborka są prezentowane na rysunkach 14 i 15. Wykresy tych parametrów przeanalizowano dla każdej ze 100 stacji. Wyznaczono maksymalną wartość liczby skupień k, dla której obserwowane było najbardziej wyraźne zmniejszenie gradientu spadku wartości wss, a zarazem występowało maksimum wartości indeksu CHIndex. W przypadku deszczomierza z Warszawy (rysunek 14.) za optymalną liczbę skupień przyjęto k=3, a w przypadku deszczomierza z Lęborka (rysunek 15.) przyjęto k=5.



Rysunek 14. – Wartości indeksu CHIndex i parametru wss dla liczby skupień k w zakresie od 2 do 20, obliczone dla zbioru 214 deszczy z Warszawy (opracowanie własne)



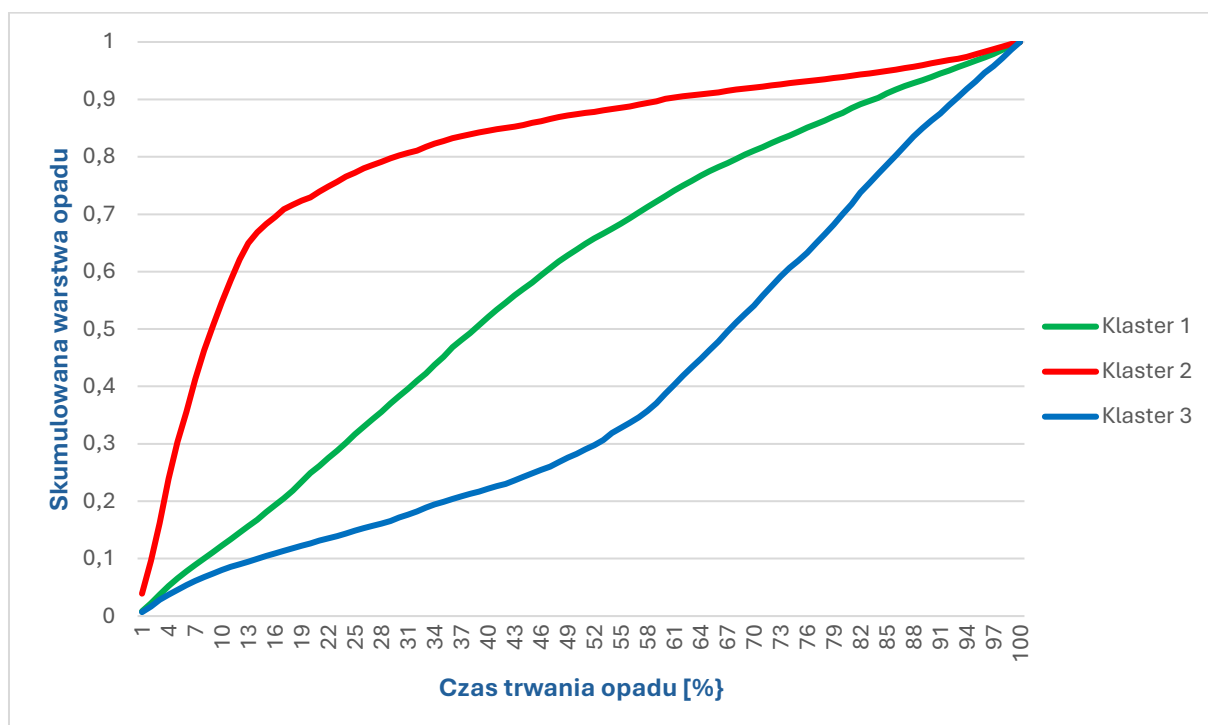
Rysunek 15. – Wartości indeksu CHIndex i parametru wss dla liczby skupień k w zakresie od 2 do 20, obliczone dla zbioru 365 deszczy z Lęborka (opracowanie własne)

Następnie zweryfikowano prawidłowość przyjęcia optymalnej liczby skupień metodą k-średnich z zastosowaniem metody bootstrap. Prawidłowość przeprowadzonego podziału hietogramów sprawdzono poprzez kontrolę wartości średniej indeksu Jaccarda, która minimalnie miała wynosić 0,6. W efekcie grupowania, zgodnie z danymi w tabeli 4., ostateczną liczbę skupień przyjęto za równą: $k=3$, $k=4$ i $k=5$ dla odpowiednio: 37, 58 i 5 analizowanych deszczomierzy. W przypadku wszystkich tych skupień uzyskano wartości indeksów Jaccarda nie mniejsze od 0,6.

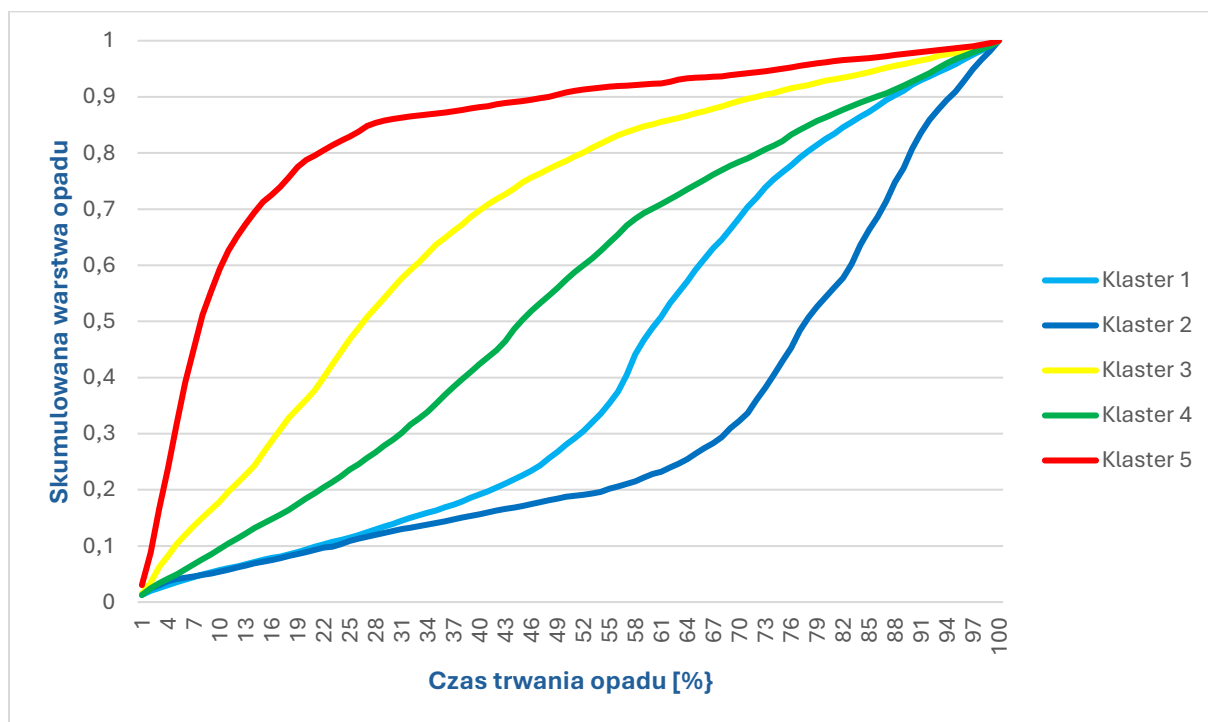
L.P.	Nazwa stacji	Liczba klastrow k	Wartość bootmean	L.P.	Nazwa stacji	Liczba klastrow k	Wartość bootmean
1	Baligród Mchawa	4	0.64	51	Miechów	4	0.63
2	Bardo	3	0.83	52	Międzylesie	3	0.88
3	Białystok	4	0.74	53	Mikołajki	4	0.68
4	Biebrza	5	0.62	54	Mława	3	0.85
5	Biecz-Grudna	4	0.64	55	Namysłów	3	0.65
6	Bielsko-Biała	3	0.84	56	Niezabyszewo	4	0.70
7	Bodzentyn	4	0.70	57	Nowy Sącz	4	0.74
8	Bogatynia	3	0.87	58	Olsztyn	3	0.92
9	Bolków	4	0.75	59	Opole	4	0.85
10	Chojnice	3	0.84	60	Otmuchów	4	0.71
11	Chwałkowice	3	0.84	61	Piła	3	0.79
12	Cisów	3	0.86	62	Płock	4	0.69
13	Częstochowa	3	0.94	63	Polanica Zdrój	3	0.64
14	Długopole	3	0.94	64	Polkowice	3	0.87
15	Dobrogoszcz	4	0.72	65	Poznań	4	0.59
16	Dzierżoniów	4	0.68	66	Prabuty	4	0.63
17	Elbląg	3	0.82	67	Pszemno	4	0.61
18	Gdańsk-Port Północny	4	0.86	68	Racibórz	4	0.64
19	Gdynia	4	0.70	69	Resko	4	0.77
20	Głuchołazy	3	0.83	70	Rzeszów - Jasionka	3	0.84
21	Góldap	4	0.71	71	Sandomierz	3	0.88
22	Gorzów	4	0.78	72	Siedlce	4	0.73
23	Grudziądz	4	0.79	73	Skiermiewice	3	0.79
24	Hala Gąsienicowa	4	0.69	74	Słubice	4	0.60
25	Hel	4	0.61	75	Staszów	4	0.65
26	Jabłonka	3	0.90	76	Sulejów	3	0.91
27	Jelenia Góra	3	0.92	77	Suwałki	4	0.75
28	Kalisz	3	0.85	78	Szczecin	4	0.70
29	Karpacz	4	0.74	79	Świder	3	0.80
30	Katowice	5	0.65	80	Świeradów Zdrój	4	0.87
31	Kętrzyn	4	0.66	81	Świerzawa	4	0.60
32	Kielce	3	0.62	82	Święty Krzyż	3	0.85
33	Kłodzko	4	0.87	83	Świnoujście	4	0.61
34	Koło	4	0.66	84	Tarnów	4	0.81
35	Kołobrzeg	4	0.67	85	Terespol	4	0.81
36	Koszalin	4	0.65	86	Toruń	3	0.93
37	Kościerzyna	4	0.71	87	Ustka	4	0.73
38	Kozienice	3	0.84	88	Walim	3	0.88
39	Kraków - Bielany	4	0.66	89	Warszawa Bielany	3	0.86
40	Krosno	5	0.61	90	Wieluń	4	0.70
41	Legnica	4	0.68	91	Wisłoczek	4	0.75
42	Lesko	4	0.87	92	Wisłok Wielki	3	0.87
43	Leszno	5	0.64	93	Włochów	3	0.86
44	Lębork	5	0.62	94	Włodawa	4	0.63
45	Lidzbark Warmiński	4	0.73	95	Wrocław	4	0.68
46	Limanowa	3	0.68	96	Wymysłów	4	0.73
47	Lubachów	4	0.60	97	Wysowa	4	0.7
48	Lublin	4	0.66	98	Zakopane	4	0.63
49	Łeba	3	0.80	99	Zawoja	3	0.88
50	Łódź	3	0.78	100	Zielona Góra	4	0.68

Tabela 4. – Wartości parametrów k i bootmean dla wszystkich stacji
(Mikołajewski i in., 2024)

Poniżej przedstawiono zestawy hietogramów wzorcowych dla dwóch wspomnianych wcześniej lokalizacji: Warszawy (rysunek 16.) i Łęborka (rysunek 17.).



Rysunek 16. – Hietogramy wzorcowe dla stacji Warszawa (opracowanie własne)



Rysunek 17. – Hietogramy wzorcowe dla stacji Łębork (opracowanie własne)

Procedurę tworzenia hietogramów wzorcowych zrealizowano dla wszystkich 100 stacji. Nie napotkano przy tym problemów i udało się stworzyć wszystkie 100 zestawów danych, które zapisane zostały w plikach CSV.

Dodatkowo, dla wydzielonych skupień wyznaczono uśrednione skumulowane hietogramy bezwymiarowe opadów nawałnych, na których podjęto dodatkowe badania dotyczące powiązań wielkoskalowych w postaci np. wysokości, czasu trwania i średniej intensywności opadu z poszczególnymi typami lokalnych hietogramów wzorcowych. Ogólne wyniki tych badań prezentowane są w tabeli 5.

Skupienie	Średnia wysokość opadów nawałnych, mm	Średni czas trwania opadów nawałnych, min	Średnia intensywność opadów nawałnych, mm·min ⁻¹
Podzbiór 37 stacji dla których liczba skupień k=3			
Skupienie nr 1	19,00	405,8	0,0896
Skupienie nr 2	20,28	651,7	0,0626
Skupienie nr 3	19,07	588,5	0,0572
Podzbiór 58 stacji dla których liczba skupień k=4			
Skupienie nr 1	18,90	355,7	0,0919
Skupienie nr 2	20,14	587,0	0,0724
Skupienie nr 3	20,92	672,0	0,0587
Skupienie nr 4	18,65	562,2	0,0541
Podzbiór 5 stacji dla których liczba skupień k=5			
Skupienie nr 1	18,00	348,0	0,0807
Skupienie nr 2	18,79	576,4	0,0746
Skupienie nr 3	19,49	769,4	0,0504
Skupienie nr 4	20,07	798,8	0,0459
Skupienie nr 5	17,65	557,4	0,0456

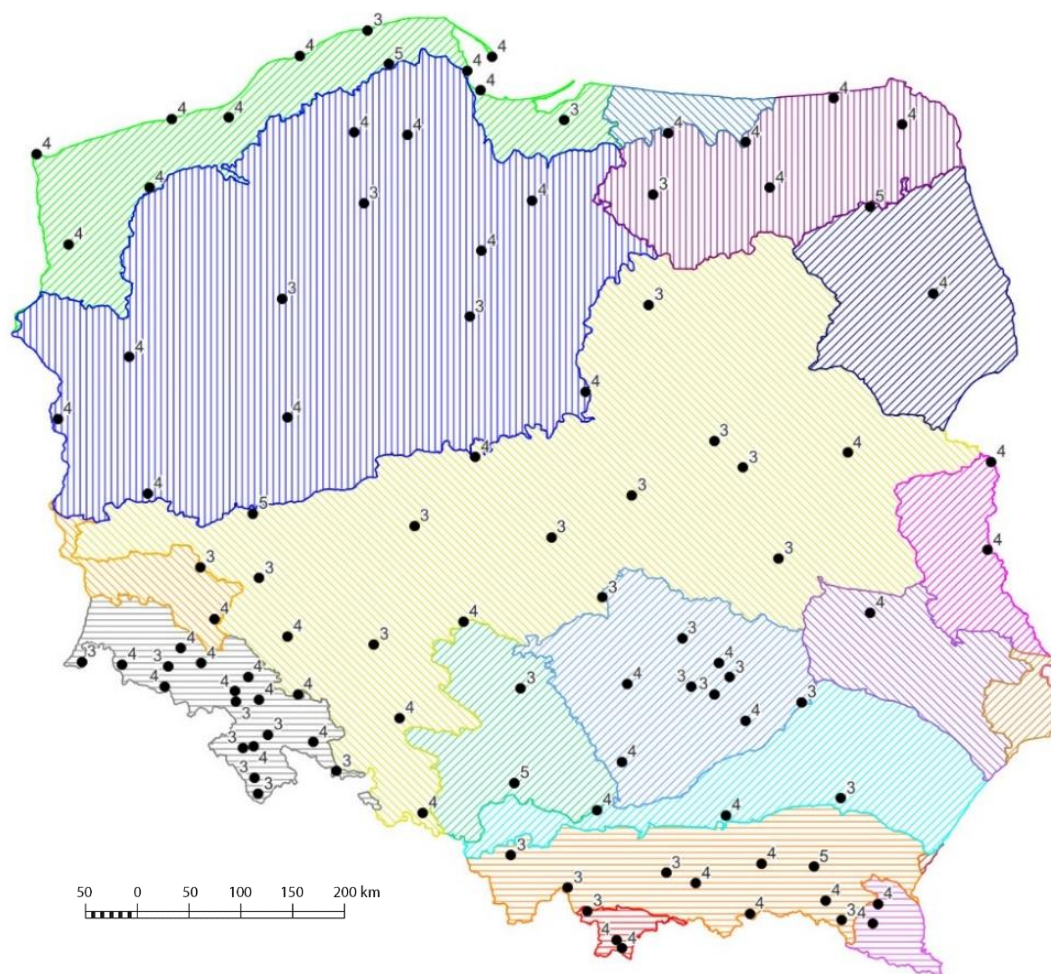
Tabela 5. – Zestawienie średnich wartości całkowitych wysokości, czasów trwania i intensywności średnich opadów nawałnych zaklasyfikowanych do poszczególnych skupień (Mikołajewski i in., 2024)

Jak można zauważyć, w przypadku każdego z podzbiorów stacji, opady nawałne, zaliczane do skupień nr 1, z uwagi na kształty ich hietogramów, charakteryzują się zazwyczaj najwyższymi intensywnościami i najkrótszymi czasami trwania. Potwierdzają to w pełni dane zamieszczone w tabeli 5., dotyczące średnich wartości wysokości, czasów trwania i średnich intensywności opadów zaklasyfikowanych do poszczególnych skupień. Przykładowo, wartości średnie intensywności deszczy i czasów ich trwania w skupieniu nr 1 w podzbiorze 58 stacji, dla których ustalono liczbę skupień k=4, wynosiły odpowiednio 0,092 mm·min⁻¹ i 356 min. Dla porównania średnie intensywności deszczy i czasów ich trwania w skupieniach nr 2, 3 i 4 wynosiły odpowiednio: 0,072, 0,059 i 0,054 mm·min⁻¹ oraz 587, 672 i 562 min. Podobne obserwacje można poczynić dla pozostałych podzbiorów stacji i są one analogiczne do

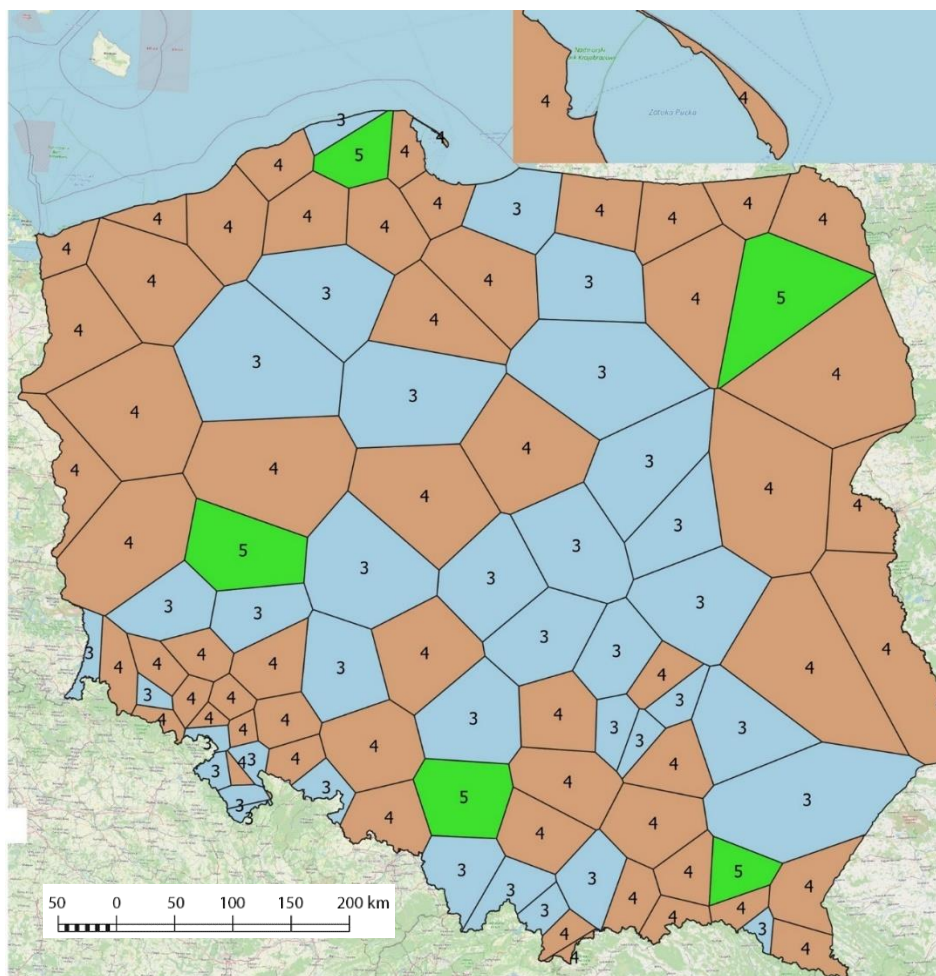
wniosków z badań przeprowadzonych przez Huffa (Huff, 1967 i Huff, 1990) w USA oraz Mikołajewskiego i in. (2022) w Krakowie. Wspomniany Huff (Huff, 1990) postulował stosowanie w projektowaniu i modelowaniu systemów odwodnienia hietogramów pierwszego kwartyla (ang. first-quartile storm hyetographs) dla skal czasowych około 6 h i krótszych, a hietogramów drugiego kwartyla (ang. second-quartile storm hyetographs) dla skal czasowych od około 6 do 12 h.

5.3. Regionalizacja zbiorów hietogramów wzorcowych

Ostatnim elementem badań było podjęcie próby regionalizacji zbiorów hietogramów wzorcowych z sieci deszczomierzy w Polsce. W tym celu sporządzono mapę, na której naniesiono ustalone liczby skupień i hietogramów wzorcowych na sieci 100 analizowanych deszczomierzy w Polsce na tle zasięgów 18 podprowincji w podziale kraju na regiony fizycznogeograficzne (rysunek 18.). Zasięgi regionów fizycznogeograficznych przyjęto według najnowszej publikacji Solon i in. (2018), weryfikującej i korygującej klasyczny podział według Kondrackiego z 1977 r. Niestety, dla większości z wydzielonych regionów stwierdzono, że zlokalizowane na ich obszarze deszczomierze są charakteryzowane przez różniące się liczby wydzielonych skupień, a więc także liczby hietogramów wzorcowych. Nie można było zatem sporządzić spójnych, regionalnych zestawów hietogramów wzorcowych do stosowania w poszczególnych regionach fizycznogeograficznych Polski. W efekcie tego zdecydowano o podziale obszaru Polski na 100 wieloboków Thiessena zgodnie z lokalizacją deszczomierzy i przypisanie każdemu z wieloboków unikalnego zestawu hietogramów wzorcowych. Podział obszaru Polski na 100 wieloboków Thiessena zgodnie z lokalizacją deszczomierzy przedstawiony jest na rysunku 19.



Rysunek 18. – Ustalone liczby skupień i hietogramów wzorcowych na sieci 100 analizowanych deszczomierzy w Polsce na tle 18 podprowincji w podziale kraju na regiony fizycznogeograficzne (opracowanie własne na podstawie Solon i in., 2018)



Rysunek 19. – Podział obszaru Polski na 100 wieloboków Thiessena zgodnie z lokalizacją deszczomierzy wraz z przypisaniem każdemu z wieloboków liczby unikalnych zestawów hietogramów wzorcowych (opracowanie własne)

6. Wdrożenie

W świetle stosowanych w praktyce w hydrologii miejskiej w Polsce norm i wytycznych PN-EN 752: 2008 i 2017 (PKN, 2008) i (PKN, 2017), komentarz do wytycznej ATV-A 118 (Schmitt T. G., 2000), analiza funkcjonowania sieci kanalizacji deszczowej o dużej złożoności wymaga stosowania modelowania hydrodynamicznego. Stosuje się modele klasy fali dynamicznej lub też bardziej uproszczone modele fali kinematycznej. Ich implementacja jest nieodzowna, zwłaszcza w przypadku, kiedy na sieci umieszczono zbiorniki retencyjne wód opadowych. Na obiektach tych dochodzi do wyraźnego przekształcenia hydrogramu dopływowego w hydrogram odpływowy. Długoterminowe symulacje hydrodynamiczne sieci odwodnieniowych pozwalają na prześledzenie naturalnego następstwa sekwencji zdarzeń opadowych i związanego z tym możliwego napełniania i opróżniania się zbiorników retencyjnych zabudowanych na sieciach. W symulacjach uwzględnia się wpływ zarówno powierzchni uszczelnionych, jak i nieuszczelnionych na opóźnianie oraz spłaszczenie hydrogramów spływu wód opadowych. Komputerowe modele hydrodynamiczne typu opad - odpływ zapewniają przy tym realistyczne odwzorowanie funkcji retencyjnej pełnionej przez pozbawione spadków lub też nawet znajdujące się pod wpływem cofek elementy systemów odwodnienia.

Systemy odwodnienia w rzeczywistości są poddawane bardzo różnym wymuszeniom wynikającym ze zmienności warunków opadowych. Opady są zjawiskiem nieciągłym i bardzo silnie zmiennym w czasie. Zatem plan prowadzenia symulacji hydrodynamicznych powinien uwzględniać możliwie pełną zmienność warunków opadowych na analizowanym poligonie. W teorii, by poznać zakres zmienności parametrów działania systemu odwodnienia, należałoby zasilić model hydrodynamiczny wieloletnimi, lokalnymi szeregami opadowymi w wysokiej rozdzielczości czasowej i przeprowadzić długoterminowe symulacje. Rozwiązanie to jednak nie jest praktykowane z uwagi, m.in. na powszechny brak dostępu do wieloletnich, lokalnych szeregów opadowych w wysokiej rozdzielczości. Niemniej ważnym czynnikiem jest czasochłonność prowadzenia długoterminowych symulacji. Wyzwaniem przy tym jest nie tylko sam czas obliczeń i koszty z tym związane, ale także sama stabilność numerycznych modeli komputerowych. Rozwiązaniem, które pozostaje, jest prowadzenie symulacji tylko dla wybranych zdarzeń opadowych, tzw. deszczy nawalnych lub też przyjęcie bardziej pragmatycznego podejścia i prowadzenie symulacji z użyciem lokalnych opadów wzorcowych (lokalnych hietogramów wzorcowych). Lokalne hietogramy wzorcowe prezentują typowe

(wzorcowe) przebiegi w czasie opadów nawalnych i powstają w wyniku opracowania statystycznego lokalnie wydzielonych opadów nawalnych.

Ideą współczesnego projektowania jest spójne obliczanie poszczególnych elementów systemów odwodnienia. Elementem wieńczącym ten proces powinna być walidacja całego systemu odwodnienia. O ile dobór poszczególnych elementów systemu odwodnienia, np. średnic kanałów, objętości zbiorników retencyjnych itp., odbywa się z zastosowaniem prostych metod stacjonarnych i może być realizowany w poszczególnych kalkulatorach doboru na platformie waterfolder.com, to walidacja całego systemu odwodnienia może być zrealizowana tylko z zastosowaniem metod niestacjonarnych i wymaga opracowania modelu hydrodynamicznego oraz przeprowadzenia szeregu symulacji, np. dla założonych scenariuszy opadu (lokalnych hietogramów opadu). Stąd też w wytycznych technicznych zaleca się stosowanie modelowania hydrodynamicznego i hietogramów wzorcowych (opadów modelowych) do weryfikacji nowoprojektowanych systemów odwodnienia (Schmitt, 2000).

W niniejszym rozdziale zaprezentowane jest wykorzystanie wyników badań otrzymanych w trakcie prac badawczych, jakimi są stworzone dla 100 lokalizacji zestawy hietogramów wzorcowych. Opisane rozwiązanie to projekt pilotażowy, realizowany w firmie RETENCJAPL, która w najbliższym czasie zamierza udostępnić go jako aplikację internetową pod nazwą WaterFolder Connect. Narzędzie to będzie rozwinięciem działającej na polskim rynku aplikacji WaterFolder, z której korzysta już prawie 10 000 użytkowników. Aktualnie platforma umożliwia, za pomocą kilkudziesięciu narzędzi zaimplementowanych we współpracy z wiodącymi producentami urządzeń stosowanych do budowy systemów odwodnieniowych, dobór podstawowych parametrów tych urządzeń, w oparciu o natężenia deszczy miarodajny z atlasu PANDa. W kolejnej wersji, czyli właśnie na platformie WaterFolder Connect, użytkownicy Ci będą mieli możliwość zbudowania z aktualnie dostępnych elementów całego układu odwodnieniowego i zasymulowania jego pracy w sposób dynamiczny, który sprawdzi poprawność doboru elementów i wskaże potencjalne problemy uzyskane w trakcie pracy modelu. Symulacja taka będzie możliwa do przeprowadzenia dzięki wykorzystaniu między innymi przygotowanych podczas prac nad doktoratem hietogramów wzorcowych.

W kolejnych podrozdziałach opisane zostały stworzone na potrzeby rozbudowy platformy WaterFolder generator hietogramów, narzędzie do transformacji projektów systemu odwodnienia w model komputerowy oraz zaimplementowany silnik obliczeniowy SWMM wykorzystywany do prowadzenia symulacji hydrodynamicznych. Po uruchomieniu i sprawdzeniu wszystkich funkcjonalności, przeprowadzono testy generatora, narzędzia do

przekształcania układów w model oraz przeprowadzono testowe symulacje dla zbioru systemów odwodnienia na terenie całej Polski, obejmującego:

1. 100 małych systemów odwodnienia;
2. 100 średnich systemów odwodnienia;
3. 100 średnich systemów odwodnienia ze zbiornikiem retencyjnym.

Na końcu znajduje się też dyskusja osiągniętej efektywności transformacji projektów w modele hydrodynamiczne na platformie WaterFolder Connect, a także niezawodności ich dalszych symulacji hydrodynamicznych z użyciem silnika obliczeniowego SWMM oraz wymaganego do tego czasu obliczeniowego na serwerze w rozwiązaniu chmurowym.

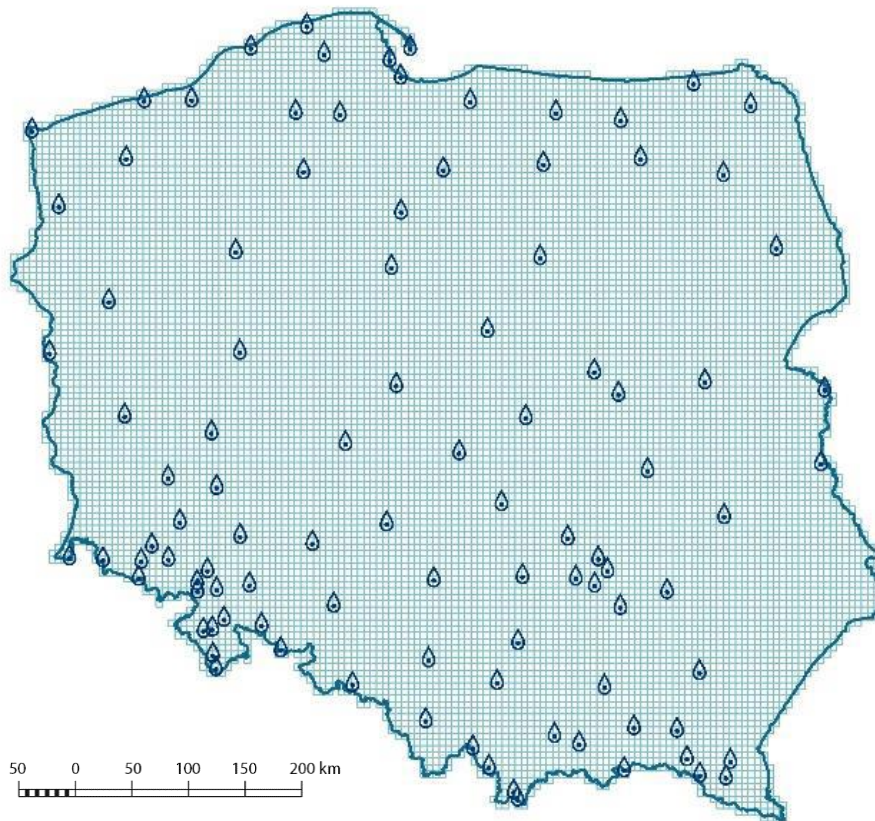
6.1. Generator hietogramów wzorcowych

Biorąc pod uwagę poziom złożoności współczesnych systemów odwodnienia, przy ich modelowaniu konieczne jest uwzględnienie opadów o różnych wysokościach całkowitych i o różnych rozkładach w czasie. Całkowite wysokości opadów można ustalać bezpośrednio z lokalnego modelu opadowego (IDF/DDF) dla zadanego czasu trwania i częstości występowania. Następnie wysokości te powinny być rozkładane (dystrybuowane) w czasie trwania opadu według wzorców hietogramów wzorcowych. Do generowania lokalnych hietogramów potrzebne są więc dwa źródła informacji: wysokości opadów miarodajnych oraz rozkłady znormalizowanych hietogramów wzorcowych.

Poniżej opisane jest działanie opracowanego w przedsiębiorstwie RETENCJAPL sp z o.o. generatora lokalnych hietogramów wzorcowych, który został wdrożony w testowej (wewnętrznej) wersji portalu connect.waterfolder.com. Generator ten pozwala na generowanie lokalnych hietogramów wzorcowych dla dowolnej lokalizacji na terenie Polski, wskazanej na etapie tworzenia projektu na platformie connect.waterfolder.com, dla zadanych przez użytkownika czasów trwania opadu i częstości (prawdopodobieństwa) jego występowania.

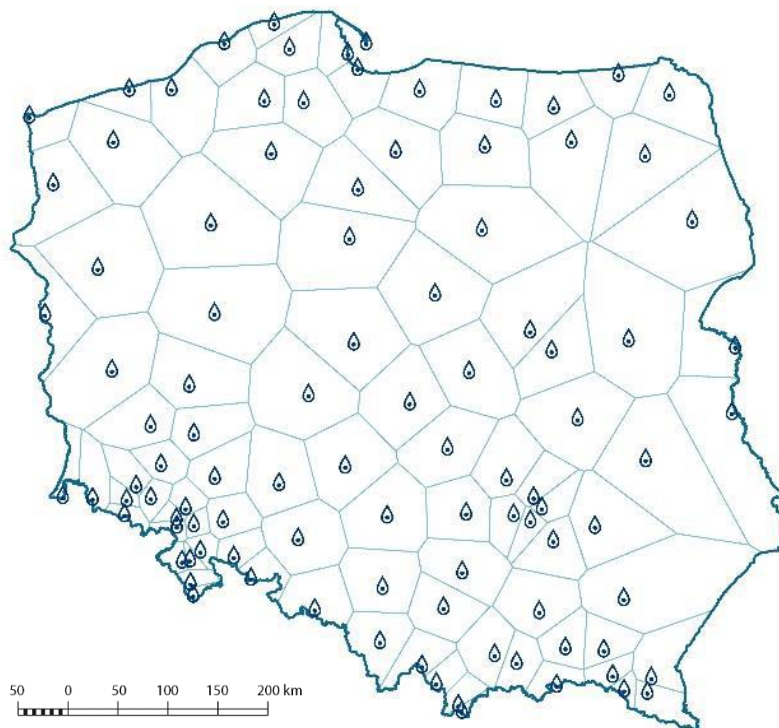
Wysokości opadów miarodajnych odczytywane są z Atlasu PANDa (Licznar i in., 2020), gdzie na podstawie lokalizacji projektu identyfikowane jest oczko siatki interpolacyjnej atlasu o wymiarach 5 km x 5 km (rysunek 20.) i na tej podstawie ustalany jest konkretny lokalny model IDF (spośród pełnego zbioru 12855 modeli opadowych). Z wybranego

(zidentyfikowanego) modelu opadowego dla zadanego czasu trwania i częstości (prawdopodobieństwa) deszczu odczytywane jest natężenie deszczu, które jest przeliczane na wysokość deszczu miarodajnego.



Rysunek 20. – Podział obszaru Polski na 12885 oczek siaki o wymiarach 5 km x 5 km z unikalnymi modelami opadowymi wraz z lokalizacją 100 deszczomierzy atlasu PANDa (RETENCJAPL)

Znormalizowany zestaw hietogramów wzorcowych jest przyjmowany dla najbliższego spośród 100 przeanalizowanych deszczomierzy Atlasu PANDa. Konkretny, najbliższy deszczomierz jest identyfikowany na podstawie lokalizacji projektu systemu odwodnienia. Współrzędne geograficzne projektu znajdują się na obszarze jednego spośród 100 wieloboków Thiessena wydzielonych dla sieci 100 deszczomierzy PANDa, obejmujących całą Polskę (rysunek 21.). Rozwiązanie to jest przyjęte z uwagi na wyniki uzyskane podczas badań, a konkretnie ze względu na brak wyraźnej regionalizacji hietogramów wzorcowych w obszarze 18 podprovincji w podziale kraju na regiony fizycznogeograficzne (rysunek 19.).



Rysunek 21. – Podział obszaru Polski na 100 wieloboków Thiessena zgodnie z lokalizacją deszczomierzy Atlasu PANDa (RETENCJAPL)

Obliczona wysokość deszczu miarodajnego jest rozkładana w czasie (dla zadanego czasu trwania deszczu) z rozdzielczością 1 minuty zgodnie z rozkładami bezwymiarowych hietogramów wzorcowych. W zależności od wskazanej lokalizacji operacja ta dotyczy 3, 4 lub 5 typów bezwymiarowych rozkładów hietogramów opadów nawałnych (rysunek 19.).

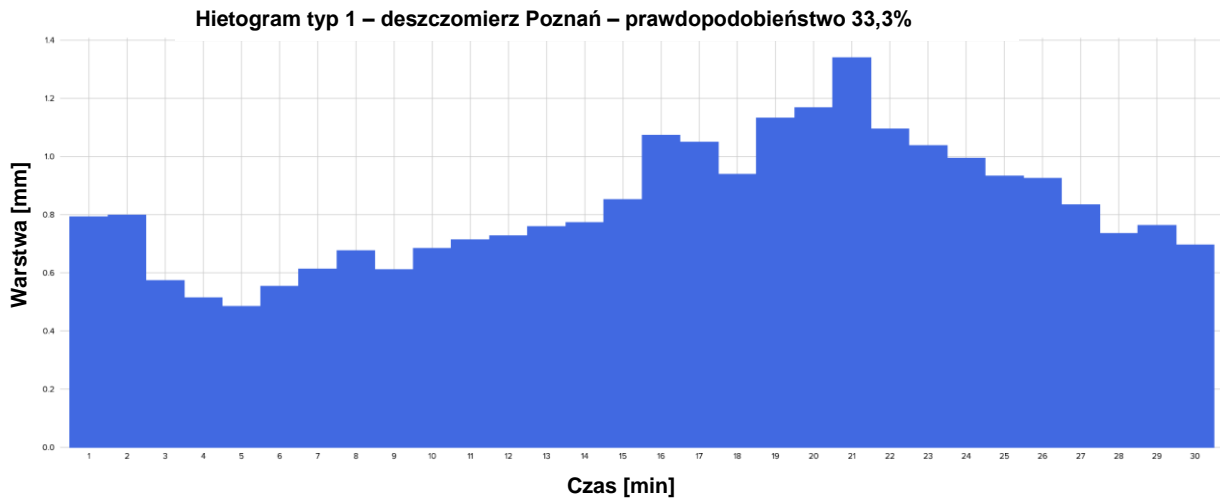
Poniżej opisany został jeden przykład generowania hietogramów wzorcowych. Celem demonstracji wybrano opracowanie zestawu hietogramów wzorcowych dla lokalizacji Poznań - Ławica dla czasu trwania 30 min i częstości $C=10$ lat (prawdopodobieństwo $p=10\%$). Odczyt natężenia miarodajnego dla czasu trwania 30 min i częstości $C=10$ lat (prawdopodobieństwo $p=10\%$) dla wymienionej lokalizacji wynosi $138,01 \text{ dm}^3/(\text{s} \times \text{ha})$, co odpowiada wysokości opadu miarodajnego $h=24,84 \text{ mm}$.

Dla Poznania opracowano zestaw czterech bezwymiarowych hietogramów wzorcowych, których rozkłady w czasie są zestawione w poniższej tabeli 6. W tabeli dokonano także rozłożenia wspomnianej wcześniej wysokości opadu miarodajnego $h=24,84 \text{ mm}$ na kolejne minuty opadów modelowych.

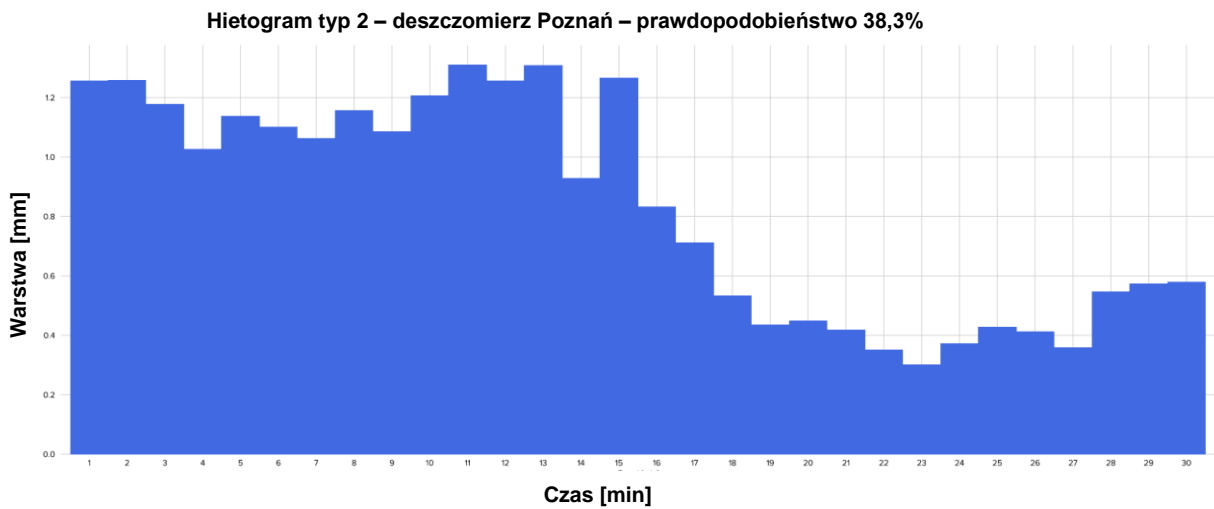
Obliczone, generowane na platformie connect.waterfolder.com, hietogramy wzorcowe, jak w przykładzie obliczeniowym pokazanym w tabeli, są prezentowane graficznie na poniższych rysunkach 22 – 25.

Czas	Hietogram wzorcowy typ 1		Hietogram wzorcowy typ 2		Hietogram wzorcowy typ 3		Hietogram wzorcowy typ 4	
	Rozkład	Wysokość opadu [mm]	Rozkład	Wysokość opadu [mm]	Rozkład	Wysokość opadu [mm]	Rozkład	Wysokość opadu [mm]
1	3,2%	0,79	5,1%	1,26	12,4%	3,09	2,7%	0,67
2	3,2%	0,80	5,1%	1,26	15,0%	3,72	3,1%	0,77
3	2,3%	0,57	4,7%	1,18	9,7%	2,40	0,9%	0,23
4	2,1%	0,51	4,1%	1,03	8,9%	2,22	0,8%	0,21
5	1,9%	0,48	4,6%	1,14	8,2%	2,04	0,6%	0,15
6	2,2%	0,55	4,4%	1,10	6,3%	1,55	0,8%	0,20
7	2,5%	0,61	4,3%	1,06	5,7%	1,42	0,7%	0,18
8	2,7%	0,68	4,7%	1,16	5,6%	1,38	0,6%	0,14
9	2,5%	0,61	4,4%	1,09	4,0%	0,99	0,6%	0,15
10	2,8%	0,69	4,9%	1,21	2,9%	0,71	1,0%	0,25
11	2,9%	0,71	5,3%	1,31	1,9%	0,47	0,9%	0,23
12	2,9%	0,73	5,1%	1,26	1,7%	0,42	0,8%	0,21
13	3,1%	0,76	5,3%	1,31	1,3%	0,32	1,0%	0,26
14	3,1%	0,77	3,7%	0,93	1,3%	0,32	0,7%	0,17
15	3,4%	0,85	5,1%	1,27	1,3%	0,32	1,0%	0,24
16	4,3%	1,07	3,3%	0,83	0,8%	0,21	1,3%	0,32
17	4,2%	1,05	2,9%	0,71	1,0%	0,24	3,6%	0,90
18	3,8%	0,94	2,1%	0,53	1,3%	0,32	2,6%	0,65
19	4,6%	1,13	1,7%	0,43	0,7%	0,17	2,0%	0,48
20	4,7%	1,17	1,8%	0,45	0,9%	0,23	2,0%	0,49
21	5,4%	1,34	1,7%	0,42	0,8%	0,19	2,6%	0,64
22	4,4%	1,09	1,4%	0,35	0,6%	0,15	4,0%	0,99
23	4,2%	1,04	1,2%	0,30	0,9%	0,22	5,9%	1,46
24	4,0%	0,99	1,5%	0,37	0,8%	0,20	5,7%	1,41
25	3,8%	0,93	1,7%	0,43	0,8%	0,19	3,3%	0,83
26	3,7%	0,92	1,7%	0,41	0,9%	0,23	5,1%	1,26
27	3,4%	0,83	1,4%	0,36	1,1%	0,28	13,0%	3,23
28	3,0%	0,74	2,2%	0,55	1,2%	0,30	17,9%	4,45
29	3,1%	0,76	2,3%	0,57	1,0%	0,25	7,2%	1,79
30	2,8%	0,70	2,3%	0,58	1,1%	0,28	7,5%	1,87
Suma:	100,0%	24,84	100%	24,84	100%	24,84	100%	24,84

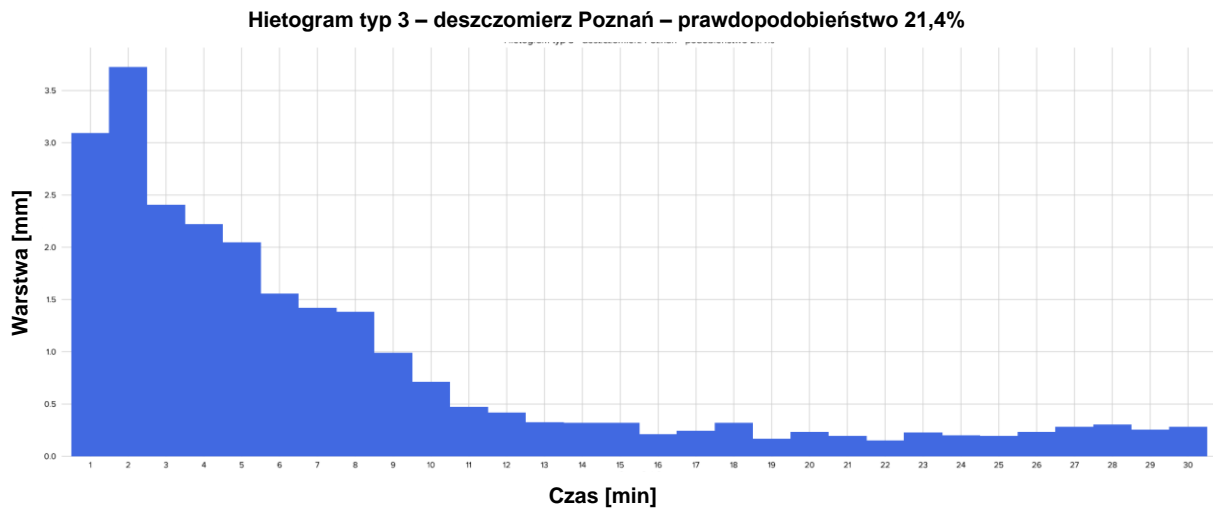
Tabela 6. – Zestaw czterech bezwymiarowych hietogramów wzorcowych dla Poznania i opracowany na jego podstawie zestaw czterech hietogramów wzorcowych deszczy o czasie trwania 30 min oraz częstotliwości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%) (RETENCJAPL)



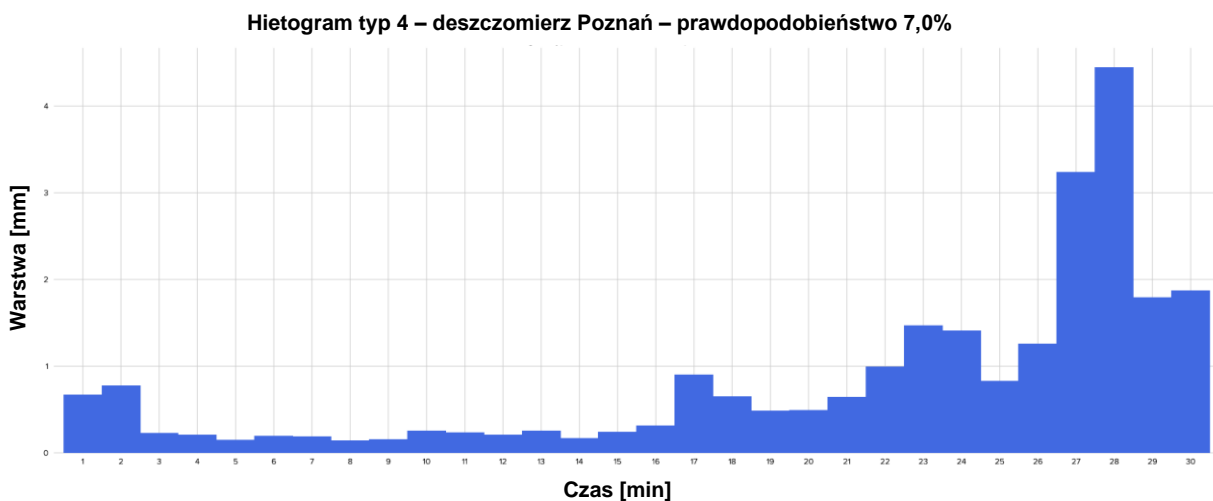
Rysunek 22. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 1 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL)



Rysunek 23. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 2 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL)



Rysunek 24. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 3 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości $C=10$ lat (prawdopodobieństwo $p=10\%$). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL)



Rysunek 25. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 4 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości $C=10$ lat (prawdopodobieństwo $p=10\%$). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL)

Celem przetestowania generatora hietogramów wzorcowych na platformie connect.waterfolder.com wygenerowano hietogramy dla lokalizacji odpowiadających 100 deszczomierzom projektu PANDa, które są zestawione w tabeli 1.

Dla każdego deszczomierza wygenerowano hietogramy wzorcowe dla pięciu najczęściej spotykanych w projektowaniu i modelowaniu systemów odwodnienia częstotliwości deszczów C równych 100 lat, 10 lat, 5 lat, 2 lata i 1 rok (prawdopodobieństwa p równe 1%, 20%, 20%, 50% i 100%). Ponadto, dla każdego poziomu częstotliwości C (prawdopodobieństwa p) wygenerowano hietogramy dla sześciu charakterystycznych czasów trwania 30 min, 45 min, 60 min, 120 min, 1440 min i 4320 min. W ten sposób wygenerowano łącznie $368 \times 5 \times 6 = 11\,040$ hietogramów wzorcowych. Wcześniej przywołana liczba 368 jest liczebnością zbioru wszystkich bezwymiarowych hietogramów wyznaczonych na sieci 100 stacji (58 stacji z 3 wzorami, 37 stacji z 3 wzorcami i 5 stacji z 5 wzorcami). Wszystkie 11 040 hietogramów zostało pomyślnie wygenerowanych, nie stwierdzono przy tym problemów z działaniem opracowanego i wdrożonego na platformie connect.waterfolder.com generatora lokalnych hietogramów wzorcowych.

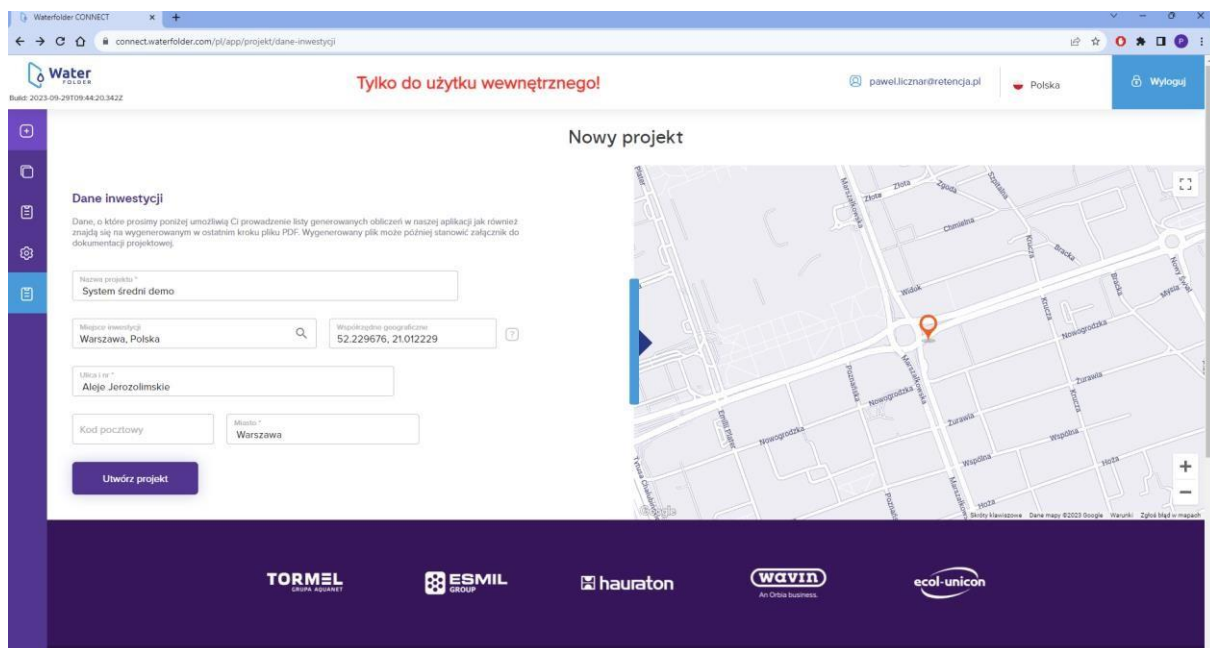
6.2. Aplikacja do transformacji systemu odwodnienia w model hydrodynamiczny

Podczas dalszych prac wdrożeniowych na platformie connect.waterfolder.com zaimplementowano szereg rozwiązań, pozwalających na przekształcenie projektu systemu odwodnienia w model hydrodynamiczny. Opracowana przez zespół aplikacja tworzy pełną topologię modelu hydrodynamicznego, zgodną ze standardem SWMM (ang. Storm Water Managment Model). Proces ten przebiega równolegle (w tle) z tworzeniem Projektu i uruchamianiem Wizardu, czyli kreatora modelu (projektu sieci odwadniającej). Należy przy tym wspomnieć o zaimplementowanej koncepcji interfejsu użytkownika na platformie connect.waterfolder.com, opierającą się na wprowadzeniu pojęć:

- “projektu” (wirtualnej inwestycji), czyli miejsca/obszaru na mapie Polski zbierającego określone dane w ramach jednej grupy, która może zawierać elementy wspólne np. lokalizację, lokalny model opadowy itp.;
- “kreatora” (ang. „wizzard”), czyli ścieżki wdrożenia łańcucha obliczeniowo-projektowego, a w tym orientacji w przestrzeni elementów systemu odwodnienia (zdefiniowania grafu ich wzajemnych zależności), a więc zasadniczego sposobu tworzenia projektu systemu odwodnienia, równolegle konwertowanego w model hydrodynamiczny;

- “symulacji”, a więc predefiniowanych ustawień zapewniających możliwość przetestowania różnych wariantów rozwiązań w ramach symulacji hydrodynamicznych.

Proces tworzenia nowego Projektu jest prezentowany na rysunku 26. Polega on na nadaniu nazwy i wskazaniu lokalizacji systemu odwodnienia, co jest ważne z punktu widzenia generowania zestawu lokalnych hietogramów wzorcowych. Stąd aplikacja pobiera dane celem określania natężeń miarodajnych z Atlasu PANDa (Licznar i in., 2020) i wprowadzenia ich do generatora hietogramów wzorcowych.



Rysunek 26. – Tworzenie projektu nowego systemu odwodnienia (RETENCJAPL)

W Projekcie następuje utworzenie Modelu systemu odwodnienia, czyli projektu sieci odwadniającej automatycznie konwertowanego w model hydrodynamiczny (rysunek 27.). Tworzony Model jest domyślnie pusty (rysunek 28.), jednak po uruchomieniu Wizardu można przystąpić do tworzenia łańcucha obliczeniowo-projektowego z użyciem kalkulatora doboru przewodów grawitacyjnych (rysunek 29.). W kalkulatorze gromadzone są najważniejsze dane do budowy topologii modelu hydrodynamicznego w postaci: długości kanałów, rzędnych terenu, rzędnych dna kanałów, ich spadków i chropowatości. Wprowadzane są także informacje o kolejno przyłączanych zlewniach i o ich powierzchni zredukowanej. Po przeprowadzonym doborze znane są także średnice poszczególnych kanałów. Pozwala to na

odtworzenie podstawowej topologii sieci w standardzie SWMM. Przy czym konieczne jest przeliczenie chropowatości rur k wprowadzanych w kalkulatorze do formuły Colebrook'a-White'a na odpowiadające im wartości współczynnika Manninga stosowanego w SWMM. Konwersja ta jest prowadzona z użyciem formuły zapisanej w PN-EN 752 (PKN, 2008):

$$K = 4 \cdot \left(\frac{132}{D}\right)^{1/6} \cdot \log_{10} \left(\frac{3,7D}{k}\right) \quad (1)$$

gdzie:

K – współczynnik Manninga w metrach do potęgi jednej trzeciej przez sekundę;

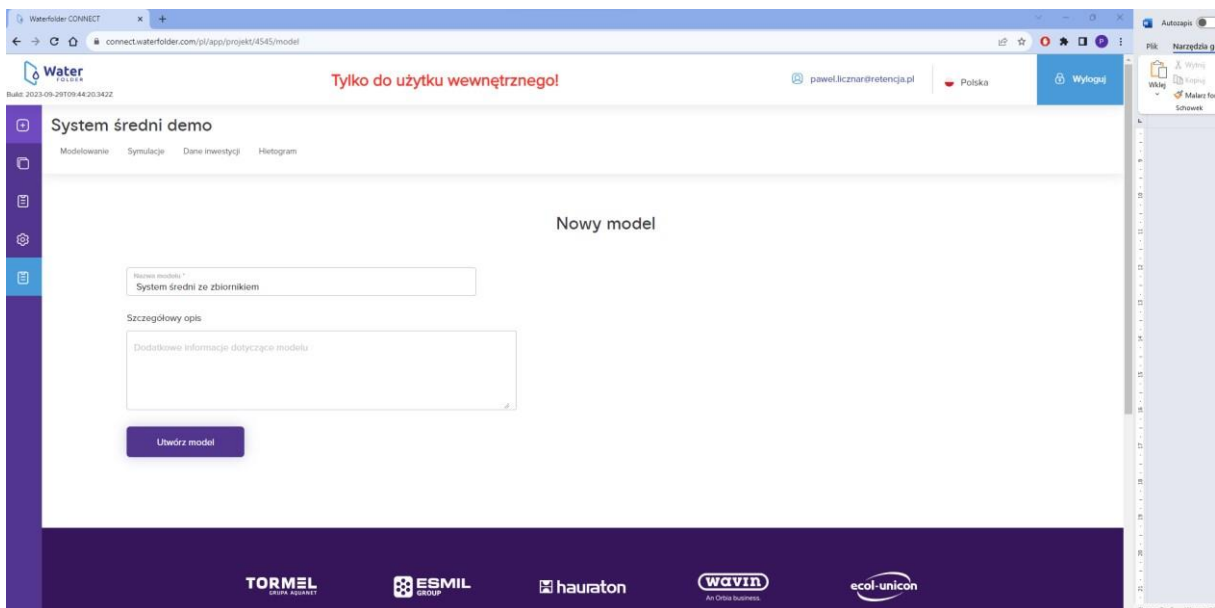
g – stała grawitacji w metrach przez sekundę kwadrat;

D – wewnętrzna średnica rury w metrach;

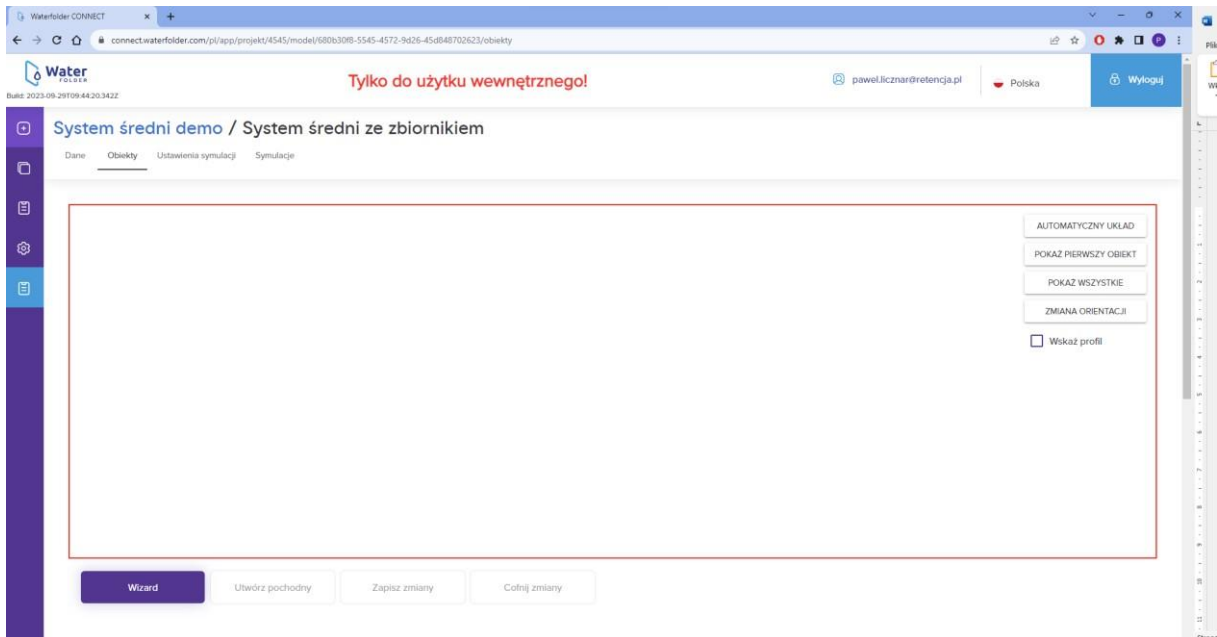
k – chropowatość rury w metrach.

Przy transformacji zlewni przyjmuje się w sposób uproszczony (domyślny), że są to zlewnie nieprzepuszczalne o powierzchni odpowiadającej powierzchni zredukowanej. Ponadto szerokość zlewni jest pierwiastkiem jej powierzchni, wyrażonej w metrach kwadratowych, a spadek ma domyślną wartość 2,5% (typową np. dla spadków spotykanych na drogach).

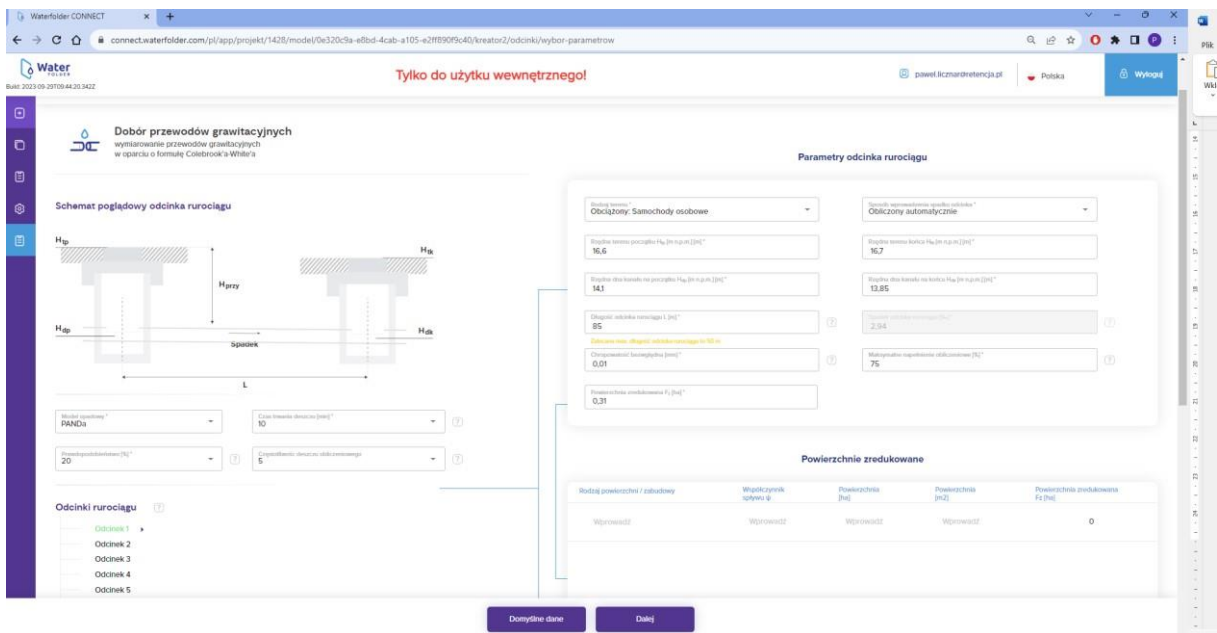
Dodatkowo przyjmowane są standardowe wartości parametrów takich jak np. Dstore-Imperv i Dstore-Perv, czy też N-Imperv i N-Perv prezentowane na rysunku 30.



Rysunek 27. – Utworzenie Modelu systemu odwodnienia, czyli projektu sieci odwadniającej, automatycznie konwertowanego w model hydrodynamiczny (RETENCJAPL)



Rysunek 28 – Utworzony, pusty jeszcze model systemu odwodnienia (RETENCJAPL)



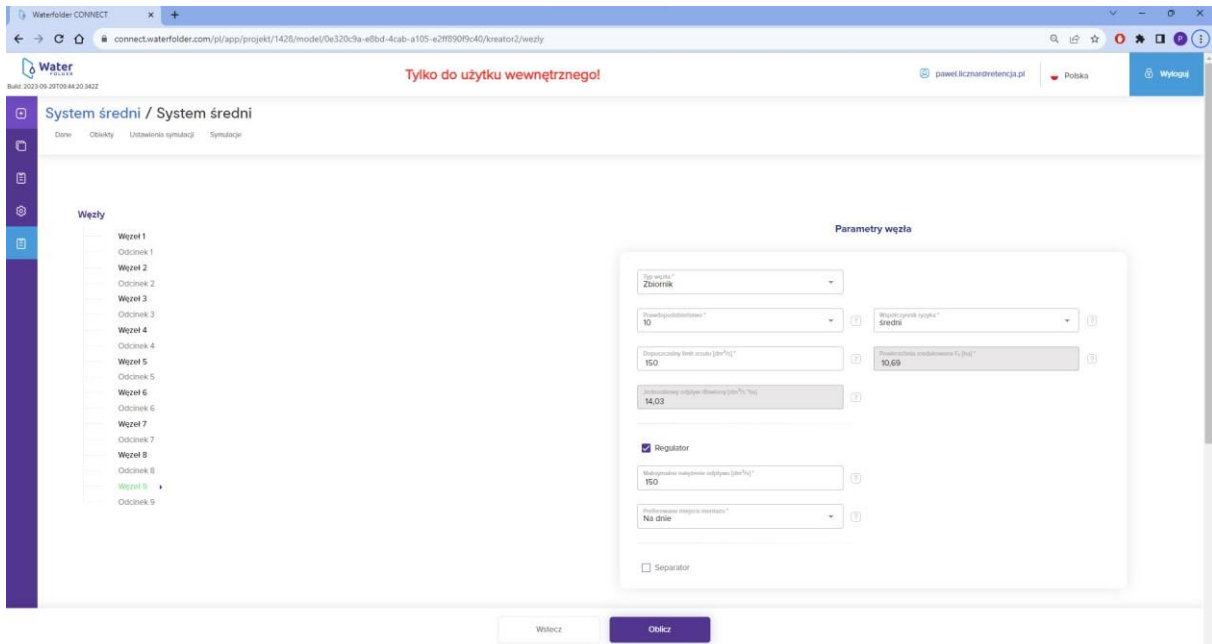
Rysunek 29. – Tworzenie łańcucha obliczeniowo-projektowego z użyciem kalkulatora doboru przewodów grawitacyjnych (RETENCJAPL)

Subcatchment Zlewnia_1	
Property	Value
Name	Zlewnia_1
X-Coordinate	
Y-Coordinate	
Description	
Tag	
Rain Gage	raingage_type1
Outlet	Studnia_1
Area	0.31
Width	55.68
% Slope	2.5
% Imperv	100
N-Imperv	0.01
N-Perv	0.1
Dstore-Imperv	1.5
Dstore-Perv	5
%Zero-Imperv	100
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0

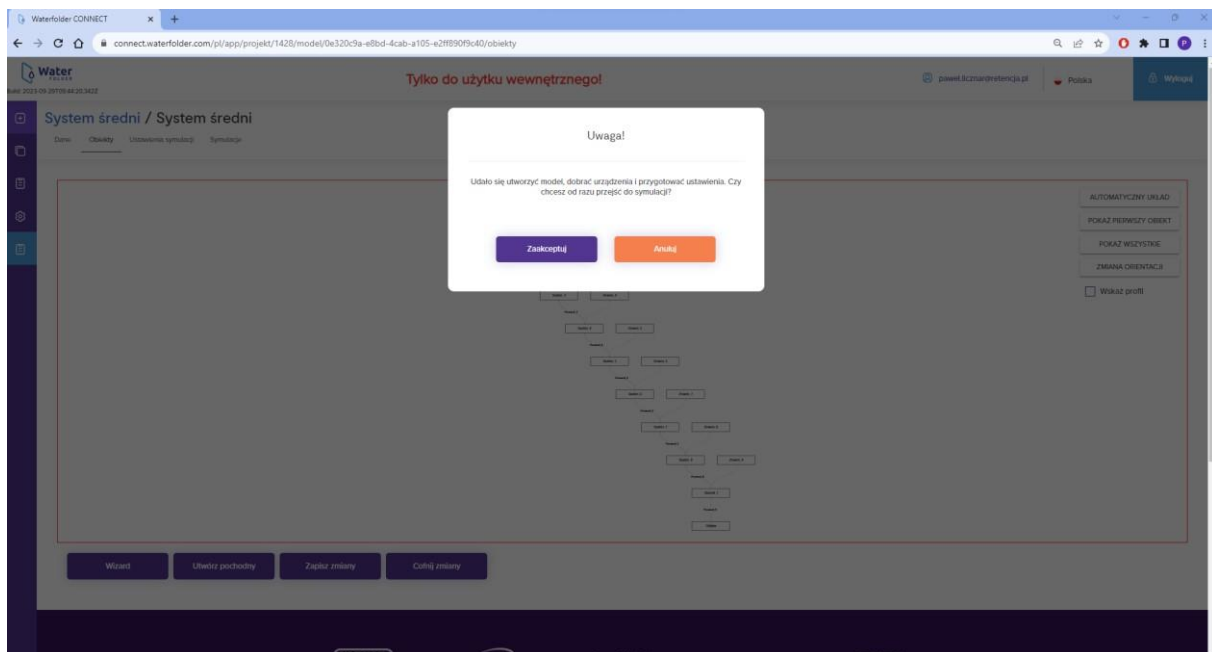
Depth of depression storage on pervious area (mm)

Rysunek 30. – Domyślnie przyjmowane wartości parametrów (takich jak np. Dstore-Imperv i DstorePerv czy też N-Imperv i N-Perv) przy konwersji zlewni spływu na Subcatchments w modelu (RETENCJAPL)

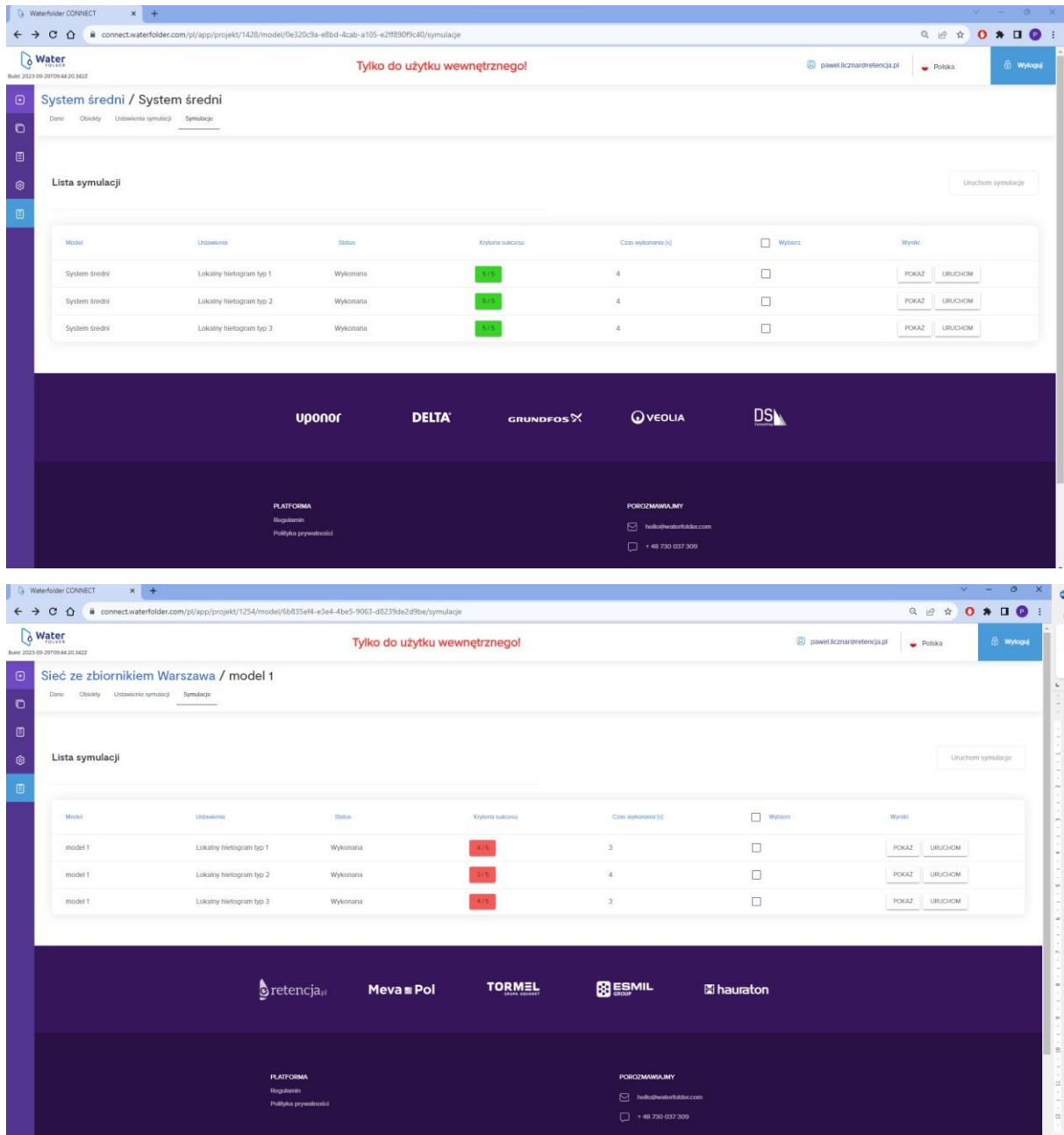
SWMM to odczyt wartości domyślnych w modelu zaimportowanym do aplikacji SWMM. Topologia modelu SWMM podlega dalszej modyfikacji po uzupełnieniu systemu np. o zbiornik retencyjny lub regulator przepływu (rysunek 31.). Po doborze tych dodatkowych elementów systemu odwodnienia następuje automatyczne wygenerowanie domyślnego modelu hydrodynamicznego, połączone z zachętą do przejścia do symulacji hydrodynamicznych (rysunek 32.). Po akceptacji tego zaproszenia można wykonać symulacje dla lokalnych hietogramów wzorcowych. Po ich wykonaniu otrzymuje się zbiorcze podsumowanie z podaniem czasów trwania obliczeń (rysunek 33.) oraz informacją dotyczącą spełnienia (lub niespełnienia) poszczególnych kryteriów sukcesu symulacji (rysunek 34.).



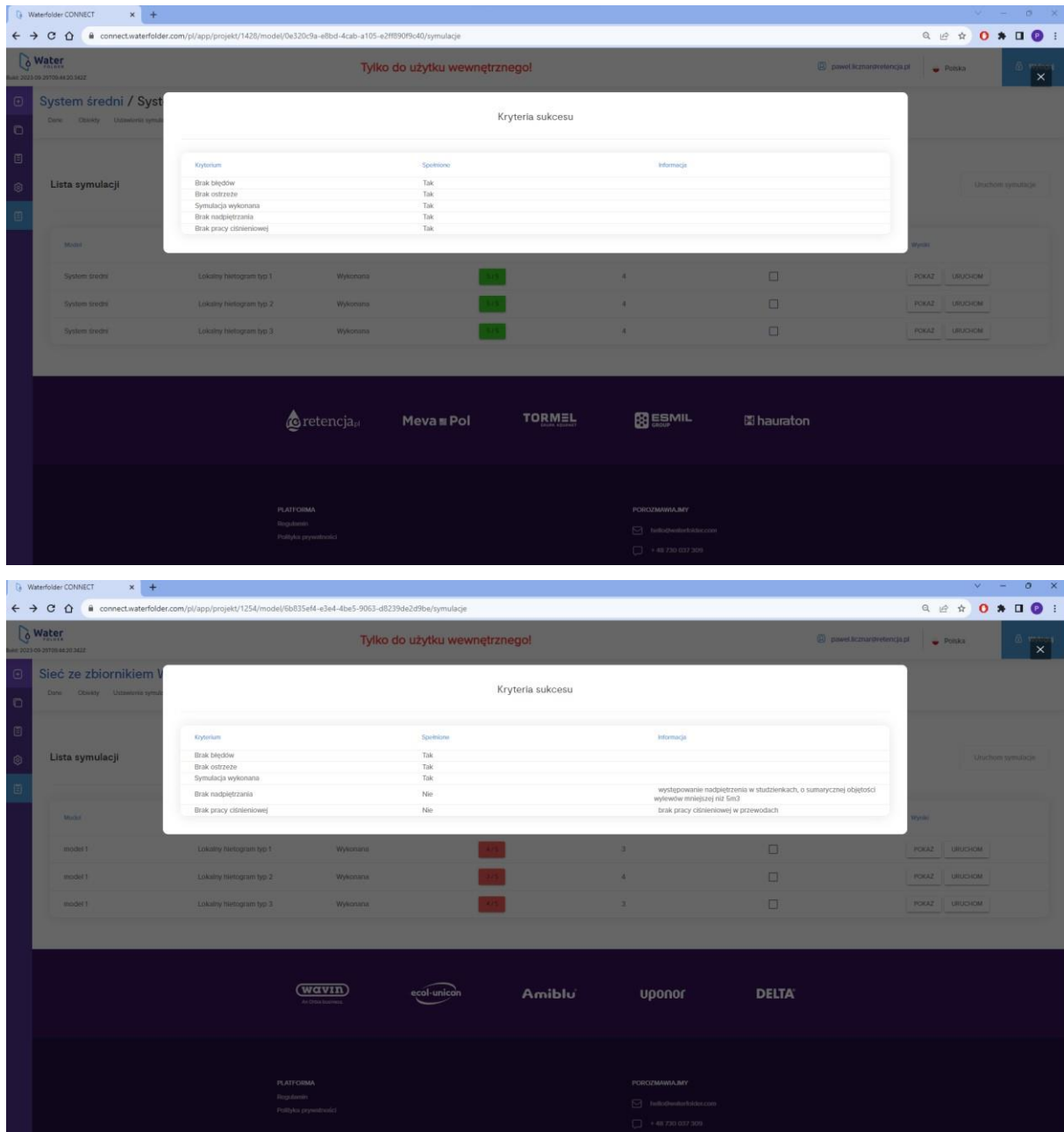
Rysunek 31. – Dalszy krok Wizardu, przykładowe uzupełnienie systemu odwodnienia o dobór zbiornika retencyjnego wyposażonego w regulator o maksymalnym natężeniu przepływu 150 dm³/s, z jego montażem na dnie (dobór zbiornika może być prowadzony na inne prawdopodobieństwo, niż kanałów sieci) (RETENCJAPL)



Rysunek 32. – Automatyczne wygenerowanie domyślnego modelu hydrodynamicznego, połączone z zachętą do przejścia do symulacji hydrodynamicznych (RETENCJAPL)



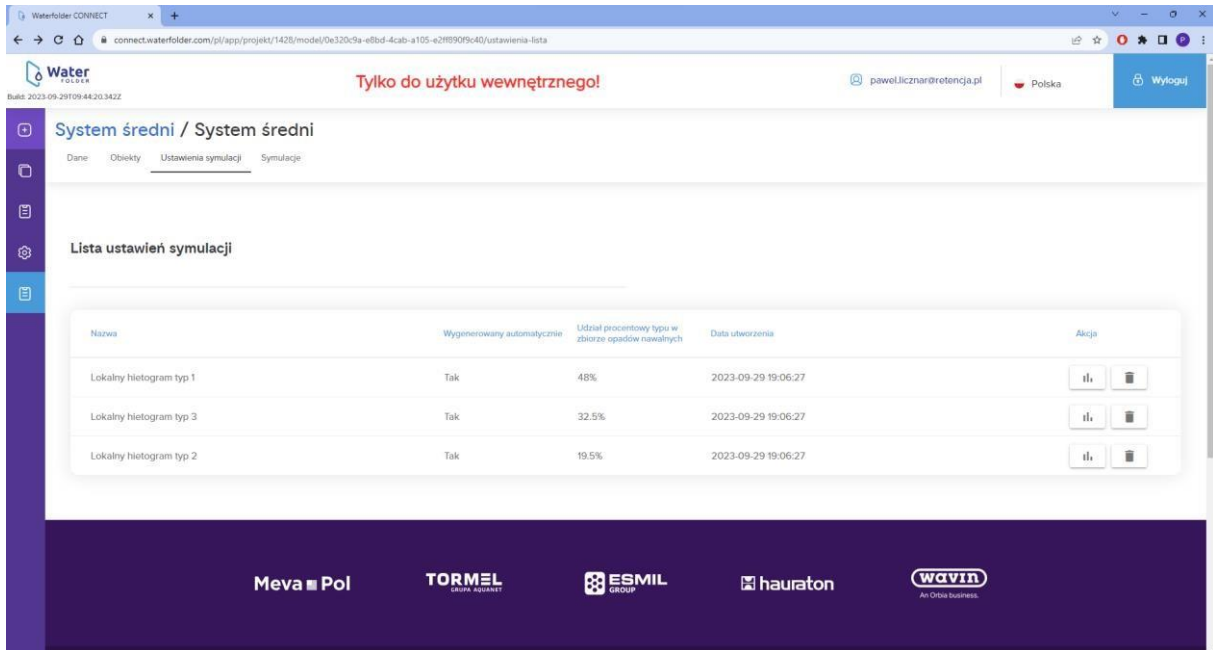
Rysunek 33. – Podsumowanie wyników symulacji dla trzech lokalnych hietogramów wzorcowych (dla dwóch różnych Projektów i Modeli) (RETENCJAPL)



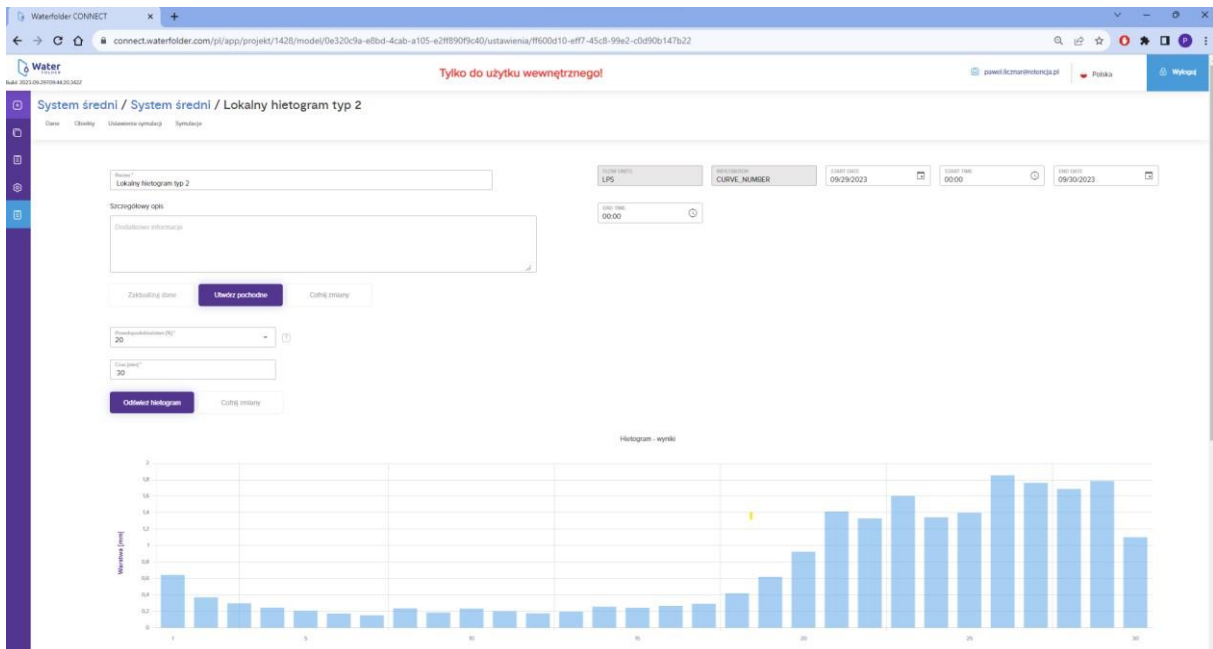
Rysunek 34. – Informacje dotyczące spełnienia lub niespełnienia wszystkich pięciu podstawowych kryteriów sukcesu symulacji (przykłady dla dwóch różnych Modeli, panel górny i dolny) (RETENCJAPL)

Domyślne ustawienia symulacji mogą być modyfikowane w zakładce Ustawienia symulacji dla każdego z lokalnych hietogramów (rysunek 35.). Dla każdego z hietogramów można modyfikować czas jego trwania i prawdopodobieństwo (rysunek 36.). Domyślnie czas trwania opadu jest przyjmowany jako minimum równy 30 min i dłuższy lub równy dwukrotności czasu odpływu wód przez system odwodnienia (co wynika z zaleceń i wytycznych Schmitta T. G., 2000). Ponadto można zmieniać czas trwania symulacji dla

wybranego typu hietogramu wzorcowego (przyjmowany domyślnie czas symulacji jest równy 24 h, jest to np. minimalny czas opróżniania zbiorników retencyjnych).

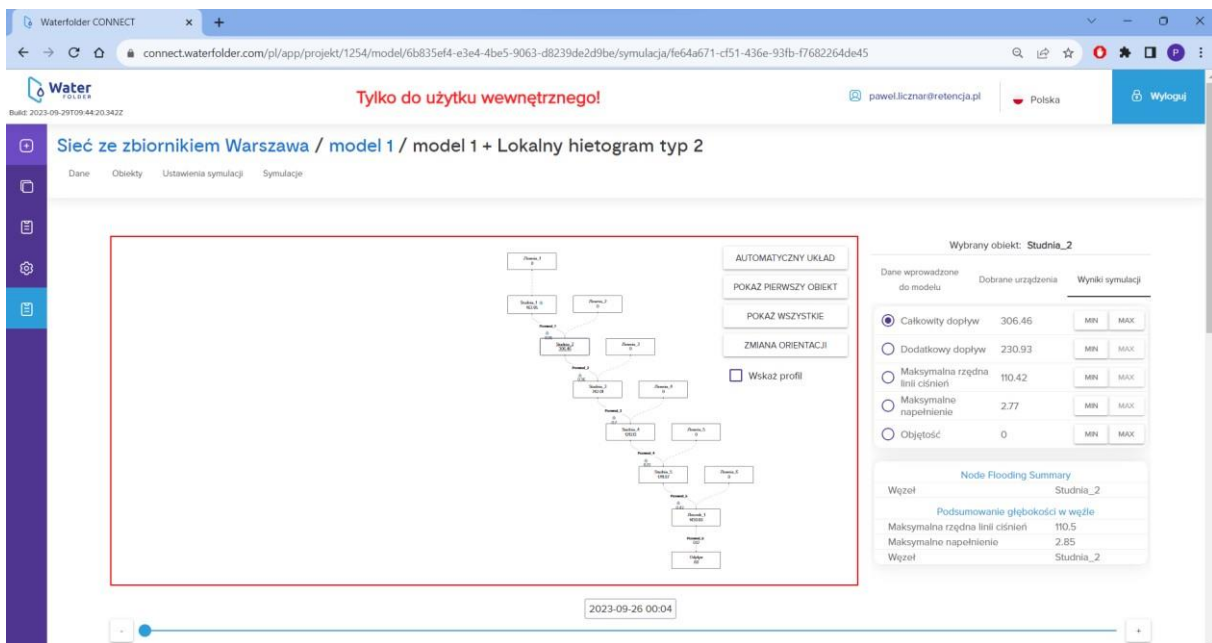


Rysunek 35. – Zakładka Ustawienia symulacji dla przykładowych trzech lokalnych hietogramów (RETENCJAPL)

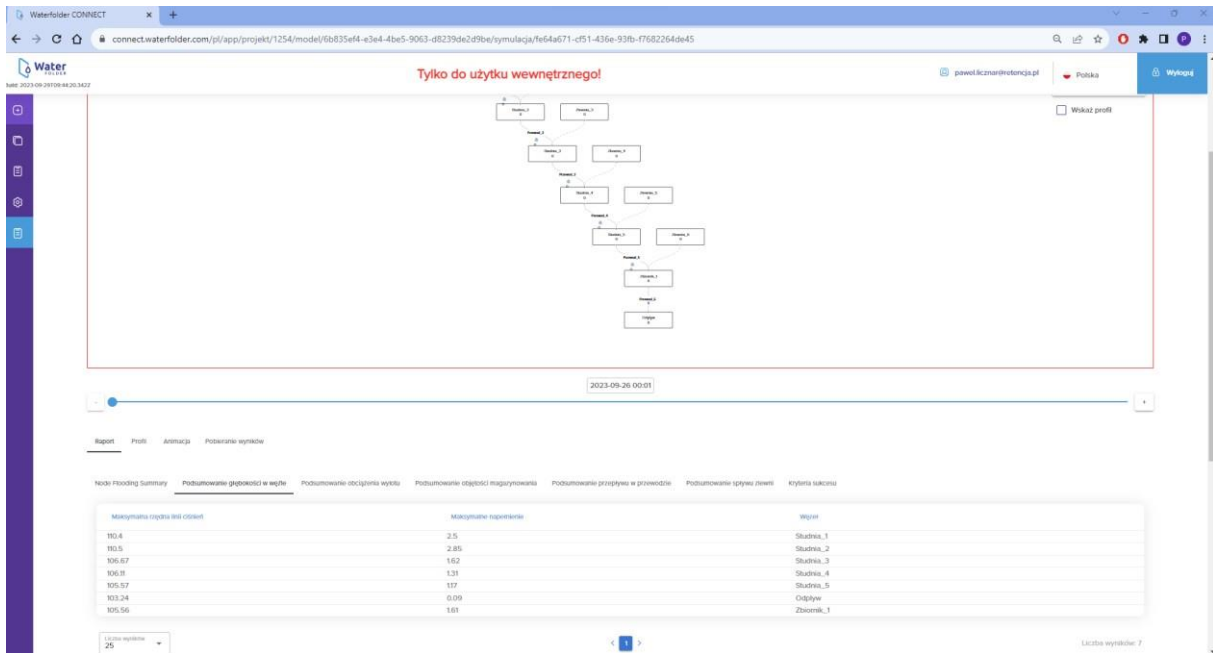


Rysunek 36. – Modyfikacja parametrów symulacji dla wybranego typu lokalnego hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL)

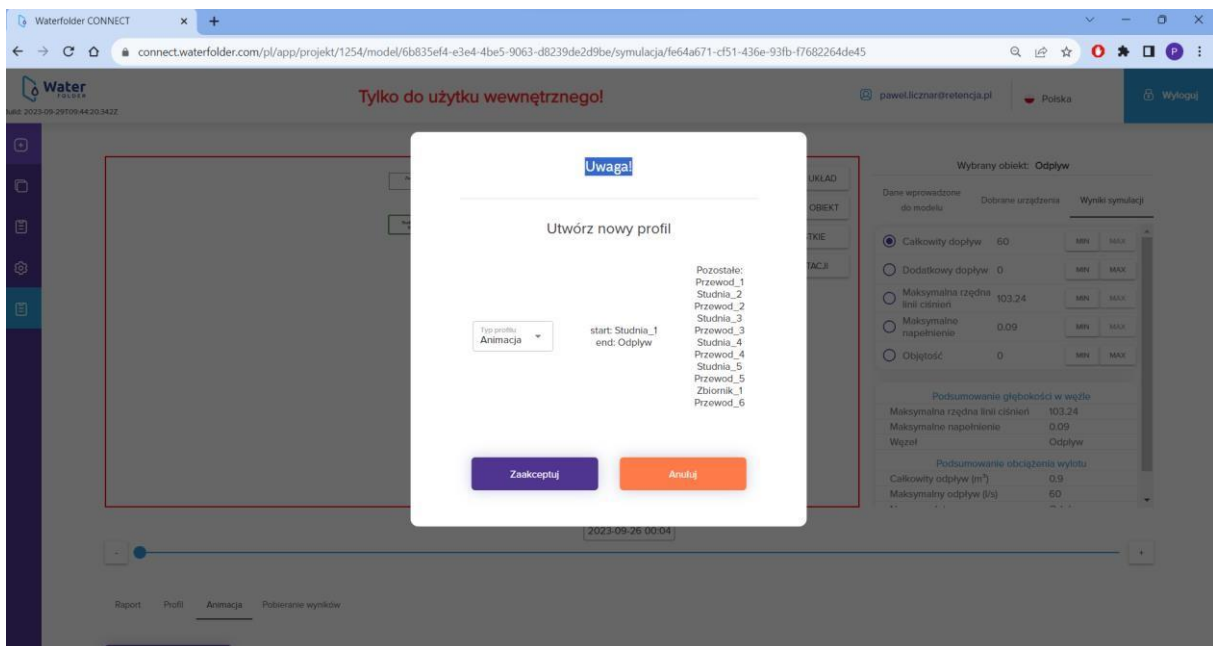
Na koniec można przejść do przeglądu wyników symulacji hydrodynamicznych opracowanego modelu, dla każdego wybranego hietogramu wzorcowego, wybierając poszczególne elementy składowe na Wizardzie (rysunek 37.) lub przeglądając zbiorcze raporty w dolnej części okna (rysunek 38.). Można także przeglądać wyniki w postaci symulacji dla wyselekcjonowanego profilu sieci, co wymaga przejścia do zakładki Animacja i wskazania ścieżki profilu (jego początku i końca) (rysunek 39.). Na rysunku 40. zaprezentowany został przykładowy slajd z symulacji, na którym widać negatywne oddziaływanie zbiornika, który powoduje „cofkę”, a w efekcie pracę ciśnieniową wyżej położonych kanałów i napiętrzenia ze studni ponad poziom terenu.



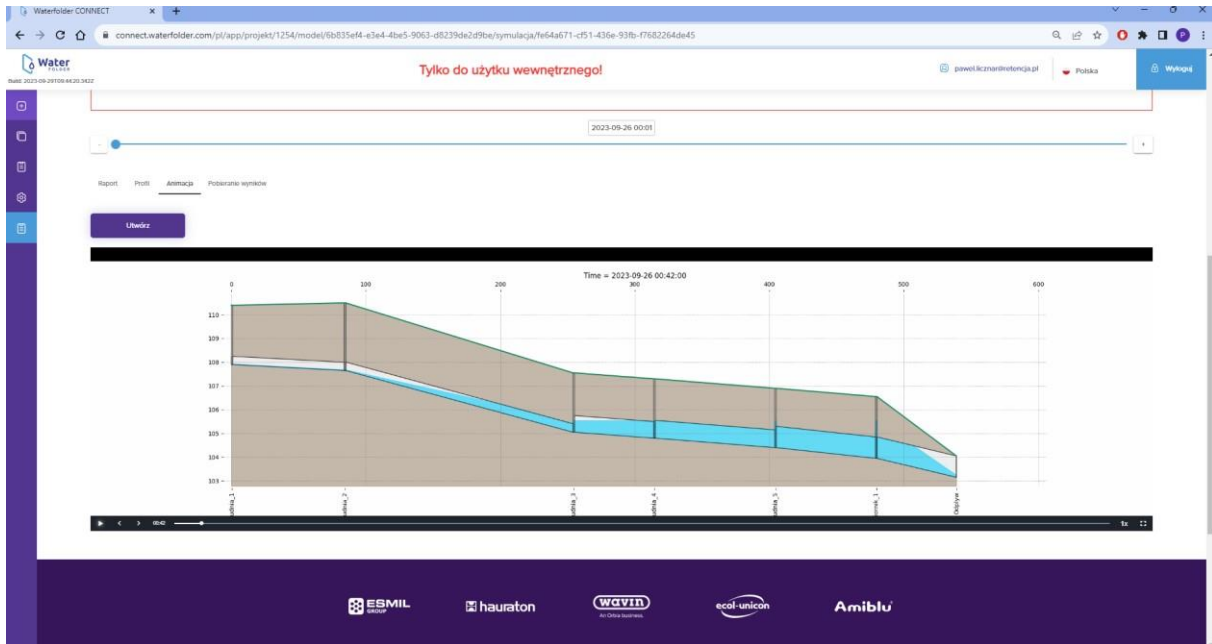
Rysunek 37. – Wybrane wyniki symulacji hydrodynamicznej dla wyselekcjonowanego elementu na Wizardzie (wybrany obiekt to Studnia_2) (RETENCJAPL)



Rysunek 38. – Przykładowe zbiorcze wyniki symulacji hydrodynamicznej w zakładce Raport (RETENCJAPL)



Rysunek 39. – Wskazania ścieżki profilu (jego początku i końca) celem wyświetlenia animacji przepływu (RETENCJAPL)

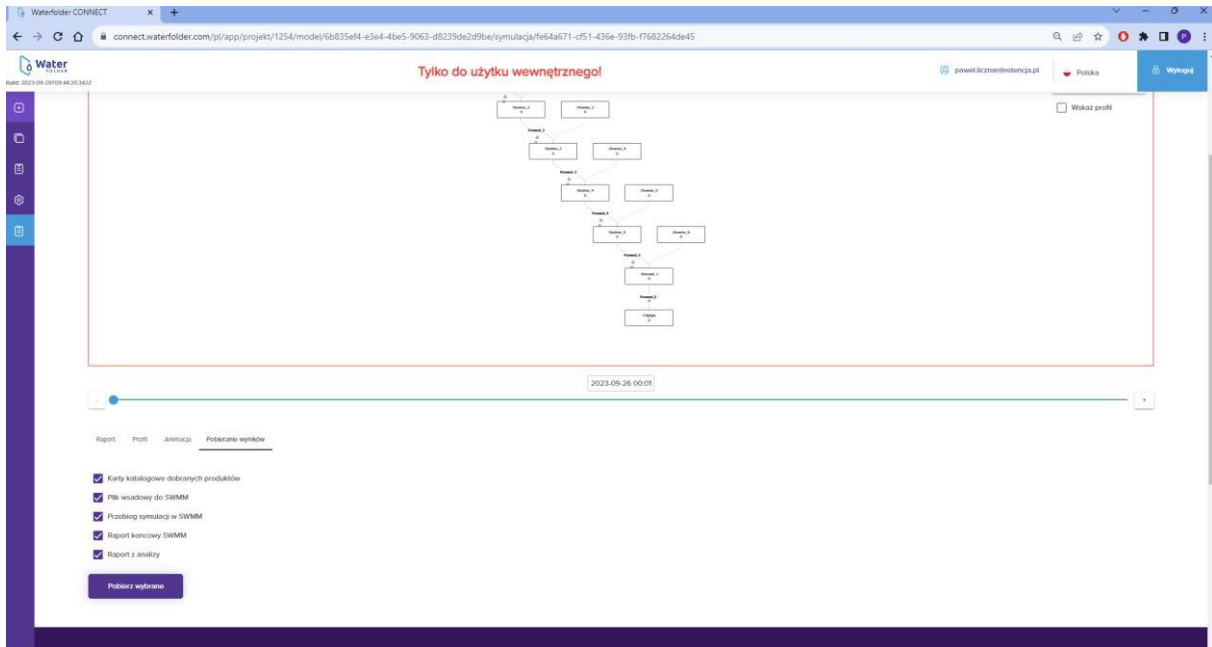


Rysunek 40. – Animacja odpływu wód opadowych, widoczne oddziaływanie zbiornika prowadzące do cofki w wyżej położonych przewodach, z czego wynika niespełnienie wszystkich pięciu kryteriów symulacji (zjawisko przepływu ciśnieniowego i nadpiętrzeń sieci), co znajduje potwierdzenie na rysunku 41. (RETENCJAPL)

Kryterium	Spełnione	Informacja	Obiekty
Brak błędów	Tak		
Brak nadpiętrzenia	Nie	występowanie nadpiętrzenia w studzienkach, o sumarycznej objętości wylewów mniejszej niż 5m ³	Studnia_1
Brak ostrzeżeń	Tak		
Brak pracy ciśnieniowej	Nie	brak pracy ciśnieniowej w przewodach	Przewod_1, Przewod_2, Przewod_3, Przewod_4, Przewod_5
Symulacja wykonana	Tak		

Rysunek 41. – Zbiorcze wyniki symulacji hydrodynamicznej w zakładce Raport – wyszczególnienie obiektów niespełniających kryteriów poprawnego działania sieci (RETENCJAPL)

Istnieje także możliwość pobrania opracowanego modelu hydrodynamicznego SWMM wraz z plikami z wynikami symulacji i raportem z symulacji (pliki o rozszerzeniach inp, out, rpt) (rysunek 42.).



Rysunek 42. – Zakładka do poboru opracowanego modelu hydrodynamicznego SWMM wraz z plikami z wynikami symulacji i raportem z symulacji (pliki o rozszerzeniach inp, out, rpt) (RETENCJAPL)

Wszystkie tworzone Projekty i zawarte w nich Modele (modele hydrodynamiczne) są przechowywane w chmurze, można do nich dotrzeć z dowolnego urządzenia po zalogowaniu się na platformę connect.watfolder.com (rysunek 43.). Ponadto już istniejące modele mogą być w łatwy sposób powielane (kopiowane) celem pełnienia roli prototypów następnych modeli hydrodynamicznych, co pozwala na iteracyjne poprawianie (modyfikowanie) modeli systemów odwodnienia (rysunek 44.).

Nazwa	Lokalizacja	Data aktualizacji	Akcje
System mały kopia dla Białystok	Białystok	2023-09-27 11:08:32	KLONUJ USUN SKLONOWANE
System mały kopia dla Bardo	Bardo	2023-09-27 11:08:32	KLONUJ USUN SKLONOWANE
System mały kopia dla Baligród Mchawa	Baligród Mchawa	2023-09-27 11:08:31	KLONUJ USUN SKLONOWANE
Demonstracja	Gdańsk	2023-09-26 16:25:50	KLONUJ USUN SKLONOWANE
System średni	Bydgoszcz	2023-09-29 14:12:05	KLONUJ USUN SKLONOWANE
System mały	Bydgoszcz	2023-09-20 11:53:54	KLONUJ USUN SKLONOWANE
Sieć ze zbiornikiem Warszawa	Warszawa	2023-09-06 18:27:45	KLONUJ USUN SKLONOWANE
test_1_wroc	Wrocław	2023-08-23 13:39:07	KLONUJ USUN SKLONOWANE
Projekt w Warszawie	Warszawa	2023-08-17 09:21:51	KLONUJ USUN SKLONOWANE
projekt testowy nr 1	Wrocław	2023-08-10 10:47:50	KLONUJ USUN SKLONOWANE

Rysunek 43. – Przykładowe zestawienie Projektów na koncie użytkownika na platformie connect.watfolder.com (RETENCJAPL)

Nazwa	Data utworzenia	Nieudany wizard	Akcja
- M2	2023-08-16 22:51:10	Nie	🗑️
- M3	2023-08-16 23:03:41	Nie	🗑️
+ M4	2023-08-17 22:14:44	Nie	🗑️
- M2_test_vs_swmm	2023-08-23 13:48:03	Nie	🗑️
- M2_test_vs_swmm_popr_manning	2023-08-24 09:30:44	Nie	🗑️
+ M2_test_vs_swmm_popr_manning_popr_srednica	2023-08-25 12:32:18	Nie	🗑️

Rysunek 44. – Przykładowa struktura modeli hydrodynamicznych w kolejnych iteracjach zmian projektu systemu odwodnienia na platformie connect.watfolder.com (RETENCJAPL)

6.3. Prowadzenie symulacji z użyciem silnika obliczeniowego SWMM

Celem prowadzenia symulacji hydrodynamicznych z użyciem silnika obliczeniowego SWMM na platformie `connect.watfolder.com` korzysta się z usługi AWS (Amazon Web Services) Lambda. Lambda AWS to bezserwerowa (serverless) funkcja jako usługa, czyli Function as a service (FaaS), dostarczająca obliczenia oparte na funkcjach. W skrócie Lambda pozwala na tworzenie kodu i zarządzanie aplikacją bez konieczności utrzymywania własnych serwerów. Umożliwia tworzenie aplikacji w chmurze. AWS Lambda uruchamia określony kod, który to może to być zapisany w jednym z języków obsługiwanych przez AWS Lambda: Java, Node, js, Python lub C#. Usługa ta może bez przeszkód przenosić biblioteki, artefakty lub skompilowane natywne pliki binarne, które mogą być uruchamiane w środowisku wykonawczym jako element pakietu kodu funkcji. Dzięki funkcji Lambda można uruchomić kod dla praktycznie każdego typu aplikacji lub usługi backendu. Co istotne, lambda obsługuje i skaluje kod z wysoką dostępnością. Dodatkowo w momencie, gdy istnieje wiele jednoczesnych zdarzeń (np. wielu użytkowników zechce jednocześnie przeprowadzić symulacje hydrodynamiczne), na które należy odpowiedzieć, AWS Lambda w prosty sposób równolegle uruchamia więcej kopii funkcji. Ta pozytywna cecha usługi Lambda AWS została potwierdzona w czasie testów, w trakcie których uzyskano bardzo krótkie czasy obliczeń, pomimo generowania i symulacji jednocześnie pakietów liczących po 100 modeli systemów odwodnienia dla łącznie 368 różnych hietogramów. Funkcje Lambdy skalują precyzyjnie procesy obliczeniowe na serwerach AWS, wraz z wielkością obciążenia, aż do indywidualnego żądania. Rozwiązanie to zostało wybrane, gdyż jest pragmatyczne z uwagi na: brak konieczności zarządzania serwerem, elastyczne skalowanie i wysoką dostępność (aplikacje bezserwerowe typu AWS Lambda mają wbudowaną dostępność oraz tolerancję błędów). Nie trzeba też planować i tworzyć rezerwowych bloków pojemnościowych na potrzeby obliczeń czy magazynowania danych, a ponoszone przy tym koszty są niskie, gdyż modelem rozliczeniowym AWS Lambda jest model Pay-as-you-go. W przypadku platformy `connect.watfolder.com` funkcja Lambda AWS obsługuje SWMM (EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL) w wersji 5.2 (Build 5.2.3).

Funkcja Lambda jest skonfigurowana do monitorowania przy użyciu usługi AWS CloudWatch.

Wszystkie dzienniki i metryki są zbierane i przesyłane do CloudWatch w celu monitorowania wydajności i reagowania na błędy. Funkcja Lambda jest chroniona przez

mechanizmy bezpieczeństwa dostarczane przez AWS, takie jak zarządzanie rolami IAM (Identity and Access Management), kontrola dostępu i szyfrowanie danych w ruchu i w spoczynku.

Środowisko Uruchomieniowe AWS Lambda silnika obliczeniowego SWMM na platformie connect.watfolder.com ma następujące parametry:

- Pamięć Wydzielona: 10 GB;
- Przestrzeń Robocza: 5 GB;
- Limit Czasu Wykonania: 15 minut.

6.4. Testy transformacji projektu w model oraz niezawodności symulacji

Celem przetestowania opisywanej wcześniej aplikacji do automatycznej transformacji projektu systemu odwodnienia w model hydrodynamiczny i oceny niezawodności symulacji hydrodynamicznych, z użyciem silnika obliczeniowego SWMM uruchamianego na platformie connect.waterfolder.com, sporządzono 300 projektów systemów odwodnienia dla 100 lokalizacji w Polsce odpowiadających położeniu 100 deszczomierzy projektu Atlasu PANDa (tabela 1.). Zbiór sporządzonych projektów systemów odwodnienia obejmował:

- 1) 100 małych systemów odwodnienia;
- 2) 100 średnich systemów odwodnienia;
- 3) 100 średnich systemów odwodnienia ze zbiornikiem retencyjnym.

Jako prototyp średniego systemu odwodnienia przyjęto sieć kanalizacji deszczowej zamieszczoną w podręczniku Błaszczyka (Błaszczyk i Roman, 1974). Sieć ta, o długości całkowitej 1165 m, posiada łączną zlewnię o powierzchni zredukowanej 10,69 ha. W tabeli 7. zestawiono podstawowe parametry tej sieci, w tym długości kanałów, rzędne dna kanałów i terenu oraz powierzchnie zredukowane kolejno przyłączanych elementarnych zlewni spływu. Zapisane rzędne dotyczą tylko lokalizacji sieci w Warszawie, zatem celem ich przeniesienia, adaptacji do innych lokalizacji wyznaczono głębokości poszczególnych studni.

Jako prototyp średniego systemu odwodnienia ze zbiornikiem retencyjnym przyjęto sieć kanalizacji deszczowej analogiczną, jak w tabeli 7., z modyfikacją polegającą na zamianie studni/węzła 9. w zbiornik retencyjny z regulatorem hydraulicznym. Doboru dokonywano na

maksymalnym odpływie 150 dm³/s dla częstości deszczu C=10 lat (p=10%) i średnim współczynnikiem ryzyka (rysunek 31.).

Natomiast jako prototyp małego systemu odwodnienia przyjęto sieć kanalizacji jak w tabeli 7., ale zredukowaną do czterech pierwszych studni, a więc o długości 315 m i powierzchni 1,46 ha.

Nr studni/węzła	Długość kanału, [m]	Powierzchnia zredukowana zlewni, [ha]	Rzędna dna, [m n.p.m.]	Rzędna terenu, [m n.p.m.]	Głębokość, [m]
1	-	0,31	107,9	110,4	2,5
2	85	0,46	107,65	110,5	2,85
3	170	1	105,05	107,55	2,5
4	60	1,13	104,8	107,3	2,5
5	90	1,23	104,4	106,9	2,5
6	75	1,73	103,95	106,55	2,6
7	60	0,52	103,15	105,75	2,6
8	140	0,86	102,55	105,15	2,6
9	335	3,45	95,9	98,5	2,6
10	150	-	93,8	96	2,2
Suma:	1165	10,69			

Tabela 7. - Podstawowe parametry prototypowego średniego systemu odwodnienia (RETENCJAPL)

W dalszym etapie badań sporządzono po 100 projektów systemów odwodnienia w trzech wariantach (system mały, system średni i system średni ze zbiornikiem) dla 100 lokalizacji w Polsce. Dokonano przy tym zabiegu lokalizacji, czyli dostosowania wysokości przebiegu terenu i dna sieci do warunków lokalnych (rzędnej deszczomierza w tabeli 1.), a także przyjęcia odpowiednich lokalnych modeli opadowych Atlasu PANDa na podstawie współrzędnych z tabeli 1. do wymiarowania poszczególnych elementów systemów odwodnienia. Kanały sieci projektowano na deszcz miarodajny o częstości C=5 lat (p=20%). W wyniku projektowania uzyskano systemy o różniących się gabarytach, dostosowanych do lokalnych warunków opadowych i wysokościowych.

Zaprojektowane systemy, które automatycznie przekształciły się na platformie connect.waterfolder.com na modele hydrodynamiczne, skierowano do symulacji hydrodynamicznych. W sposób zamierzony poszczególne typy systemów odwodnienia kierowano do obliczeń całymi pakietami po 100 lokalizacji. Oznaczało to, że funkcja Lambda AWS musiała jednocześnie obsługiwać uruchomienie 368 równoległych symulacji. Liczba 368

symulacji jest łączną sumą wszystkich bezwymiarowych hietogramów wyznaczonych na sieci 100 stacji (58 stacji z 3 wzorami, 37 stacji z 3 wzorcami i 5 stacji z 5 wzorcami)

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że uzyskano pełną (100%) efektywność automatycznej transformacji projektów na modele hydrodynamiczne (dotyczyło to wszystkich 300 projektów systemów odwodnienia). Ponadto, pomimo pakietowego (równoległego) prowadzenia każdorazowo serii 368 symulacji dla różnych hietogramów dla 100 lokalizacji w Polsce, uzyskano dla wszystkich trzech typów systemów pełną (100%) niezawodność symulacji hydrodynamicznych. Zdecydowana większość symulacji zakończyła się pozytywnym wypełnieniem wszystkich pięciu kryteriów powodzenia symulacji. Jedynie w przypadku kilku symulacji dla wybranych hietogramów zaobserwowano spełnienie 4 z 5 kryteriów powodzenia symulacji. W symulacjach tych pojawiały się chwilowe okresy pracy ciśnieniowej niektórych kanałów sieci. Należy jeszcze dodać, że zachowywane pliki inp mogą być otwierane w aktualnej wersji aplikacji SWMM, zawierają one pełną strukturę bazy modelu (np. zestawienia węzłów, kanałów, szeregi czasowe opadów, itp.) z możliwością prowadzenia nowych symulacji, ale są pozbawione warstwy rysunkowej (w oknie graficznym SWMM nie wyświetla się po ich otwarciu schemat sieci).

W trakcie symulacji prowadzono pomiar czasu ich trwania dla każdej lokalizacji i hietogramu wzorcowego. Zanotowane wyniki są bardzo dobre i w całej rozciągłości potwierdzają zalety funkcji Lambda AWS, jako skalowalnej i efektywnej wydajnościowo usługi obliczeniowej w chmurze. Czasy obliczeń dla małego systemu wynosiły po 2 s na każdy hietogram wzorcowy. W przypadku systemów średnich, ze zbiornikiem lub bez, czasy obliczeń były około dwa razy dłuższe i wahały się od 4 do 5 s. Nadal były one znacznie krótsze od założonego limitu czasowego na poziomie 15 min.

7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie metodyki pozwalającej na klasyfikację i grupowanie deszczy do reprezentatywnych wzorców. Efektem dodatkowym prowadzonych prac jest opisanie całego warsztatu, dzięki któremu w przyszłości będzie można, w oparciu o nowe, zgromadzone po 2016 roku dane, zaktualizować opracowane wzorce opadów. Takie podejście wydaje się celowe i konieczne do realizacji, ponieważ aktualna zmiana klimatu ma określony wpływ na charakter rejestrowanych deszczy i w przyszłości można spodziewać się zmian nie tylko w intensywności deszczy miarodajnych, ale również ich dystrybucji w czasie (Mikołajewski i in., 2022).

W wyniku prac badawczych zaproponowano 100 zestawów lokalnych wzorców opadów, które odzwierciedlają charakterystykę wszystkich deszczy występujących w danym obszarze. W zależności od regionu było to 3, 4 lub 5 charakterystycznych hietogramów. Ponadto opracowano bazę danych zawierającą wszystkie istotne opady zarejestrowane na stacjach IMGW PiB w okresie 1986-2015, na której podczas badań przeprowadzono już różne analizy opisane w artykułach, a która to w przyszłości może również posłużyć do dalszych badań nad opadami atmosferycznymi w Polsce. Opracowano metodykę obiektywnej identyfikacji i grupowania hietogramów, która stosowana może być zarówno w skali całego kraju, jak i mniejszych obszarów, np. pojedynczych miast. Podjęto również próby analiz czasowych i obszarowych wydzielonych deszczy (Mikołajewski i in., 2024).

Przygotowane wzorce dystrybucji deszczu w czasie zostały zatwierdzone i wprowadzone przez zespół wdrożeniowy jako dane wejściowe do przygotowywanej przez firmę RETENCJAPL sp z o.o. nowej wersji aplikacji internetowej WaterFolder Connect. Pierwsze testy, w niedostępnej jeszcze dla użytkowników zewnętrznych wersji aplikacji, wykazały, że symulacje hydrodynamiczne prowadzone z wykorzystaniem danych wejściowych przygotowanych w oparciu o hietogramy wzorcowe realizowane są prawidłowo, a czas obliczeń jest minimalny, krótszy nawet od tego, który zakładano jako graniczny na początku tworzenia założeń. Zgodnie z planem rozwoju portalu internetowego dla projektantów, na początku roku 2025 zostanie udostępniona pierwsza, komercyjna wersja, w której system doboru i symulacji układów odwodnienia realizowany będzie w pełni graficznym i poprawionym interfejsie użytkownika. Wszystkie realizowane w tej aplikacji symulacje oparte będą na hietogramach wzorcowych, będzie to domyślny zbiór danych wykorzystywany do analizowania pracy układów odwodnieniowych tworzonych przez użytkowników.

Na praktyczne wykorzystanie osiągniętych wyników, należy poczekać do chwili komercyjnego startu platformy WaterFolder Connect. W chwili obecnej przygotowany materiał jest dostępny wewnątrz i wykorzystywany na potrzeby realizacji projektów prowadzonych aktualnie przez dział modelowania i analiz w krakowskim biurze firmy wdrażającej to rozwiązanie. Uzyskiwane wyniki są bardzo obiecujące i potwierdzają wszystkie założenia jakich spodziewano się podczas prowadzenia badań, tj. usystematyzowanie procesu, skrócenie czasu symulacji, zwiększenie wiarygodności obliczeń oraz uwzględnienie lokalnej charakterystyki opadów przy projektowaniu systemów odwodnieniowych.

Realne korzyści, osiągnane na dużą skalę, będzie można obserwować dopiero po planowanym uruchomieniu platformy i udostępnieniu jej projektantom. Skalę, na jaką wykorzystywane będzie wdrażane narzędzie, na razie można tylko określić na podstawie danych zgromadzonych do tej pory na poprzedniej platformie producenta, która pozwala na dobór podstawowych parametrów elementów układów odwodnieniowych tylko na podstawie natężeń deszczy miarodajnych z projektu PANDa. Aktualnie konto w aplikacji posiada ponad 8 000 użytkowników, a liczba ta cały czas rośnie (oficjalna liczba projektantów branżowych, zarejestrowanych w Polsce oscyluje w okolicy 25 000). Można więc przypuszczać, że w najbliższych dwóch latach ilość aktywnych kont wzrośnie do 10 000 – 12 000, co spowoduje, że teoretycznie prawie połowa inżynierów projektujących w naszym kraju systemy odwodnieniowe będzie mogła korzystać z wyników badań. Zarówno istniejąca wersja narzędzia, jak i jego druga, wprowadzana powoli generacja (umożliwiająca ocenę pracy układu w czasie i dla różnych scenariuszy deszczu) jest unikalnym rozwiązaniem na skalę międzynarodową. Dodatkowym i bardzo ważnym czynnikiem, który również znacząco wpłynie na popularyzację narzędzia wykorzystującego opracowane hietogramy wzorcowe, jest fakt coraz większego zaangażowania w ten projekt producentów, którzy są liderami w dostarczaniu elementów infrastruktury odwodnieniowej. Tym firmom również zależy, aby ich rozwiązania były dobierane i wykorzystywane w sposób najefektywniejszy, dlatego od lat wspierają rozwój narzędzi informatycznych służącym tym celom i promują je wśród swoich klientów oraz firm projektowych.

Głównymi beneficjentami wyników badań w najbliższym czasie będą więc inwestorzy planujący budowę lub modernizację systemów odwodnienia, wyspecjalizowani projektanci i biura projektowe, eksploatatorzy systemów kanalizacji deszczowej, jednostki miejskie zarządzające zasobami wodnymi na swoich terenach oraz wszystkie inne podmioty, którym potrzebne będą wyniki symulacji hydrodynamicznych sieci odwodnieniowych dostępne w bardzo prostej formie, od ręki, za pomocą internetowej aplikacji możliwej do uruchomienia

na każdym urządzeniu z dostępem do Internetu. W prostym rozrachunku przełoży się to bezpośrednio na tworzenie miast lepiej wykorzystujących zasoby naturalne, jakim niewątpliwie jest deszczówka, zamiast lepiej przygotowanych na ekstremalne zjawiska, takie, jakimi są zarówno deszcze nawalne, jak i susze, miast, które lepiej zaadoptują się do zmiany klimatu wprowadzając do swojej tkanki dobrze przygotowane elementy zielono-niebieskiej infrastruktury i w końcu miast, które będą bardziej przyjazne swoim mieszkańcom, czyli nam wszystkim.

Spisy i wykazy

Literatura

1. ATV 118. (1999). ATV 118 - Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungs-systemen.
2. Banasik K., Ostrowski J. (2010). Estimation of extreme flood flows in a small Carpathian river. *Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego*.
3. Błaszczyk W., Roman M. (1974). *Kanalizacja. Wydawnictwo Arkady*.
4. Burszta-Adamiak E., Licznar P., Zaleski J. (2019). Criteria for identifying maximum rainfalls determined by the peaks-over-threshold (POT) method under the Polish Atlas of Rainfalls Intensities (PANDa) project. *Meteorology, Hydrology and Water Management*. doi:<https://doi.org/10.26491/mhwm/93595>.
5. Dz.U. 2017 r. poz. 859, dalej „Ustawa z dnia 21 kwietnia 2017 r. o zmianie ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw”. (2017). Pobrano z lokalizacji <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20170000859>
6. Huff F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*.
7. Huff F.A. (1990). Time distributions of heavy rainstorms in Illinois. *Illinois State Water Survey*.
8. Licznar P., Burszta-Adamiak E., Łomotowski J., Stańczyk J. (2017). Modern proposal of methodology for retrieval of characteristic synthetic rainfall hyetographs. *E3S Web of Conferences*.
9. Licznar P., Łomotowski J., Rupp D. E. (2011). Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. *Atmospheric Research*.
10. Licznar P., Zaleski J., Burszta-Adamiak E., Gajda w., Jurczyk A., Lewandowski R., Mańczak P., Mikołajewski K., Oktawiec M., Ośródką K., Siekanowicz K., Stach A., Szturc J., Wereski S., Wilk p. (2020). Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa). *Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy*.

11. Mikołajewski K., Ruman M., Kosek K., Glixelli M., Dzimińska P., Ziętara P., Licznar P. (2022). Development of cluster analysis methodology for identification of model. *Science of the Total Environment*.
12. Mikołajewski K., Stach A., Ruman M., Kosek K., Kundzewicz Z. W., Licznar P. (2024). Heavy rainfalls in Poland and their hietographs. *Ambio*.
13. Paulhus J. L. H. (1965). Indian Ocean and Taiwan rainfalls set new records. *Monthly Weather Review*.
14. PKN. (2008). PN-EN 752:2008 Drain and sewer systems outside buildings. *PKN*.
15. PKN. (2017). PN-EN 752:2017 Drain and sewer systems outside buildings – Sewer system management. *PKN*.
16. RETENCJAPL SP. Z O.O. (2023). Raport wewnętrzny nr 03/2023.
17. RETENCJAPL SP. Z O.O. (2023). Raport wewnętrzny nr 04/2023.
18. Schmitt T. G. (2000). Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 Hydraulische.
19. Solon J. i in. . (2018). Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica*.
20. Wikipedia. (2024). *Informacje o SWMM*. Pobrano z lokalizacji https://en.wikipedia.org/wiki/Storm_Water_Management_Model
21. Wilk P., Wereski S., Mikołajewski K., Licznar P. (2020). Cyfrowa baza szeregów opadowych. W *Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa)*.

Wykaz tabel

1. Tabela 1. – Lista deszczomierzy projektu PANDa (Licznar i in., 2020)	11
2. Tabela 2. – Ilość deszczy nawalnych wydzielonych dla każdej lokalizacji (Mikołajewski i in., 2024)	18
3. Tabela 3. – Lista stacji na których usunięto opady osobliwe (opracowanie własne)...	24
4. Tabela 4. – Wartości parametrów k i $bootmean$ dla wszystkich stacji (Mikołajewski i in., 2024)	27
5. Tabela 5. – Zestawienie średnich wartości całkowitych wysokości, czasów trwania i intensywności średnich opadów nawalnych zaklasyfikowanych do poszczególnych skupień (Mikołajewski i in., 2024).....	29
6. Tabela 6. – Zestaw czterech bezwymiarowych hietogramów wzorcowych dla Poznania i opracowany na jego podstawie zestaw czterech hietogramów wzorcowych deszczy o czasie trwania 30 min oraz częstości $C=10$ lat (prawdopodobieństwie $p=10\%$) (RETENCJAPL).....	38
7. Tabela 7. – Podstawowe parametry prototypowego średniego systemu odwodnienia (RETENCJAPL).....	57

Wykaz rysunków

1. Rysunek 1. – Stosowane histogramy wzorcowe a) rozkład Eulera II b) opad „blokowy” (opracowanie własne)..... 5
2. Rysunek 2. – Hietogramy trzech przykładowych deszczy zarejestrowanych na stacji Katowice (opracowanie własne na podstawie danych z aplikacji RainBrain)..... 6
3. Rysunek 3. – Wynik modelowania hydrodynamicznego przedstawiony na mapie miasta Gliwice (RETENCJAPL)..... 8
4. Rysunek 4. – Rozmieszczenie deszczomierzy projektu PANDa na mapie Polski (opracowanie własne na podstawie danych z RETENCJAPL)..... 10
5. Rysunek 5. – Dendrogram znormalizowanych opadów dla deszczomierza Katowice (opracowanie własne)..... 15
6. Rysunek 6. – Wykresy parametrów CHIndax oraz wws dla deszczomierza w Karpaczu (Mikołajewski i in., 2024)..... 16
7. Rysunek 7. – Liczba wydzielonych deszczy dla wszystkich 100 lokalizacji (opracowanie własne)..... 18
8. Rysunek 8. – Zestawienie warstwy i czasu trwania wszystkich wydzielonych deszczy w porównaniu maksymalnych wartości prawdopodobnych opadów (PMP) dla świata, Wielkiej Brytanii i Polski (Mikołajewski i in., 2024)..... 19
9. Rysunek 9. – Histogramy ilości deszczy w funkcji czasu trwania, warstwy oraz intensywności wraz z dopasowanymi funkcjami dystrybucji (Mikołajewski i in., 2024) 20
10. Rysunek 10. – Dwa wykresy prezentujące przykładowy opad znormalizowany przedstawiony w formie intensywności (górny) oraz narastającej warstwy opadu (dolny) (opracowanie własne)..... 21
11. Rysunek 11. – Zestawienie znormalizowanych hietogramów dla stacji meteorologicznej Kraków (50°04'40"N i 19°47'42"E) (Mikołajewski i in., 2022) 22
12. Rysunek 12. – Dendrogram opadów znormalizowanych dla stacji Ustka (opracowanie własne) 23
13. Rysunek 13. – Przykład usuniętego deszczu, który zarejestrowany został przez deszczomierz z zapchanym lejkiem. (opracowanie własne na podstawie danych z aplikacji RainBrain)..... 24

14. Rysunek 14. – Wartości indeksu CHIndex i parametru wss dla liczby skupień k w zakresie od 2 do 20, obliczone dla zbioru 214 deszczy z Warszawy (opracowanie własne)	25
15. Rysunek 15. – Wartości indeksu CHIndex i parametru wss dla liczby skupień k w zakresie od 2 do 20, obliczone dla zbioru 365 deszczy z Lęborka (opracowanie własne)	25
16. Rysunek 16. – Hietogramy wzorcowe dla stacji Warszawa (opracowanie własne)	28
17. Rysunek 17. – Hietogramy wzorcowe dla stacji Lębork (opracowanie własne)	28
18. Rysunek 18. – Ustalone liczby skupień i hietogramów wzorcowych na sieci 100 analizowanych deszczomierzy w Polsce na tle 18 podprowincji w podziale kraju na regiony fizycznogeograficzne (opracowanie własne na podstawie Solon i in., 2018).	31
19. Rysunek 19. – Podział obszaru Polski na 100 wieloboków Thiessena zgodnie z lokalizacją deszczomierzy wraz z przypisaniem każdemu z wieloboków liczby unikalnych zestawów hietogramów wzorcowych (opracowanie własne).....	32
20. Rysunek 20. – Podział obszaru Polski na 12885 oczek siaki o wymiarach 5 km x 5 km z unikalnymi modelami opadowymi wraz z lokalizacją 100 deszczomierzy atlasu PANDa (RETENCJAPL).....	36
21. Rysunek 21. – Podział obszaru Polski na 100 wieloboków Thiessena zgodnie z lokalizacją deszczomierzy Atlasu PANDa (RETENCJAPL).....	37
22. Rysunek 22. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 1 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL).....	39
23. Rysunek 23. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 2 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL).....	39
24. Rysunek 24. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 3 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%). Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL).....	40
25. Rysunek 25. – Wygenerowany na platformie hietogram wzorcowy typ 4 dla Poznania dla czasu trwania 30 min oraz częstości C=10 lat (prawdopodobieństwo p=10%).	

Podana w tytule wykresu wartość podobieństwa oznacza odsetek deszczy nawalnych o przebiegu podobnym do hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL).....	40
26. Rysunek 26. – Tworzenie projektu nowego systemu odwodnienia (RETENCJAPL).	42
27. Rysunek 27. – Utworzenie Modelu systemu odwodnienia, czyli projektu sieci odwadniającej, automatycznie konwertowanego w model hydrodynamiczny (RETENCJAPL).....	43
28. Rysunek 28. – Utworzony, pusty jeszcze model systemu odwodnienia (RETENCJAPL)	44
29. Rysunek 29. – Tworzenie łańcucha obliczeniowo-projektowego z użyciem kalkulatora doboru przewodów grawitacyjnych (RETENCJAPL).....	44
30. Rysunek 30. – Domyślnie przyjmowane wartości parametrów (takich jak np. Dstore-Imperv i DstorePerv czy też N-Imperv i N-Perv) przy konwersji zlewni spływu na Subcatchments w modelu (RETENCJAPL)	45
31. Rysunek 31. – Dalszy krok Wizardu, przykładowe uzupełnienie systemu odwodnienia o dobór zbiornika retencyjnego wyposażonego w regulator o maksymalnym natężeniu przepływu 150 dm ³ /s, z jego montażem na dnie (dobór zbiornika może być prowadzony na inne prawdopodobieństwo, niż kanałów sieci) (RETENCJAPL)	46
32. Rysunek 32. – Automatyczne wygenerowanie domyślnego modelu hydrodynamicznego, połączone z zachętą do przejścia do symulacji hydrodynamicznych (RETENCJAPL).....	46
33. Rysunek 33. – Podsumowanie wyników symulacji dla trzech lokalnych hietogramów wzorcowych (dla dwóch różnych Projektów i Modeli) (RETENCJAPL).....	47
34. Rysunek 34. – Informacje dotyczące spełnienia lub niespełnienia wszystkich pięciu podstawowych kryteriów sukcesu symulacji (przykłady dla dwóch różnych Modeli, panel górny i dolny) (RETENCJAPL)	48
35. Rysunek 35. – Zakładka Ustawienia symulacji dla przykładowych trzech lokalnych hietogramów (RETENCJAPL)	49
36. Rysunek 36. – Modyfikacja parametrów symulacji dla wybranego typu lokalnego hietogramu wzorcowego (RETENCJAPL).....	49
37. Rysunek 37. – Wybrane wyniki symulacji hydrodynamicznej dla wyselekcjonowanego elementu na Wizardzie (wybrany obiekt to Studnia_2) (RETENCJAPL).....	50
38. Rysunek 38. – Przykładowe zbiorcze wyniki symulacji hydrodynamicznej w zakładce Raport (RETENCJAPL).....	51

39. Rysunek 39. – Wskazania ścieżki profilu (jego początku i końca) celem wyświetlenia animacji przepływu (RETENCJAPL).....	51
40. Rysunek 40. – Animacja odpływu wód opadowych, widoczne oddziaływanie zbiornika prowadzące do cofki w wyżej położonych przewodach, z czego wynika niespełnienie wszystkich pięciu kryteriów symulacji (zjawisko przepływu ciśnieniowego i napiężeń sieci), co znajduje potwierdzenie na rysunku 41 (RETENCJAPL).....	52
41. Rysunek 41. – Zbiorcze wyniki symulacji hydrodynamicznej w zakładce Raport – wyszczególnienie obiektów niespełniających kryteriów poprawnego działania sieci (RETENCJAPL).....	52
42. Rysunek 42. – Zakładka do poboru opracowanego modelu hydrodynamicznego SWMM wraz z plikami z wynikami symulacji i raportem z symulacji (pliki o rozszerzeniach inp, out, rpt (RETENCJAPL)	53
43. Rysunek 43. – Przykładowe zestawienie Projektów na koncie użytkownika na platformie connect.watfolder.com (RETENCJAPL)	54
44. Rysunek 44. – Przykładowa struktura modeli hydrodynamicznych w kolejnych iteracjach zmian projektu systemu odwodnienia na platformie connect.watfolder.com (RETENCJAPL).....	54

Streszczenie w języku angielskim

Despite the increasing availability of high-resolution time series precipitation data in hydrology, especially in urban hydrology, engineers designing and modeling drainage systems still rely on predefined scenarios of rainfall distributions in time, using standard hyetograms. This creates a need for a reliable statistical workshop for developing and verifying locally used standard hyetograms. The development of a workshop for identifying similar precipitation patterns is also crucial for constructing real-time stormwater management systems, particularly those based on artificial intelligence.

The research conducted during the doctoral project presents a complete workshop for isolating intense rainfall events from the PANDa project database, clustering rainfall data into clusters with similar distributions over time, allowing for targeted identification of local standard hyetograms. This workshop is based on cluster analysis, including hierarchical agglomerative methods and k-means clustering. A novel aspect of the proposed workshop involves: objectifying the determination of the number of clusters based on the analysis of the total within-sum of squares and the Calinski-Harabasz index; verifying the internal cohesion and external isolation of clusters based on the bootmean parameter; and profiling the isolated clusters.

This workshop was created and initially tested on a large urban rainfall field scale specifically in the city of Kraków using a dataset of 1,806 intense rainfall events from 25 rain gauges. The results confirmed the utility and reproducibility of the developed methodology for partitioning intense rainfall datasets and identifying standard hyetograms in individual clusters across the entire city. Subsequently, this methodology was applied to analyze a dataset of 31,646 intense rainfall events extracted from the PANDa project database for 100 rain gauges in Poland. The resulting data allowed for the creation of several local precipitation patterns for each of the hundred areas in the country, grouping the most characteristic and frequently occurring rainfall distributions over time for those regions. These sets of local hyetograms were then implemented into the innovative web application WaterFolder Connect, which will facilitate accurate design, modeling, and verification of small urban drainage systems for all interested parties.

Until now, no software manufacturer for modeling urban drainage systems in the Polish market has provided such a unique dataset, enabling easier, faster, and more accurate analyses.

Streszczenie w języku polskim

Pomimo rosnącego dostępu do rejestracji szeregów czasowych opadów w wysokiej rozdzielczości czasowej w hydrologii, a zwłaszcza w hydrologii miejskiej, inżynierowie przy projektowaniu i modelowaniu systemów odwodnienia nadal korzystają ze scenariuszy rozkładów opadów w czasie, predefiniowanych z użyciem hietogramów wzorcowych. Wymusza to potrzebę dysponowania wiarygodnym warsztatem statystycznym służącym opracowywaniu, względnie weryfikacji lokalnie już stosowanych hietogramów wzorcowych. Rozwój warsztatu identyfikacji podobnych wzorców opadowych jest także istotny z punktu widzenia budowy systemów sterowania odpływem wód opadowych w czasie rzeczywistym, zwłaszcza tych opartych o sztuczną inteligencję.

W realizowanych podczas projektu doktorskiego badaniach prezentowany jest kompletny warsztat wydzielenia deszczy nawalnych z bazy danych projektu PANDa, podziału zbiorów opadów nawalnych na klastry opadów o podobnych rozkładach w czasie, pozwalający na docelową identyfikację zbiorów lokalnych hietogramów wzorcowych opadów. Warsztat ten jest oparty o analizę skupień, w tym hierarchiczną metodę aglomeracji oraz grupowanie metodą k – średnich (ang. k – means clustering). Nowum postulowanego warsztatu polega na: obiektywizacji ustalenia liczby klastrów bazującej na analizie wartości całkowitej wewnętrznej sumy kwadratów (ang. total within sum of squares - *wws*) oraz indeksu Calińskiego i Harabasa (CHIndex), weryfikacji wewnętrznej spójności i zewnętrznej izolacji klastrów na podstawie parametru *bootmean*, profilowaniu wydzielonych klastrów.

Warsztat ten został stworzony i przetestowany najpierw w skali dużego miejskiego pola opadowego – miasta Krakowa – na zbiorze łącznie 1806 opadów nawalnych z 25 deszczomierzy. Uzyskane wyniki potwierdziły użyteczność oraz powtarzalność opracowanej w skali całego miasta metodyki rozdziału zbiorów opadów nawalnych i identyfikacji hietogramów wzorcowych w poszczególnych klastrach. Następnie metodyka ta została wykorzystana do analizy zbioru 31646 deszczy nawalnych wydzielonych z bazy danych projektu PANDa dla 100 deszczomierzy w Polsce. Uzyskane w ten sposób dane pozwoliły na stworzenie dla każdego ze stu obszarów w kraju, kilku lokalnych wzorców opadowych, które grupują najbardziej charakterystyczne dla tych obszarów i najczęściej na nich występujące dystrybucje opadu w czasie. Takie zestawy hietogramów lokalnych zostały potem zaimplementowane do tworzonej nowatorskiej aplikacji internetowej WaterFolder Connect, która z ich wykorzystaniem będzie umożliwiawała wszystkim zainteresowanym na poprawne

projektowanie, modelowanie pracy i weryfikację działania małych, miejskich systemów odwodnieniowych.

Do tej pory, na rynku polskim, żaden producent oprogramowania do modelowania miejskich systemów odwodnieniowych nie dostarczał tak unikatowego zestawu danych, pozwalającego na łatwiejsze, szybsze i dokładniejsze analizy.

Publikacja 1

Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale

MIKOŁAJEWSKI Karol, RUMAN Marek, KOSEK Klaudia, GLIXELLI Marcin, DZIMIŃSKA Paulina, ZIĘTARA Piotr, LICZNAR Paweł.

Science of the Total Environment, 2022; 200 punktów MNiSW; Journal IF 8,2 (2023)



Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale



Karol Mikołajewski^{a,b}, Marek Ruman^{b,*}, Klaudia Kosek^{c,*}, Marcin Glixelli^d, Paulina Dzimińska^e, Piotr Ziętara^d, Paweł Licznar^e

^a RETENCJAPL Sp. z o.o., Gdańsk 80-868, Poland

^b Faculty of Natural Sciences, University of Silesia in Katowice, Sosnowiec 41-200, Poland

^c Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, Gdańsk 80-233, Poland

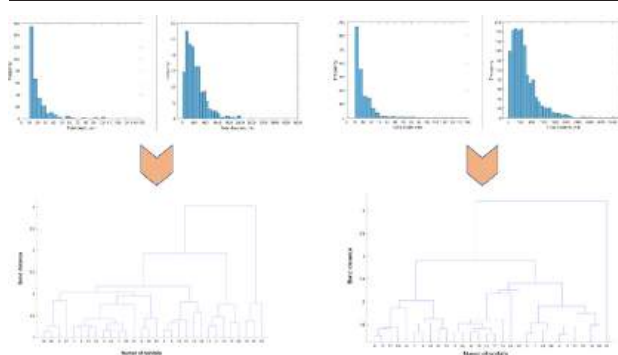
^d Krakow Water, Kraków 30-106, Poland

^e Faculty of Environmental Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław 50-377, Poland

HIGHLIGHTS

- With monitoring networks installation, high resolution rainfall series are available.
- The methodology is demonstrated at a scale of a large urban precipitation field.
- Results provide basis for probabilistic verification of drainage system functioning.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 November 2021

Received in revised form 27 February 2022

Accepted 11 March 2022

Available online 16 March 2022

Editor: Pavlos Kassomenos

Keywords:

Precipitation modelling

Storm rainfalls

Cluster analysis

Classification quality assessment indices

Water management

ABSTRACT

Despite growing access to precipitation time series records at a high temporal scale, in hydrology, and particularly urban hydrology, engineers still design and model drainage systems using scenarios of rainfall temporal distributions predefined by means of model hyetographs. This creates the need for the availability of credible statistical methods for the development and verification of already locally applied model hyetographs. The methodology development for identification of similar rainfall models is also important from the point of view of systems controlling stormwater runoff structure in real time, particularly those based on artificial intelligence. This paper presents a complete methodology of division of storm rainfalls sets into rainfalls clusters with similar temporal distributions, allowing for the final identification of local model hyetographs clusters. The methodology is based on cluster analysis, including the hierarchical agglomeration method and k-means clustering. The innovativeness of the postulated methodology involves: the objectivization of clusters determination number based on the analysis of total within sum of squares (wss) and the Caliński and Harabasz Index (CHIndex), verification of the internal coherence and external isolation of clusters based on the bootmean parameter, and the designated clusters profiling. The methodology is demonstrated at a scale of a large urban precipitation field of Kraków city on a total set of 1806 storm rainfalls from 25 rain gauges. The obtained results confirm the usefulness and repeatability of the developed methodology regarding storm rainfall clusters division, and identification of model hyetographs in particular clusters, at a scale of an entire city. The applied methodology can be successfully transferred on a global scale and applied in large urban agglomerations around the world.

* Corresponding authors.

E-mail addresses: karol.mikolajewski@retencja.pl (K. Mikołajewski), marek.ruman@us.edu.pl (M. Ruman), klaudia.kosek@pg.edu.pl (K. Kosek), marcin.glixelli@wodociagi.krakow.pl (M. Glixelli), dziminska.paulina@gmail.com (P. Dzimińska), piotr.zietara@wodociagi.krakow.pl (P. Ziętara), pawel.licznar@pwr.edu.pl (P. Licznar).

1. Introduction

Conducting calculations of non-stationary surface runoff of stormwaters and their further transformation in the stormwater system, including detention and retention in water bodies, requires the scenarios availability of rainfall temporal distribution. Precipitation scenarios employed by hydrological models usually determine the values of outflow volumes observed in the calculation results, the dynamics of their changes in time, and changes in the water volume retained in various elements of the drainage system. Due to historical conditions, and particularly calculation limitations, for decades, only the simplest models naturally employing the simplest rainfall scenarios could be implemented in practice in hydrology at its various scales, and particularly in urban hydrology. An extreme example can be the rational model, still commonly used today in designing urban and road drainage systems. It employs block rainfall, i.e., a scenario of rainfall with a specified duration and constant intensity determined based on the local IDF (Intensity-Duration-Frequency) model for the adopted frequency of its occurrence (Kundzewicz and Licznar, 2021(2022)). The block model is obviously a very specific rainfall scenario. Unlike in that model, as observed for natural rainfall, hydrological analyses usually assume the necessity of taking into consideration the temporal variability of point rainfall intensity, usually described in the graphic form by means of hyetographs. Adopting hyetographs in design aimed at reflecting rainfall temporal distributions analogical to the temporal courses of locally recorded rainfalls, and implicitly also potential rainfalls that may occur in the future. This has encountered numerous obstacles since the very beginning, resulting not only from the stochastic (random) nature of rainfall, but also from the multifractal nature of rainfall still unknown at the time. It is currently already evidenced that even simple time series of rainfall records from single rain gauges have a multifractal structure escaping the principles of simple Euclidean geometry (de Lima, 1998; Deidda et al., 1999; Licznar, 2009). Due to this, and due to the limited availability of research material (sets of precise rainfall records at a high temporal resolution), the historical methodology of hyetographs representative development for modelling, customarily called model hyetographs, had to be based on generalisation and simplification, and assumptions that should be currently rejected or subject to suitable validation. All this creates the need for undertaking new research in the scope of identification of model hyetographs.

Interest in model hyetographs certainly increased with first attempts of transition from stationary methods of calculation of urban stormwater systems towards non-stationary methods of simulation of their operation during stormwater runoff. It became possible due to the implementation of digital hydrodynamic models of sewage networks, such as e.g., programme SWMM (Storm Water Management Model) (Nix, 1994). Initially, however, due to the limited computing power of the available computers, focus was only placed on flows simulations in the underground canal system for single rainfalls. The model of stormwater runoff transformation in the sewage system was only combined with the hydrological surface runoff model, describing stormwaters inflow to network nodes (manholes and inlets) from the catchment area, and the stormwater system effect. The interaction of the stormwater system with the rainfall receiver was only possible to reflect by means of a suitable threshold condition on the network outlet. Rainfall introduced to the first generation of stormwater systems hydrodynamic models was a hyetograph of either a subjectively selected actual storm rainfall recorded by a pluviograph, or an artificial model hyetograph (often called model rainfall).

With rapid improvement of the computing power of computers, but without excessive complication of the algorithms of hydrodynamic models, it became possible to conduct simulations for entire series of local storm rainfalls. Their use enabled actual implementation of long-term simulations. After statistical processing, their final results could provide the basis for the probabilistic verification of the drainage system functioning in terms of stormwater system damming up frequency (Gires et al., 2012, 2013; Licznar, 2008), as well as e.g., the necessary volume of retention reservoirs of stormwaters (Licznar, 2013). This new reality seemingly

appeared to bring an end to the application of model hyetographs, at least in the area of urban hydrology. Moreover, with the installation of urban precipitation monitoring networks equipped with new generation electronic rain gauges, high temporal resolution rainfall series became much more available. In simulations of large stormwater systems, particularly in terms of development of their Real Time Control, records of rainfalls from entire networks of rain gauges began to be applied, or even spatial data from weather radars (Jakubiak et al., 2014). Afterwards at operational phase of RTC systems above mentioned observational rainfall data sources are often coupled with numerical weather predictions. It allows proper short-term prediction of extreme rainfall events, indispensable for urban flood alert broadcasting and selection of best scenarios of next RTC strategies. Here, there is a vivid need for effective whether pattern recognition algorithms, based on machine learning technique, as for example support vector machine implemented by Nayak and Ghosh (2013) in case of Mumbai, India. Finally, in response to the stochastic nature of precipitation processes, it was determined that it is the most credible to supply hydrodynamic models with not so much historical precipitation data (i.e., implementations of local precipitation processes that already took place) as much richer synthetic data generated by means of local precipitation generators (Molnar et al., 2006). Owing to progress in the scope of multiplicative random cascades, it became possible to develop generators not only for generating rainfall series (1-D) (Güntner et al., 2001; Hingray and Ben Haha, 2005; Licznar et al., 2011a, 2011b), but also spatial data (2-D) (Over and Gupta, 1994; Rupp et al., 2012), or even spatiotemporal data on rainfall (3-D) (Deidda, 2000).

Despite all the aforementioned conditions, the end of application of model hyetographs in urban hydrology has not arrived yet. To a certain extent this probably results from the conservatism of the engineers themselves, preferring design and drainage systems modelling based on simple and long-familiar model hyetographs. This facilitates their work e.g., in terms of time and equipment requirements necessary for conducting hydrodynamic simulations, and in accordance with the conservative provisions of rarely modified technical standards (Schmitt, 2000). Paradoxically, however, the application of model hyetographs is currently not limited to simple engineering works. They prove useful in the most advanced consulting works. Such works employ a completely qualitatively new approach to modelling stormwater networks, called integrated modelling. The software used for the purpose is much more advanced, because it combines three models: the hydrological streams model (receivers of stormwaters), the hydrodynamic stormwater network model, and the hydrological surface runoff model. The first two models are 1-dimensional, whereas the surface runoff model is a 2-dimensional model with an additional fill parameter. Naturally, the latter must be coupled with the digital terrain model (DTM). Although the application of integrated models brings numerous benefits, e.g., in the form of the possibility of tracing floodings on the surface of the DTM, it requires the use of complicated software launched on equipment with high computing power. Also in this case, simulations of larger drainage systems prove time-consuming and prone to numerical instabilities. As a result, simulation of runoff from the drainage system ceases to be feasible for tens or even hundreds of scenarios of storm rainfalls. In practice, complicated simulations on an integrated model can be only conducted for certain characteristic precipitation. This explains the return to the concept of the model hyetograph application or a narrow group of model hyetographs in the case of time-consuming simulations. It therefore remains an important issue to improve the methodology that could efficiently and objectively determine what model hyetographs would reflect local rainfall distributions variable in time in a satisfactory way.

In the case of the methodology modernisation of the model hyetographs development, it should be remembered that it began forming in the situation of strongly limited access to high temporal resolution rainfall records and statistical tools supporting their processes. Rainfall was recorded by means of simple rain gauges, e.g., pluviographs, and the records in the analogue form were difficult to process. Their processing usually involved a review of the records with designation of maximum rainfall with different

durations and structure, and determination of the resulting empirical DDF (Depth-Duration-Frequency) or IDF (Intensity-Duration-Frequency) dependencies. Due to this, it was proposed to use the information contained in DDF and IDF dependencies as the starting point for constructing model hyetographs. Next to the rectangular shape of block rainfall mentioned in the introduction, different authors recommended simple modifications of the shape of hyetographs. For example, Sifalda (1973), analysing the hydraulic operation of the stormwater network, postulated a hyetograph with a trapeze shape. At the scale of small catchments, Yen and Chow (1980) proposed transformation of rainfall depth read for the predefined duration and frequency from the DDF model into a triangular hyetograph. Probably due to the common use of the unit hydrograph method in the contemporary hydrology aimed at providing an estimate of direct runoff hydrographs resulting from given excess rainfall hyetograph, hyetographs with possibly simple shapes were eagerly used, composed of regular geometric figures. For example, in urban hydrology, Desbordes (1978) implemented the application of a hyetograph composed of “three” triangles. Peyron et al. (2002) attempted to simplify the shape through replacing two triangles representing the start and end impulses with rectangular courses. At the same time, in the conditions of Taiwan, Lee and Ho (2008) postulated the application of a model hyetograph with a shape built from two triangles. Even earlier, independently from the aforementioned papers, a concept appeared for the structure of the model hyetograph to be completely based on the reading of the entire IDF curve. The most classic example of the approach can be the continuous hyetograph for the city of Chicago developed by Keifer and Chu (1957). Another representative of this concept can be Euler type II model hyetograph (Schmitt, 2000), frequently encountered in the hydrodynamic modelling practice in Poland and Germany. The underlying idea of this type of hyetographs structures assumes a single artificial rainfall scenario including maximum point intensities for the entire hierarchy of partial times. It appears to be at variance with the observation of nature, where all maximums of point intensities are usually not recorded in a single rainfall at a specified level of frequency for durations lower and equal to total duration. Nonetheless, relying on the Euler type II hyetograph theoretically offers engineers the possibility to test the operation of the drainage system in a single simulation for all maximum point intensities simultaneously at a specified level of frequency of occurrence. Engineers are accustomed to using IDF curves, and their transformation into a Euler type II model hyetograph requires only simple algebra operations. In the case of analyses of larger drainage systems, it is even simpler for engineers in Poland and Germany to reach for a hyetograph recommended in the guidelines of DVWK (1984). Its development is based on the distribution of rainfall depth read from the DDF model to three rectangles with different intensity levels.

With time, the methodology of model hyetographs determination could be improved owing to the availability of increasingly richer measurement data from rain gauge networks. It became feasible to determine model hyetographs based on the large rainfall datasets analysis. The precursor of such an approach was Huff (1967), who analysed data from 49 rain gauges and 12 years (1955–1966) from the state of Illinois in the USA. Because the rainfalls retrieved from the records had different total durations and depths, he proposed normalisation of hyetographs, and application of dimensionless hyetographs. This permitted comparison of a dataset of 261 rainfalls that Huff (1967) classified according to whether the greatest percentage of cumulative rainfall occurred in the first, second, third, or fourth quarter of the storm duration. The resulting model Huff mass curves found numerous applications in hydrology. The analogical methodology of temporal variability analysis of rainfall distributions was not only repeated in further research by Huff (1970, 1990) himself, but also by many other scientists, e.g., Pani and Haragan (1981), Bonta and Rao (1987), Bonta (2004), Terranova and Iaquina (2011), Elfeki et al. (2014), Pan et al. (2017). Hydrologists in the USA also commonly apply model hyetographs defined by means of dimensionless mass curves recommended by the SCS (Soil Conservation Service) (McCuen, 1986). The increasingly rapidly growing digital databases of rainfalls records from electronic rain gauges, and the progress in the scope of data mining techniques nowadays allows for the

continuation of the trend determined by Huff (1967), and model hyetographs determination based on the actual local rainfall analysis.

Access to a large data base from 25 electronic weight rain gauges from the municipal precipitation monitoring network of Warsaw (Poland) has become the impulse for the verification whether the Euler type II model hyetograph applied in practice, developed based on the IDF curve, corresponds with temporal distributions of actual rainfalls. For this purpose, out of approximately 20-year precipitation series, Licznar and Szeląg (2014) desinated a total of 669 storm rainfalls. The set was then divided into subsets with increasing durations, expressed in minutes: [0–45], (45–60], (60–90], (90–120], (120–180], (180–240], (240–300], (300–360], (360–420]. Each of the subsets was moreover supplemented by an additional Euler precipitation model (type II) developed based on the local IDF curve. All subsets were then analysed with the application of the hierarchical agglomeration method. Based on the obtained dendrograms, Licznar and Szeląg (2014) observed that precipitation recorded in Warsaw, even those with approximate durations, have evidently differing hyetographs. Moreover, in each of the subsets, Euler model precipitation (type II) was an extreme outlier in the structure of the dendrogram with the highest bond distance towards all actual rainfalls. Results of the study have become an impulse for the search for a method of designation of more representative local model hyetographs. For this purpose, Licznar et al. (2017) proposed the application of cluster analysis tools in the form of not only the hierarchical agglomeration method, but also non-hierarchical k-means clustering. The methodology also found applications for example in research by Licznar (2018) and Wartalska et al. (2020). Nonetheless, it leaves evident gaps. Its greatest weakness is completely subjective a priori adoption of number k of clusters, i.e., the number of final rainfall models. Two further missing components of the methodology include the objective assessment of the classification results and cluster profiling. They are increasingly important, because in the context of new challenges in urban hydrology, striving for ‘smart city’ solutions involves not so much searching for model hyetographs themselves as the possibility of fast and efficient search of similar temporal models of rainfalls. Runoff control systems employing artificial intelligence aim at the implementation of the most effective strategy of the forecasted scenario control of stormwater runoff, adopted based on the already implemented in nature and recorded precipitation phenomenon and runoff caused by rainfall with possibly similar rainfall temporal distribution in reference to local rainfall forecast from the nowcasting system. The final question to be answered from the engineering practice point of view is: to what extent the application of the cluster analysis brings results repeatable at the natural spatial scale of extensive municipal drainage systems? Can for example model hyetographs developed based on rainfall series from nearby rain gauges be treated as credible for analyses of precipitation-runoff phenomena in the territory of the entire city?

Considering the overview of the methodology state of rainfall classification in terms of its temporal distribution and model hyetographs identification, the primary objective of this paper is to present the complete cluster analysis methodology supplemented by objective determination of the number of classes, credible assessment of the classification results, and cluster profiling. Another primary objective of the paper is to demonstrate the postulated complete cluster analysis methodology at the scale of a large urban precipitation field, and the resulting answer to the question whether model hyetographs retrieved from records of different rain gauges show mutual compatibility.

The pragmatic objective of the study is the complete methodology development of designation of local model hyetographs throughout Poland. In the years 2016–2020, the project of the Polish Atlas of Rains Intensities PANDa was implemented, resulting in a digital base of rainfalls at high temporal resolution (after 30 years of observation from 100 stations), and the national rainfall atlas composed of 12,885 local IDF models ascribed to areas designated through the division of Poland with a grid with field dimensions of 5 km per 5 km (Burszta-Adamiak et al., 2019; Licznar et al., 2020). The PANDa atlas provides the basis for the publicly accessible digital design platform www.waterfolder.com, where you can design and select

among others: retention reservoirs of stormwaters, infiltration reservoirs for stormwaters, linear drainage units, gravitational canals of stormwater systems, stormwater pumps and pumping stations, and green roof surfaces. In the scope of the new WaterFolder Connect project, works are currently undertaken aimed at the integration of tools of selection and enabling hydrodynamic simulations of newly designed drainage systems. This will require the designation of local hyetographs for particular areas of Poland. The developed methodology presented in this article is planned to be applied at the scale of the entire country, and then globally.

2. Materials and methods

2.1. Study area

Research on objective classification of storm rainfall hyetographs by means of classification quality assessment indices was conducted at a large scale of an urban precipitation field in the territory of Kraków. Kraków is the second largest city in Poland in terms of population (~767,000) and surface area (327 km²), located in the south of the country on the Vistula River. The study employed part of the resources of the Polish precipitation data base of the Polish Atlas of Rains Intensities (PANDa) project, and records from the local rain gauge network of the Municipal Water Supply and Sewerage Company (MWSSC) in Kraków.

At the initial stage of the PANDa project in the years 2016–2017, a digital base of rainfall series was developed for a total number of 100 rain gauges in Poland. Then it was analysed in terms of occurrence of maximum rainfall intensity (Burszta-Adamiak et al., 2019). The base included among others records from a rain gauge installed in the area of the Kraków–Balice airport (50°04'40", 19°47'42") at a height of 237 m a.s.l., and rain gauge in station Kraków–Wola Justowska (50°03'50", 19°53'25") at a height of 204 m a.s.l. (Fig. 1). For station Kraków–Balice, records from the multiannual period 1986–2006 were available, and for station Kraków–Wola Justowska records from the multiannual period 2007–2015. In that set, digital record

series from the years 1986–1998 resulted from the digitalisation of pluviograph recording strips. The computer-aided method of conversion of pluviograph recording strips to digital format similar to that proposed by Licznar et al. (2011a) was adopted. Records from a standard unheated pluviograph (200 cm² orifice) covered warm year periods between spring (April or May) and autumn (October or November) when most of storm rainfall events occur in Poland. For later years, i.e., for the multiannual period 1999–2015, all-year records from electronic tipping bucket gauges were already available. On station Kraków–Balice, rainfall was recorded by an electronic rain gauge Aster TPG, and on station Kraków–Wola Justowska, by an electronic rain gauge Met One Instruments 60,030. The resolution of recording rainfall depth in the case of the aforementioned devices was 0.1 mm and 0.2 mm, respectively, and their inlet surface was 200 cm². Records of local rainfall provided for the research by the MWSSC came from a network of a total of 23 rain gauges distributed throughout the city (Fig. 1).

The entire network was composed of electronic tipping bucket gauges operating during both the summer and winter half-year. In all stations, rain gauges Hobo RG3M were installed, with rainfall record resolution of 0.2 mm and inlet surface of 200 cm². Unfortunately, records of rainfall series from these rain gauges were considerably shorter than in the case of the data base of the PANDa project, covering a period of 30 years (1986–2015). Detailed information regarding periods of rainfall records by particular rain gauges of the measurement network in Kraków is provided in Table 1 in the chapter discussing results obtained in the scope of designation of storm rainfalls. It should be emphasised that all rain gauges used in the analysis were located within the administrative boundaries of the city. The only exception was rain gauge Kraków–Balice located in the direct vicinity of the city boundaries, in the area of the nearby airport. All rainfall series from the entire period of monitoring of the precipitation field, recorded directly in digital form by tipping bucket gauges, as well as those resulting from digitalisation of records on pluviograph record strips, had a uniform temporal resolution of 1 min.

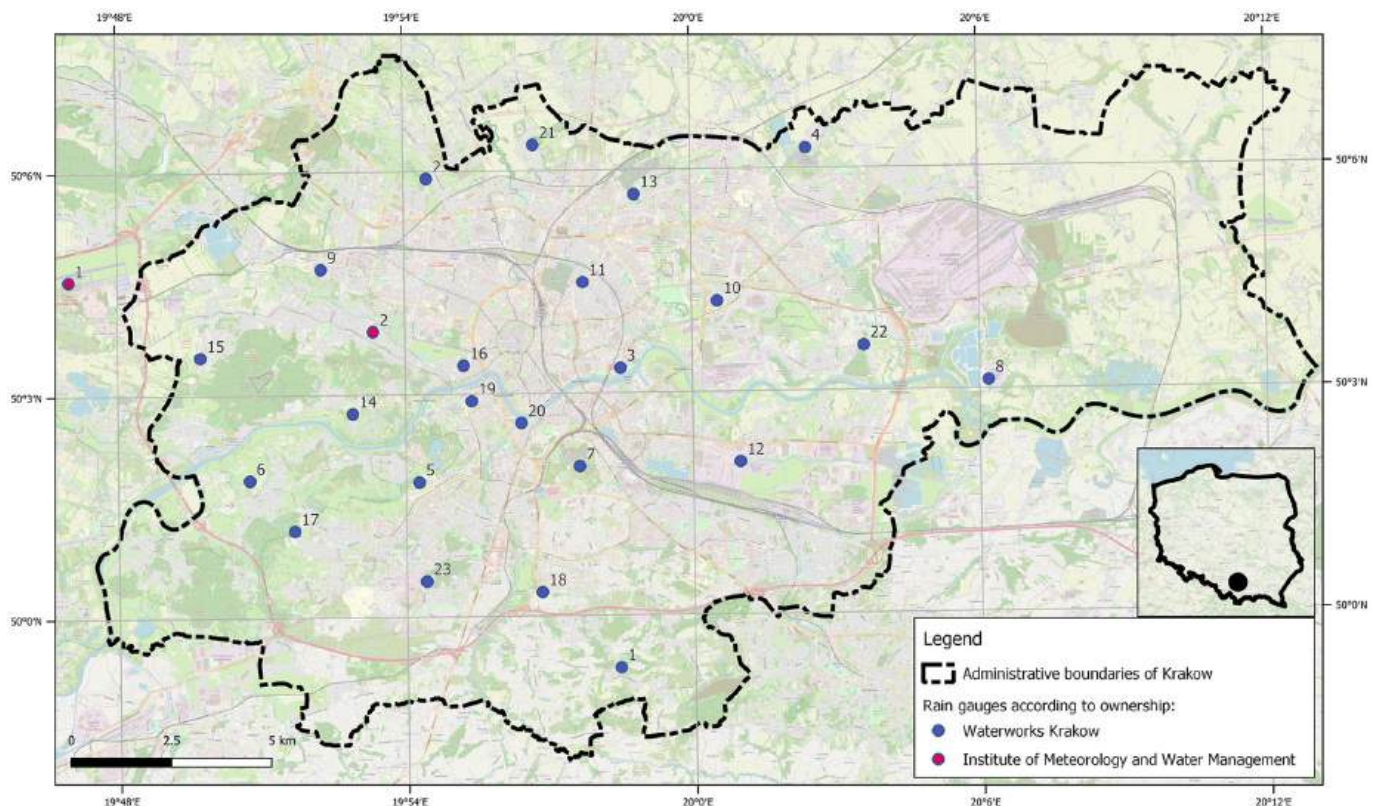


Fig. 1. Location of rain gauges belonging to Waterworks Kraków and the Institute of Meteorology and Water Management.

Table 1
List of rain gauges belonging to sets No. 1 and 2 with characteristics of designated storms.

No.	Rain gauge location	Observation period	Number of storm rainfalls	Minimum duration, min.	Maximum duration, min.	Minimum precipitation amount, mm	Maximum precipitation amount, mm
Set No. 1							
1	Kraków – Balice	1986–2006	313	24	2329	10.0	105.0
2	Kraków – Wola Justowska	2007–2015					
Set No. 2							
1	Bełzy	2016 ÷ 2018	36	89	1639	10.6	74.0
2	Chabrowa	2014 ÷ 2018	41	22	2206	10.2	52.8
3	Miedziana	2010 ÷ 2018	128	20	4359	10.15	121.6
4	Jeżiorany	2013 ÷ 2018	86	59	2615	10.0	81.2
5	Kampus UJ	2014 ÷ 2018	67	14	1940	10.2	67.6
6	Kostrze	2013 ÷ 2016	33	49	2377	10.4	43.8
7	Krzemionki	2015 ÷ 2018	59	39	1927	10.0	68.2
8	Kujawy	2013 ÷ 2016	40	32	2258	10.2	93.6
9	Lindego	2008 ÷ 2018	106	21	3015	10.0	60.0
10	Narciarska	2014 ÷ 2018	49	17	2324	10.0	76.0
11	Olsza	2011 ÷ 2012	11	38	1065	10.4	19.4
12	Płaszów	2011 ÷ 2018	100	26	2499	10.0	69.6
13	Reduta	2015 ÷ 2018	49	47	2517	10.0	62.4
14	Rybna	2015 ÷ 2018	43	22	1697	10.2	61.8
15	Rzepichy	2012 ÷ 2018	80	22	2500	10.0	57.2
16	Senatorska	2013 ÷ 2018	81	34	2134	10.2	67.2
17	Skotniki	2009	5	67	839	10.2	24.2
18	Stojałowskię	2011 ÷ 2018	92	32	3239	10.2	64.8
19	Szwedzka	2008 ÷ 2018	49	21	4576	10.0	145.4
20	Wilga	2013 ÷ 2018	102	25	2518	10.0	73.6
21	Witkowiec	2013 ÷ 2018	60	31	2121	10.2	86.0
22	Żaglęwa	2012 ÷ 2018	86	22	2405	10.0	82.4
23	Zawila	2013 ÷ 2018	91	65	2595	10.2	82.2

2.2. Applied methodology

Based on the available time series of rainfall records (from the rain gauges of the PANDA project and from the network of MWSSC), storm rainfalls were designated by standard criteria proposed by Schmitt (2000) for identifying storms for urban drainage systems modelling. They are standard criteria applied in Germany and Poland, and used in the already cited paper by Licznar et al. (2011a). The adopted threshold minimum value of the total amount of storm rainfall was 10 mm, and the minimum time interval between single rainfall events was at least 4 h. The designation of rainfalls in reference to dry periods also employed the minimum value of rainfall depth of 0.1 mm during 5 min as the threshold value for the interval to be considered as part of a rainfall event in terms of duration and precipitation amount. The result of designation of storm rainfalls separately from rain gauges of the PANDA project and the MWSSC network were data sets called set No. 1 and No. 2, respectively. Set No. 3 analysed in the final part of the research constituted a combination of sets No. 1 and No. 2.

Due to the differing durations and total depths of the designated storm rainfalls, further analysis of the sets, i.e., mutual comparison and identification of typical (quantifiable, model) distributions during rainfalls, involved double normalisation of cumulative hyetographs. This procedure was conducted in accordance with the methodology described in the publication (Licznar et al., 2017). It corresponded with the methodology of development of dimensionless hyetographs by Huff (1967). For this purpose, for each storm rainfall, total duration and total rainfall depth was determined. Next, each cumulative storm rainfall hyetograph with known total duration was divided into 100 even time intervals. For each of the subsequent intervals, a corresponding cumulative rainfall increase was determined. Subsequent cumulative precipitation increases were divided by total rainfall depth, obtaining unitary cumulative precipitation increases. As a result, the shape of each of the storm rainfalls was reflected by a hyetograph normalised to a range from 0 to 100% for duration and to a range from 0 to 1 (100%) for rainfall depth.

The mutual comparison of shapes of normalised (dimensionless) hyetographs within the analysed sets, and further designation of typical storm hyetographs that could be considered model hyetographs, useful

e.g., for modelling of local drainage systems, employed tools for mining large data sets in the form of cluster analysis algorithms. Unlike in the case of earlier attempts to apply cluster analysis for the classification of storm rainfall hyetographs and for identification of model hyetographs (Licznar et al., 2017; Licznar, 2018; Wartalska et al., 2020), this study applied a complete cluster analysis methodology. The complete cluster analysis methodology involves seven stages (Milligan, 1996; Zhou et al., 2014):

- 1) Selection of objects and variables;
- 2) Selection of the formula of normalisation of variable values;
- 3) Selection of distance measure;
- 4) Selection of classification method;
- 5) Determination of the number of classes;
- 6) Assessment of classification results;
- 7) Class description (interpretation) and profiling.

The implementation of the first two points of the methodology, i.e., selection of objects and their variables, combined with normalisation of their values, was already characterised earlier, and aimed at the development of sets of normalised (dimensionless) hyetographs. Two further stages 3 and 4, covering the selection of classification methods and distance measures, were analogical to those in the already published papers by Licznar et al., 2017, Licznar, 2018, Wartalska et al., 2020. In comparison to these publications, three last missing stages of the cluster analysis were added in this paper, including: objective determination of the number of classes, and assessment of classification results, combined with simplified class profiling. This resulted in a coherent research methodology allowing for the classification of storm rainfall hyetographs, their division into the objectively determined number of clusters, determination of courses of model hyetographs, and their simplified profiling.

Cluster analysis tools find broad practical application in collating large data sets. Their implementation in the case of such sets permits the separation of their objects into a certain number of subsets, called clusters, covering mutually similar objects. The requirement of decouplability and sufficiency of the designated clusters is met, i.e., each of the elements belongs to a specific single cluster (Larose, 2005; Stanis, 2007). Therefore, the sum of all clusters corresponds with the initial large set of objects, and

particular clusters are separate and have no elements in common. In each cluster, objects are approximate, mutually similar, and simultaneously different from objects in other clusters. Depending on the adopted method, the division into clusters can be conducted to an a priori determined or undetermined number of clusters. In research in the Kraków polygon, cluster analysis was applied to the division of sets No. 1, No. 2, and No. 3 of dimensionless cumulative hyetographs of storm rainfalls into an undetermined, and then determined number of clusters. For this purpose, the hierarchical agglomeration method and non-hierarchical k-means clustering method were implemented.

Agglomeration methods have already found application in research on precipitation, not only in the context of search for similarities in temporal distribution of storm rainfalls for particular locations (Licznar et al., 2017; Wartalska et al., 2020), but also in the case of research on the variability of precipitation conditions within a large municipal precipitation monitoring network (Licznar et al., 2015). In their research conducted on the municipal monitoring network in Warsaw (including 25 rain gauges), comparable to that in Kraków in terms of size, Licznar et al. (2015) successfully implemented agglomeration methods to evidence similarities of empirical distributions of breakdown coefficients (BDCs) of rainfall from rain gauges located in different points in the city, for hierarchies of timescales, corresponding with time from 5 min to 1280 min. Agglomeration methods applied in this type of research aim at combining mutually similar objects through the application of appropriate measures of their mutual distance and the agglomeration method. The starting point is treating each object as a separate cluster. At the subsequent stages of agglomeration, objects most mutually approximate according to the defined measure (i.e., most similar by default) are combined into new clusters, covering objects and clusters resulting from earlier stages, until a single cluster is obtained. Based on the experience of other authors (Licznar et al., 2017; Wartalska et al., 2020), in research in the Kraków polygon, the already verified distance metrics were applied: Euclidean and Euclidean squared distance. The Euclidean distance metric $d(x,y)$ for two objects $x = (x_1, \dots, x_r)$ and $y = (y_1, \dots, y_r)$, characterised by r measurement values, is expressed in the following formula (Larose, 2005; Stanisiz, 2007):

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^r (x_i - y_i)^2}. \quad (1)$$

The Euclidean distance metric has simple and natural interpretation in the case of objects defined by only two or three measurement values ($r = 2$ or $r = 3$), because in that case its equivalent is distance on a plane and in space of two points x and y . Through analogy, in the case of the analysed sets of normalised hyetographs, the Euclidean distance between pairs of hyetographs was determined in space with a considerably higher number of dimensions (for $r = 100$).

Next to adopting a particular mutual distance metric for objects in the measurement space, the objective of combining mutually similar objects and clusters also requires the application of a particular method of their agglomeration. In this case, also based on the already cited papers (Licznar et al., 2017; Wartalska et al., 2020), the popular unweighted pair-group method was applied. In this method, differences in distances between all pairs of elements included to particular clusters are calculated. Values of the averaged differences between all pairs are adopted as the measure of distance between particular clusters. Due to this, it is known which elements of the sets are mutually similar and can be included to shared clusters, and moreover to what extent particular clusters are mutually similar and can be agglomerated into structures of larger clusters. A natural consequence of this is forming on the dendrograms (the resulting diagrams of the set structure in relation to the increasing bond distance, and therefore decreasing similarity between its elements) characteristic 'chains' made of similar objects developing increasingly extensive clusters.

Considering the primary study objective, i.e., the determination of model hyetographs, a more significant research tool was k-mean clustering. The application of this tool permitted separation of the analysed sets into k independent clusters differing to the greatest possible degree. In the case of

earlier research on model hyetographs (Licznar et al., 2017; Wartalska et al., 2020), the application of the k-means method always involved questionable adopting of k number of clusters subjectively estimated based on the analysis of previously prepared dendrograms. It was assumed that at a certain level of bond distance, the chains of clusters can be cut to obtain several separate subsets of mutually similar dimensionless hyetographs. The obvious weakness of such an approach was lack of justification of the adopted level of bond distance at which the dendrogram was divided (cut). Moreover, as not observed in earlier papers (Licznar et al., 2017; Wartalska et al., 2020), simple cut-off of dendrograms at a given level of and distance and obtaining k clusters was not equivalent to the determination of the same number k of independent clusters by means of the k-means clustering method. Particular clusters could include differing subsets and objects as a result of differences in the classification methods between the hierarchical agglomeration method and non-hierarchical method, namely k-means clustering.

Unlike in the case of the hierarchical agglomeration method, aimed at combining objects and subclusters, agglomeration by means of the k-means clustering method aims at fragmenting the entire set into the a priori defined number k of clusters, whereas none of the k clusters is the subcluster of another cluster. The algorithm of agglomeration by means of the k-means clustering method therefore involves development of k subclusters, and then moving objects across them for distances between them within the subclusters to be as small as possible, and for distances between subclusters to be as large as possible. The moving procedure is repeated iteratively aiming at the most efficient separation of clusters (Larose, 2005). The final objective is arriving at a solution in which the designated clusters meet two criteria: that of internal coherence and external isolation (Gordon, 1999). This task was implemented in the computing environment of language R due to the resulting calculation difficulties. Their primary source was the number of classified objects. The number of all divisions of a set of n elements into k non-empty clusters is expressed by the following formula (Everitt et al., 2001; Gordon, 1999):

$$L(n,k) = \frac{1}{k!} \sum_{s=1}^k (-1)^{k-s} \binom{k}{s} s^n, \quad (2)$$

where s is the number of class ($s = 1 \dots, k$). In accordance with formula (2), even in the case of a very small set of 10 objects with their division into 4 non-empty clusters, the number of all possible divisions is 34,105 ($L(10,4) = 34,105$). For comparison, research has involved division of large sets of hyetographs including hundreds or even thousands of storm rainfalls.

These calculation challenges were further considerably multiplied during analyses of measurement sets No. 1, 2, and 3 due to multiple launching of the clustering algorithm with the application of the bootstrap method. In statistics, bootstrap methods are used to estimate the distribution of estimation errors by means of multiple sampling with replacement. Their implementation in the case of research on storm hyetographs from Kraków meant that the clustering algorithm was performed 150 times, each time for random samples from the analysed sets. Results obtained in subsequent iterations were compared, allowing for the designation of values of the bootstrap parameter. The bootstrap parameter was calculated as a mean value of the Jaccard index (Jaccard similarity coefficient) for each of the designated clusters. The Jaccard coefficient itself measures similarity between two sets, and is determined as the ratio of power set of the intersection of sets and power set of sum of these sets. High values of the Jaccard coefficient approximate to 1 strongly suggest perfect repeatability of the separation of objects into clusters. It is assumed that exceeding the threshold of 0.6 for Jaccard coefficients for each of the clusters suggests no occurrence among the designated clusters of clusters with random character, i.e., those including rainfall models deviating from the remaining clusters, but simultaneously not mutually similar. The verification of the above criterion allows drawing conclusions regarding the resulting clusters meeting the criteria of internal coherence and external isolation (Gordon, 1999).

The bootmean parameter was used in the study for conducting assessment of results of the classification of particular sets No. 1, 2, and 3.

The compute-intensive process of k-means clustering was preceded by the stage of determination of the number of classes. For this purpose, a methodology was adopted analogical to that applied in research on temporal distributions of hourly water uptakes by *Dzimińska et al. (2021)*. The analysis of previously prepared dendrograms provided the basis for the determination of a potential range of the number of clusters that should be considered in the case of division of storm rainfalls in Kraków. The optimal number of clusters was designated from that range based on the analysis of the total within sum of squares (wss) and values of the Caliński and Harabasz Index (CHIndex) for a variable number of clusters. Values of total within sum of squares (wss) and the Caliński and Harabasz Index (CHIndex) were calculated in accordance with the following formulas (*Walesiak and Gatnar, 2009*):

$$wss = \sum_i^k \sum_{x \in C_i} \|x - m_i\|^2, \quad (3)$$

$$CHIndex = \frac{SS_B}{SS_W} \cdot \frac{N-k}{k-1}, \quad (4)$$

where: k – number of clusters, x – element of a set, C_i – i -th data cluster, m_i – cluster centroid i , $\|x - m_i\|^2$ – Euclidean distance between two vectors, N – total number of observations (elements of a set), SS_B – total variance between clusters (trace of interclass covariance matrix), SS_W – total internal cluster variance (trace of intraclass covariance matrix). The value of wss naturally decreases with an increase in the number of clusters k . Nonetheless, the gradient of the decrease evidently decreases after reaching a certain number of clusters considered optimal. In the case of the Caliński and Harabasz Index, the number of clusters is searched, considered optimal, for which its value is the highest. In accordance with formula (4), this means the occurrence of maximisation of the ratio of SS_B and SS_W , i.e., particular clusters differ from one another very significantly, and the elements of the set agglomerated in particular clusters are strongly mutually similar (relatively weakly variable).

The last seventh stage of the research covered the description (interpretation) and profiling of the obtained clusters. For all the clusters, their centroids were determined (arithmetic averages calculated from the original values of each variable based on objects developing a given cluster). This provided the basis for obtaining sets of normalised hyetographs for each of the analysed sets No. 1, 2, and 3. They were subject to mutual comparison. Finally, simplified profiling of clusters was conducted. The objective of cluster profiling is the identification of characteristic features of particular clusters allowing for the determination of differences between them. Cluster profiling is conducted based on variables that did not take part in the process of classification of the set of objects. In the case of research on hyetographs of storm rainfalls from Kraków, the available variables that did not participate in the process of classification of the set of objects were total rainfall depths and total rainfall durations. These general rainfall characteristics permitted the determination of distributions of mean precipitation intensities in particular clusters, i.e., simplified profiling of clusters in terms of explanation of differences in the obtained types of model hyetographs from the point of view of intensities of the represented storms.

3. Results and discussion

Based on the adopted criteria (*Schmitt, 2000*), from set No. 1, covering time series of precipitation records from 30 years for rain gauges of the PANDa project, a total of 313 storm rainfalls were designated (Table 1), corresponding to the frequency of their occurrence at a level of approximately 10 storms per year. Analogically, from the larger set No. 2 of precipitation series from 126 years, recorded on 23 rain gauges of the MWSSC network, a total of 1494 storm rainfalls were designated (Table 1), corresponding to the frequency of their occurrence at a level of approximately 12 storms annually. The obtained quantities of data sets were in accordance with the expectations and results of previously published research from the territory of

Poland. For example, from a set of digitalised pluviography storm records from 38 years from Wrocław (south-western Poland), *Licznar et al. (2011a)* designated 250 storm rainfalls based on the same criteria, determining their frequency of occurrence at a level of 6.6 times per year. The lower precipitation frequency results from the fact that at each stage, precipitation records covered only periods of 5–6 months with positive air temperatures that allowed for the exposure of non-heated pluviographs. For comparison, in the polygon of the rain gauge network of the city of Warsaw composed of 25 electronic weighing rain gauges recording precipitation throughout the year, the criteria proposed by *Schmitt (2000)* permitted the designation of a total of 669 storm rainfalls (*Licznar and Szeląg, 2014*). The latter figure, in the context of records somewhat longer than two years (114 weeks) for each of the rain gauges, translates into the frequency of occurrence of storms equal to 12.3 events per year per single observation point.

Particular rainfalls differed in their courses in time. It is evident based on the example of cumulative normalised (dimensionless) hyetographs of set No. 1 in Fig. 2. A large majority of rainfalls, both in the case of set No. 1 and No. 2, had hyetographs considerably differing from theoretical hyetographs recommended for application as rainfall scenarios for hydrodynamic modelling of municipal drainage systems, such as: block rainfall, model rainfall according to DVWK, or model rainfall according to Euler type II. This observation also remains in accordance with research of other authors who already previously questioned the justification of drainage systems modelling in Poland commonly being based on model rainfall according to Euler type II (*Licznar and Szeląg, 2014; Licznar et al., 2017*).

The designated storm rainfalls in particular sets No. 1 and 2 also differed in terms of total durations and total rainfall depths. In set No. 1, total depths of storm rainfalls were in a range from 10.0 to 105.0 mm, and their durations varied from 24 to 2329 min. These parameters in set No. 2 varied within similar ranges from 10.0 to 145.4 mm and from 14 to 4576 min in the case of total depths and total durations, respectively. These values also showed similar distributions in both analysed sets, as confirmed by histograms included in Fig. 3. A vast majority of storm rainfalls was characterised by total rainfall depth in a range from 10 mm to 20 mm, and their total durations varied from 2 h to 12 h. The similarity of total distributions of rainfall depths and durations in sets No. 1 and No. 2 presented in Fig. 3 at least partially justifies the possibility of use of sets of storm rainfalls recorded in stations in city outskirts and belonging to the national precipitation monitoring network in the context of issues regarding urban hydrology at a scale of a city as large as Kraków.

The analysed sets No. 1 and No. 2 of normalised cumulative precipitation were used for preparing dendrograms presented in Fig. 4a and b, respectively. As demonstrated based on the example of the least abundant set No. 1 in Fig. 4a, even in the case of number of objects only slightly exceeding 300, their abundance makes the prepared detailed dendrogram largely illegible. Due to this, the same dendrogram and all remaining dendrograms for more abundant sets were prepared for a number of leaf nodes reduced to 30 (Figs. 4a, b, 5a, and b), considerably improving their legibility. In practice, this measure corresponded with cut-off of detailed dendrograms at a level of bond distance of approximately 1.0. On the prepared dendrograms in Fig. 4a and b, it is easy to recognise the characteristic structures in the form of chains connecting similar objects or subclusters of objects occurring for lower bond distances. The obtained image of dendrograms therefore corresponded in terms of quality to dendrograms published in earlier papers regarding the application of agglomeration methods in the analysis of precipitation hyetographs (*Licznar and Szeląg, 2014; Licznar et al., 2017; Licznar, 2018; Wartalska et al., 2020*). In the case of Fig. 4b, notice that its structure included a cluster with number 29 with extremely high bond distance (approximately 5.5). Detailed analysis of cluster No. 29 in Fig. 4b showed that it is composed of only one object.

The object was a hyetograph of a storm rainfall designated from records of rain gauge No. 12 in Płaszów in 2014 (Fig. 6). The rainfall had a total depth of 13.2 mm and total duration of 507 min. Although the rainfall event formally meets the adopted criteria of storm rainfall (*Schmitt, 2000*), it showed very specific course in time (Fig. 6). For the first 460

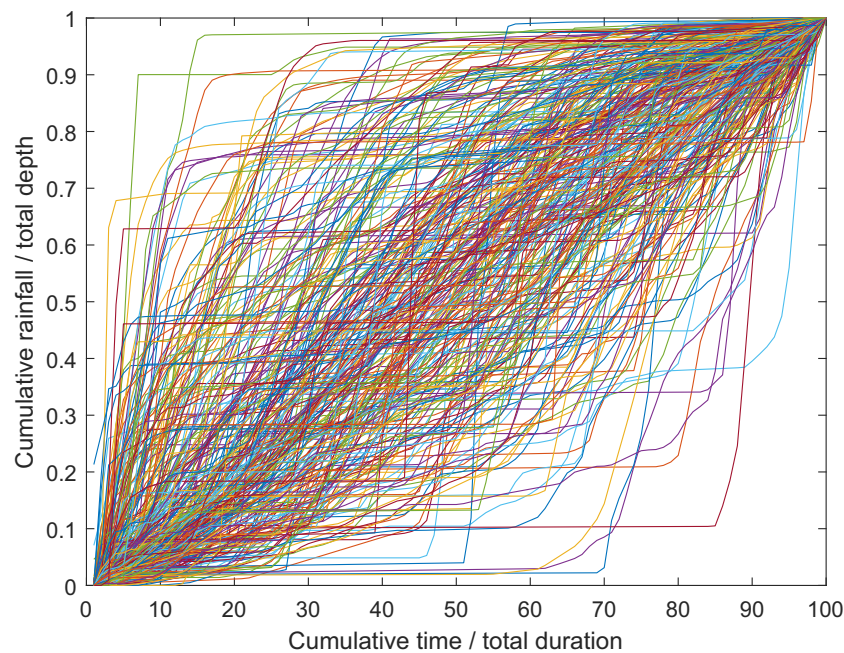


Fig. 2. Cumulative dimensionless hyetographs of 313 storm rainfalls from Kraków (set No. 1).

min. of the rainfall, only 0.8 mm of rain was recorded. In the second, considerably shorter, final part of the rainfall lasting 47 min, 12.4 mm of rain was recorded. Considering this very specific course of the rainfall in time, it was excluded from set No. 2, and the analysis was continued for a set of 1493 normalised hyetographs of the remaining rainfall events.

For the adjusted set No. 2 including 1493 objects, the dendrogram presented in Fig. 5a was obtained. As a result of elimination of outliers in the form of a single rainfall event from rain gauge No. 12, a dendrogram was obtained with a maximum bond distance at a level somewhat higher than 4.0, comparable like in the case of set No. 1 (Fig. 3). Importantly, after the adjustment, the most deviating cluster with number 24 was not composed of a single object, but covered normalised hyetographs for 9 different storm rainfalls (combined into a single cluster for bond distances lower than 1.0). At the final stage of application of hierarchical methods for analysing structures of sets of normalised hyetographs, a dendrogram was also prepared for set No. 3, constituting a combination of sets No. 1 and No. 2, presented in Fig. 5b. The dendrogram obtained in the case of set No. 3, prepared for 1806 dimensionless storm rainfall hyetographs, had a structure analogous to that of the already discussed dendrograms in Figs. 4a and 5a. Its maximum bond distance did not exceed 4.0, and it showed characteristic chain connections of similar subclusters of objects, mutually connecting for bond distances of less than 1.0. Irrespective of the similarities indicated herein, the comparison of three dendrograms obtained for sets No. 1, 2 and 3 (Figs. 4a, 5a, and b) provided no basis for answering the question regarding the appropriate and unquestionable number of classes in the division of normalised hyetographs from Kraków into clusters. To illustrate the problem in a simple way, even if a certain subjective level of bond distance is adopted a priori, e.g., 1.75, then the structure of the dendrogram of sets No. 1, 2 and 3 allows for designating the following mutually divergent numbers of clusters: 11, 9 and 6. Considering the substantial discrepancy in terms of number of clusters in further research, a potential range of the number of clusters k was subject to analysis, covering values from 2 to 20.

The results of calculations of the Caliński and Harabasz Index values ($CHIndex$) as well as total within sum of squares (wss) for the number of clusters k within a range from 2 to 20 for set No. 1 are presented in Fig. 7.

Diagrams of both parameters directly suggest that the optimum number of clusters for set No. 1 should be adopted as equal to 4 ($k = 4$). By theory, wss values naturally decrease with an increase in the number of clusters k ,

although the decrease gradient evidently decreases after reaching number of clusters $k = 4$. For the same number of four clusters, maximum $CHIndex$ value is also observed ($CHIndex = 170$). In accordance with formula (4), a high $CHIndex$ value is correlated with maximisation of the ratio of SS_B and SS_W . This means that particular clusters very significantly differ from one another, and elements of the set grouped in particular clusters are strongly similar to one another (relatively weakly variable).

The determination of the optimum number of clusters $k = 4$ was followed by the k-means clustering process for set No. 1 of normalised cumulative hyetographs from Kraków. Through the application of the bootstrap method, the following values of the bootmean parameter were obtained for subsequent clusters from 1 to 4: 0.72; 0.65; 0.84, and 0.74. Bootmean parameter values were higher than 0.6 for all four clusters. This evidences that the designated four clusters included no cluster with random character, i.e., one that includes rainfall models deviating from the remaining three clusters, but at the same time not mutually similar. As a result of the k-mean clustering process for set No. 1 including 313 cumulative normalised hyetographs from Kraków, clusters No. 1, 2, 3, and 4 were ascribed 102, 93, 68, and 50 rainfalls, respectively. This corresponded with the share of 35%, 32%, 23%, and 17%, respectively, throughout the set of analysed rainfalls.

For the designated clusters, averaged dimensionless cumulative storm rainfall hyetographs were determined, presented in Fig. 8. The cumulative dimensionless hyetographs were also transformed to the form of storm rainfall hyetographs presented in Fig. 9.

The analysis of the obtained model hyetographs shows that the most frequently occurring hyetographs of type 1 and 2 (35% and 32%, respectively) have relatively even values of point rainfall intensity (point rainfall depths for unitary duration intervals of 1/100 of total duration do not exceed 2% total rainfall depth). The rainfalls, however, do not correspond with the simplified block rainfall model, commonly used in designing drainage systems, and even sporadically applied in their hydrodynamic modelling. In the case of numerous unitary duration intervals, point rainfall depths differ from 1%, they are considerably lower, and frequently approximate to 0.5%, or considerably higher, reaching approximately 2% of total rainfall depth. The substantially more seldom occurring model hyetograph for cluster 3 has a shape very generally approximate to model rainfall according to Euler type II recommended by Schmitt (2000) for modelling stormwater systems. Unlike in the case of rainfall model according to Euler type II,

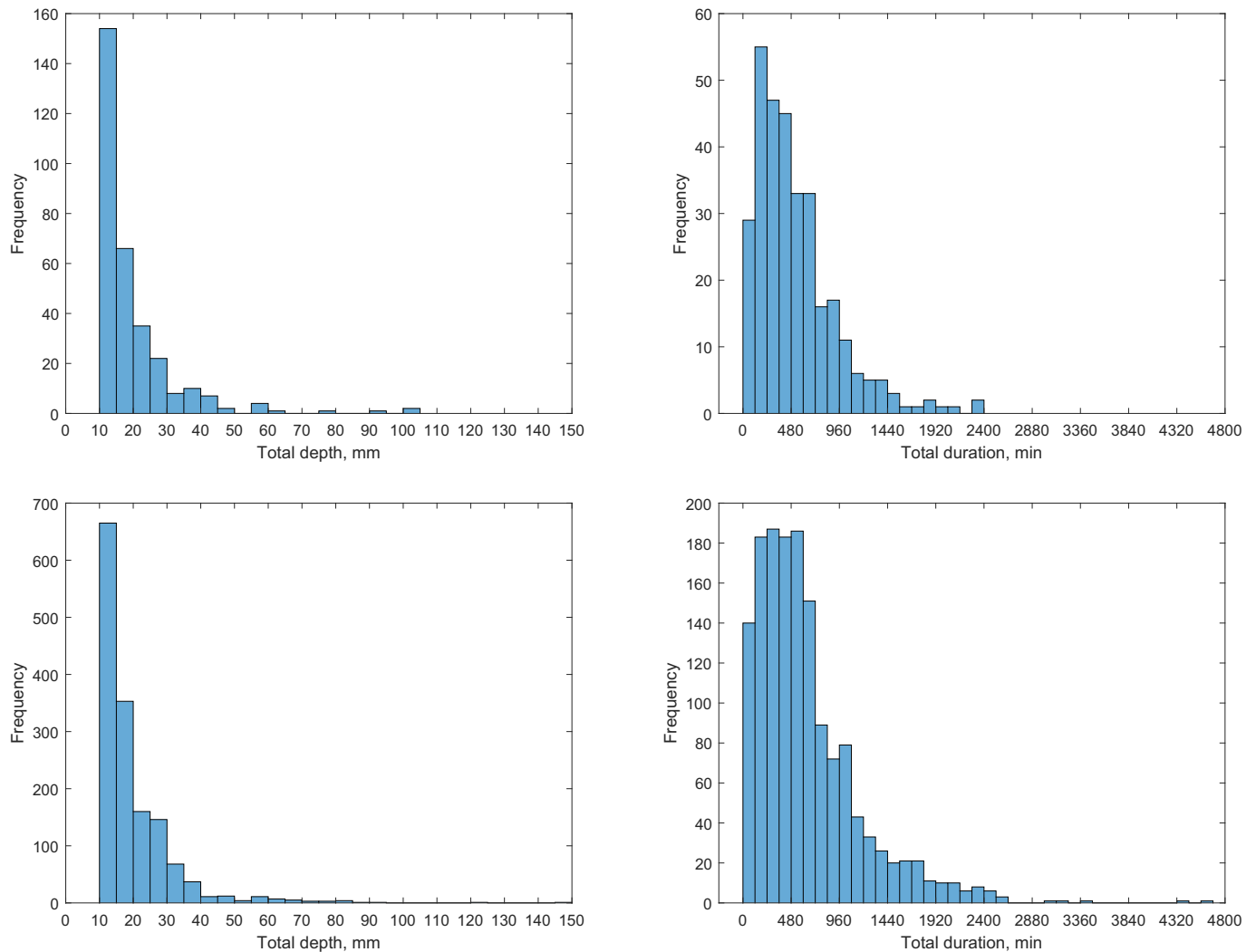


Fig. 3. Histograms of rainfall depths and durations for the designated sets of rainfalls from Kraków, diagrams in the top row for set No. 1 (313 rainfalls), diagrams in the bottom row for set No. 2 (1493 rainfalls).

the greatest rainfall accumulation occurs not in 1/3 of rainfall duration, but already in its initial part, during the first 10% of the duration of the entire rainfall. Moreover, this accumulation has no character of a very sharp peak (point rainfall depths for unitary duration intervals of 1/100 of total duration do not exceed 4% of total rainfall depth). The most seldom occurring hyetograph shape is that determined in the case of cluster 4. With a high degree of generalisation, the hyetograph can be treated as a mirror reflection of the model hyetograph of cluster 3. This is not strictly accurate, because the rainfall accumulation occurring in the final part of the hyetograph is very obscure. It is observed in the final interval covering approximately 30% of the entire rainfall, and point rainfall depths for unitary duration intervals of 1/100 of total duration do not exceed 2.5% of total rainfall depth in that case. Moreover, at the very beginning of the model hyetograph for cluster 4, a small rainfall peak occurs, with no equivalent in the final part of the model hyetograph for cluster 3. Referring to the discussed results obtained in the analysis of set No. 1 from Kraków, it is worth emphasising that the obtained courses of cumulative model hyetographs in Fig. 8 were very approximate to the cumulative model hyetographs obtained by Licznar (2018) for another rain gauge from Poland, as a result of application of clustering of a set of 213 storm rainfalls by means of the k-means clustering method for a subjectively adopted number of 4 clusters. The obtained results also remain in accordance with earlier studies from the territory of Poland that question the justification of common application of the synthetic rainfall model according to Euler

type II due to its deviation from the vast majority of scenarios of temporal course of actual storm rainfalls (Licznar and Szeląg, 2014; Licznar et al., 2017).

Diagrams of the dependencies of the Caliński and Harabasz (*CHIndex*) index values and total within sum of squares (*wss*) on the number of clusters *k* developed for set No. 2 are presented in Fig. 10.

Analogically to set No. 1, they provide the basis for the determination that the optimum number of clusters for set No. 2 should be adopted as equal to 4 ($k = 4$). For four clusters ($k = 4$), an evident peak of the *CHIndex* is observed ($CHIndex = 801$), and the curve of total within sum of squares (*wss*) flattens out to below 2000 after a rapid decrease from a level of approximately 5000. The cited *CHIndex* and *wss* values cannot be referred to values obtained in the case of set No. 1 (Fig. 7). Orders of magnitude in both cases are different, as results from different abundance of sets No. 1 and No. 2, and as accounted for by the structure of formulas (3) and (4).

The process of k-means clustering of set No. 2 of normalised cumulative hyetographs from Kraków into four clusters ended with the designation of clusters meeting the criteria of internal coherence and external isolation (Gordon, 1999). The confirmation of the above was obtaining values of the bootmean parameter substantially exceeding the threshold of 0.6 for each of the clusters. The parameter reached: 0.93; 0.91; 0.96, and 0.91, respectively for clusters from 1 to 4. As the final result of clustering, subsequent clusters were ascribed, respectively: 510, 506, 232, and 245 storm rainfalls. This corresponded with the respective share of 34%, 34%, 16%,

and 16% in the entire population of analysed rainfalls in set No. 2. The cited percent share of particular clusters in set No. 2 proved approximate, like in the case of the previously discussed set No. 1. For particular clusters, averaged cumulative storm rainfall hyetographs were also determined, presented in Fig. 11. The diagrams of averaged normalised cumulative hyetographs in the figure pointed to very high compatibility in terms of

temporal distribution with the previously discussed results for set No. 1 (Fig. 8).

The evident divergence of results of clustering of storm rainfall hyetographs for sets No. 1 and No. 2 became an impulse for undertaking analysis of set No. 3, constituting a combination of the aforementioned sets. As expected, the obtained results proved to be virtually identical to

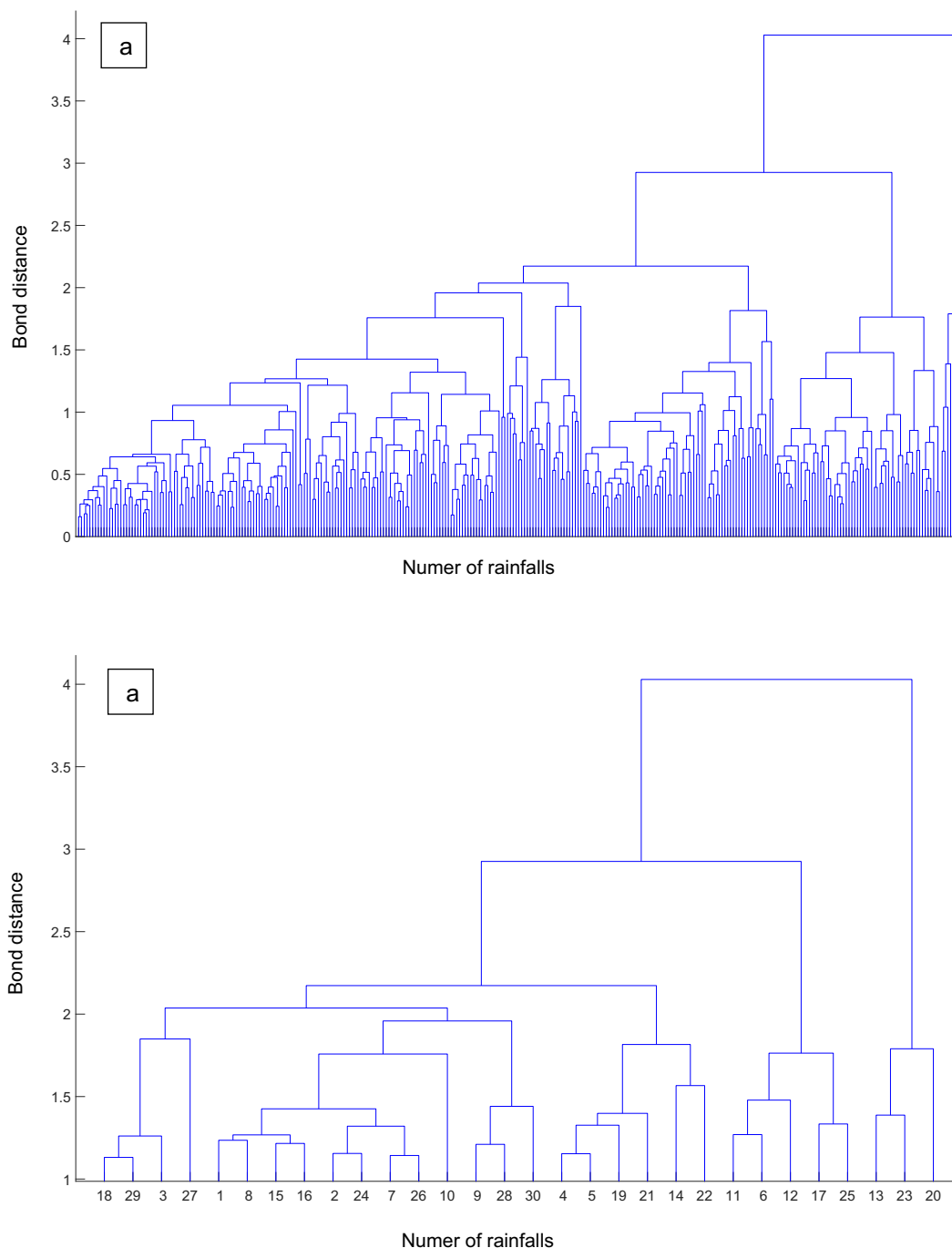


Fig. 4. a. Dendrograms obtained for set No. 1 composed of 313 dimensionless cumulative rainfall hyetographs from Kraków (top panel). Below find the same dendrogram prepared for the reduced number of 30 leaf nodes (bottom panel). In the diagrams, vertical axes show bond distances for particular rainfalls and rainfall clusters. The horizontal axis of the dendrogram on the bottom panel shows numbers of rainfalls in particular clusters; b. Dendrogram obtained for set No. 2 composed of 1494 dimensionless cumulative rainfall hyetographs from Kraków. The dendrogram was prepared for the reduced number of 30 leaf nodes. The vertical axis of the diagram shows bond distances for particular rainfall clusters, and the horizontal axis shows their numbers.

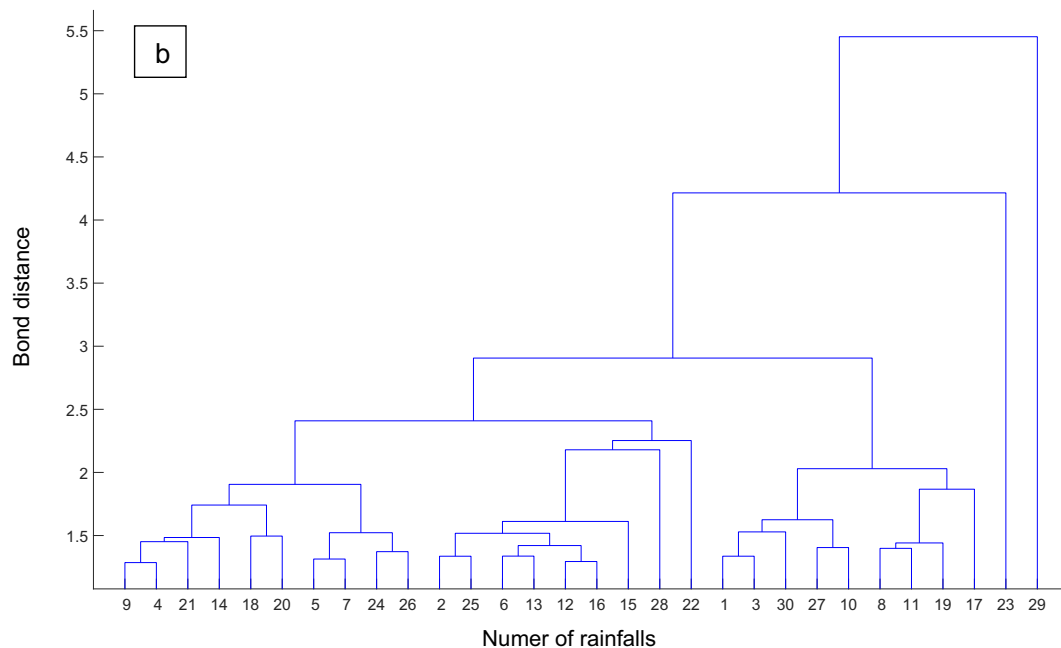


Fig. 4 (continued).

results obtained previously for sets No. 1 and No. 2. Curves of variability of values of the Caliński and Harabasz index (CHIndex) and total within sum of squares (wss) developed for this large set of 1806 storm rainfalls are presented in Fig. 12, and raise no doubts as for their interpretation. The evident maximum of the CHIndex value ($CHIndex = 1105$) is obtained for four clusters ($k = 4$). For four clusters, a very steep gradient of decrease in wss values from more than 5500 to approximately 2000 is also rapidly levelled almost to zero. Clustering by means of the k-means method of hyetographs included in set No. 3 ended with creating four clusters meeting the criteria of internal coherence and external isolation. The obtained bootmean parameter values were practically approximate to 1.0, and for subsequent clusters they reached: 0.94; 0.93; 0.96, and 0.94, respectively. Clusters No. 1, 2, 3, and 4 were ascribed: 613, 605, 288, and 300 rainfalls, respectively, corresponding to a respective share of 34%, 33%, 16%, and 17% in the entire set No. 3.

For particular clusters of set No. 3, averaged hyetographs of dimensionless cumulative storm rainfalls were also determined, collectively presented in Fig. 13.

The figure also presents dimensionless hyetographs developed by Huff (1990), constituting the subject of a separate discussion. Pursuant to the expectations, the diagram in Fig. 13 proved strongly similar to the diagrams of model hyetographs for clusters from 1 to 4 determined for sets No. 1 and No. 2 (Figs. 8 and 11). For better assessment of the scale of similarity of the model hyetographs obtained for particular clusters in the case of clustering sets No. 1, No. 2, and No. 3, Fig. 14 was additionally prepared.

The similarity of averaged normalised cumulative rainfall hyetographs obtained for all three sets of storm rainfalls from Kraków within particular clusters is unquestionable. In the case of sets No. 2 and No. 3, the diagrams of normalised cumulative hyetographs even overlap. In the case of cluster No. 4, hyetographs resulting from the analysis of all three sets overlap. This provides the basis for the presumption that the developed methodology of application of cluster analysis for the designation of model hyetographs shows repeatability in the scope of obtained results within the urban precipitation field. In engineering practice, it can be therefore used for the determination of local sets of model hyetographs based on the analysis of approximately 30-year-long rainfall series even from single rain gauges located near city boundaries. They will be able to supply computer models for simulation of drainage systems in the centre of a city as large as Kraków with satisfactory precision.

For a better understanding of the obtained results, particularly including the determination of characteristic features of particular clusters that differentiate them from one another, their profiling was performed. Such profiling is called simplified, because it is only based on general variables describing storm rainfalls in the form of their total depths, total durations, and mean intensities. For this purpose, Table 2 presents mean values of these variables within particular clusters for sets No. 1 and No. 2. Fig. 15a and b present histograms of the frequency of occurrence of storm rainfalls with different mean intensities within different clusters, respectively for sets No. 1 and No. 2. Values of rainfall intensity in diagrams in Fig. 15a and b and in Table 2 are expressed in a standard unit of $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ applied in urban hydrology.

Data included in Table 2 and in diagrams in Fig. 15a and b suggest that rainfalls classified to cluster 3 usually showed mean intensities higher than those of rainfalls included in other clusters. For the majority of storm rainfalls included in cluster 3 in sets No. 1 and No. 2, mean intensities in sets No. 1 and No. 2 were usually within the range from 5 to 20 $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$, and their mean value within sets No. 1 and No. 2 exceeded 14 $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$. High mean rainfall intensities in cluster 3 did not result from high total rainfall depths, but from evidently shorter durations. In set No. 2, mean rainfall depths for cluster 3 were even evidently lower than for the three remaining clusters. Mean rainfall durations for cluster 3, however, were approximately 6 h, whereas for the remaining clusters they were considerably longer, within a range from approximately 8 h to 12 h. This suggests that cluster $n = 3$ included short but very intensive rainfalls, probably with convection genesis. This hypothesis would also explain the greatest variability of point rainfall depths for unitary duration intervals shown on the model hyetograph of cluster 3 in Fig. 9. Completely different profiling results were obtained for cluster 2 which had a considerably more equalised course of the model hyetograph (Fig. 9). Rainfalls classified to this cluster had not only longer durations within the clusters in particular sets No. 1 and No. 2, but usually also very low intensities within a range from 0 to 5 $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$. This encourages a hypothesis that this cluster primarily included frontal rainfalls with long durations, but low and considerably more even in time intensities. The research hypotheses stated here regarding the division of storm rainfalls into clusters by rainfall genesis should be verified in further research. It will however require access to synoptic records permitting more precise profiling of the designated clusters.

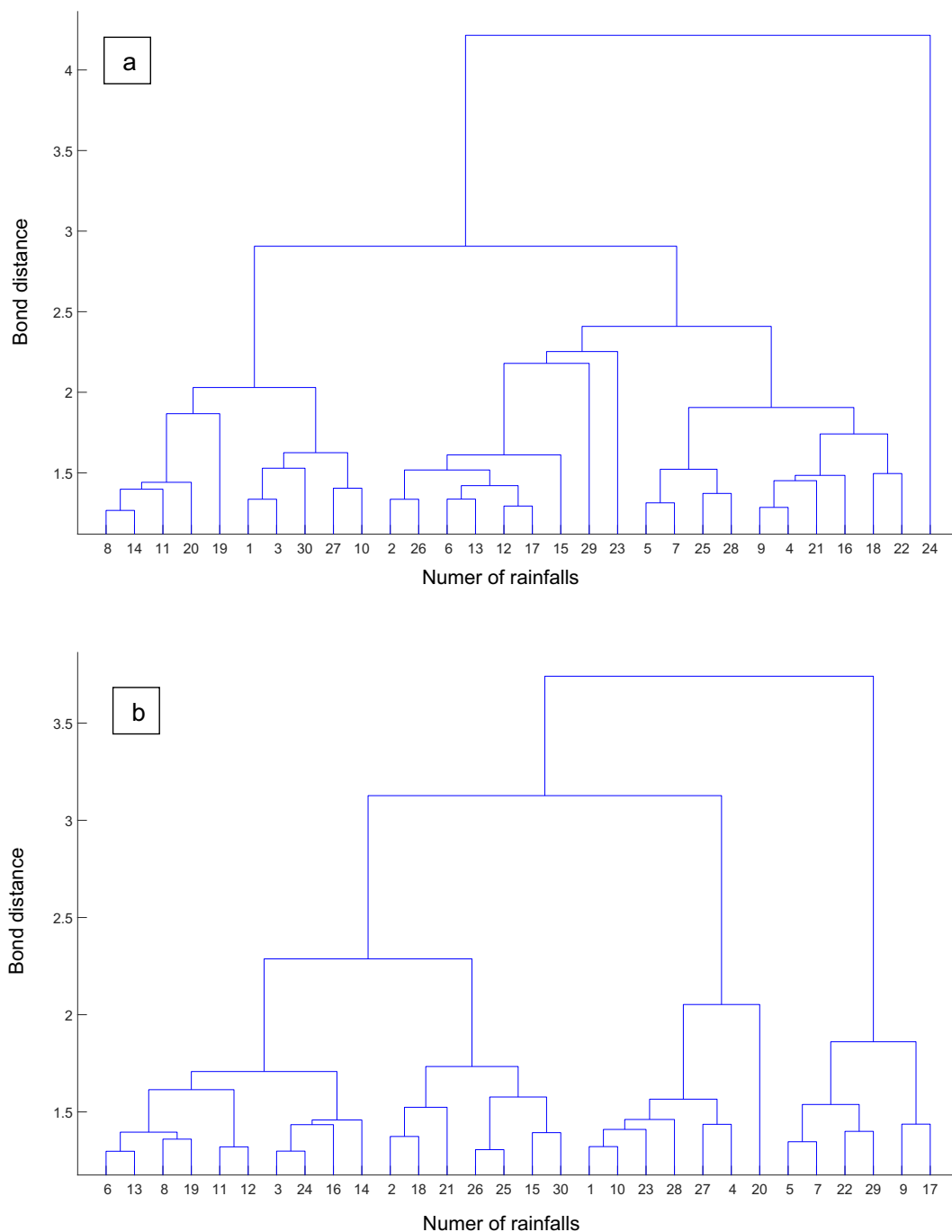


Fig. 5. a. Dendrogram obtained for adjusted set No. 2 composed of 1493 dimensionless cumulative rainfall hyetographs from Kraków. The dendrogram was prepared for the reduced number of 30 leaf nodes. The vertical axis of the diagram shows bond distances for particular rainfall clusters, and the horizontal axis shows their numbers; b. Dendrogram obtained for adjusted set No. 3 composed of 1806 dimensionless cumulative rainfall hyetographs from Kraków. The dendrogram was prepared for the reduced number of 30 leaf nodes. The vertical axis of the diagram shows bond distances for particular rainfall clusters, and the horizontal axis shows their numbers.

In the summary of the entire discussion of results, it is also necessary to refer to the classic papers by Huff (1967, 1990). Although the research on Dimensionless, Cumulative Rainfall Hyetographs was implemented in different climate conditions (Illinois, USA), with a different approach to the identification of single rainfalls, and with the application of a considerably simpler method of their classification to the first, second, third, or fourth quartile (depending on whether the highest percent of cumulative rainfall occurred in the first, second, third, or fourth quarter of its duration, respectively), relatively high correspondence of the courses of medians is observed (50th-percentile) between dimensionless hyetograph curves derived from point rainfall values derived by Huff (1967, 1990) and

model hyetographs in Figs. 8, 11 and 13. In the case of hyetographs from Kraków, cluster 3 corresponds with first-quartile storms, cluster 1 with second-quartile storms, cluster 2 with third-quartile storms, and cluster 4 with fourth-quartile storms. Further analogies can be sought in general characteristics of particular quartiles. For designing and modelling drainage systems, Huff (1990) recommended the application of first-quartile storm hyetographs for time scales of about 6 h or less, and second-quartile storm hyetographs for time scales of about 6 to 12 h. These recommendations overlap with mean durations determined for clusters No. 3 and No. 1 in sets No. 1 and 2, respectively (Table 2). Nonetheless, at a closer investigation of the study by Huff (1967), differences are observed in terms of

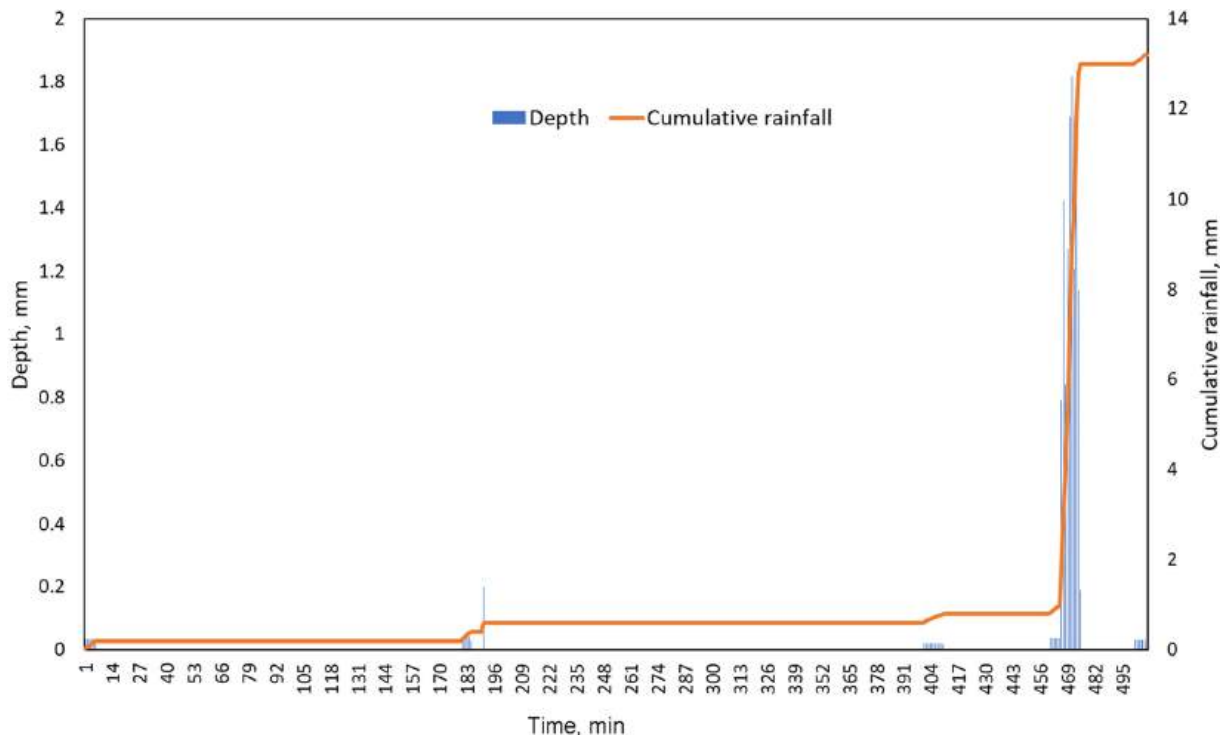


Fig. 6. Hyetograph of a rainfall event recorded on station Kraków-Płaszów in 2014.

frequencies of occurrence of rainfalls with the adopted model hyetographs. In the case of research from Illinois, the relative frequencies of the storms were 30, 36, 19, and 15% for the first, second, third, and fourth quartiles, respectively. They are not in accordance with frequencies of 16, 34, 33, and 15% obtained for the analogical model hyetographs designated from set No. 3, corresponding to subsequent clusters No. 3, 1, 2, and 4, respectively. The determined divergence, however, does not undermine results from Kraków, because the analogical divergence has already been signalled and discussed by Pani and Haragan (1981). Analysing a set of 117 rainfalls from Texas (USA), recorded in months with the highest probability of

occurrence of convection rainfalls, the authors obtained a median (50th-percentile) dimensionless hyetograph curve with shapes fully corresponding with results by Huff (1967), but the determined relative frequencies of the storms were 13, 41, 32, and 14% for the first, second, third, and fourth quartiles, respectively. The latter frequencies are considerably more approximate to results from Kraków, despite obvious differences in the location of both research polygons and approach to processing rainfall records and determination of model hyetographs. The qualitative compatibility of study results from Kraków with classic papers by Huff (1967, 1990) and Pani and Haragan (1981) is an additional premise confirming the

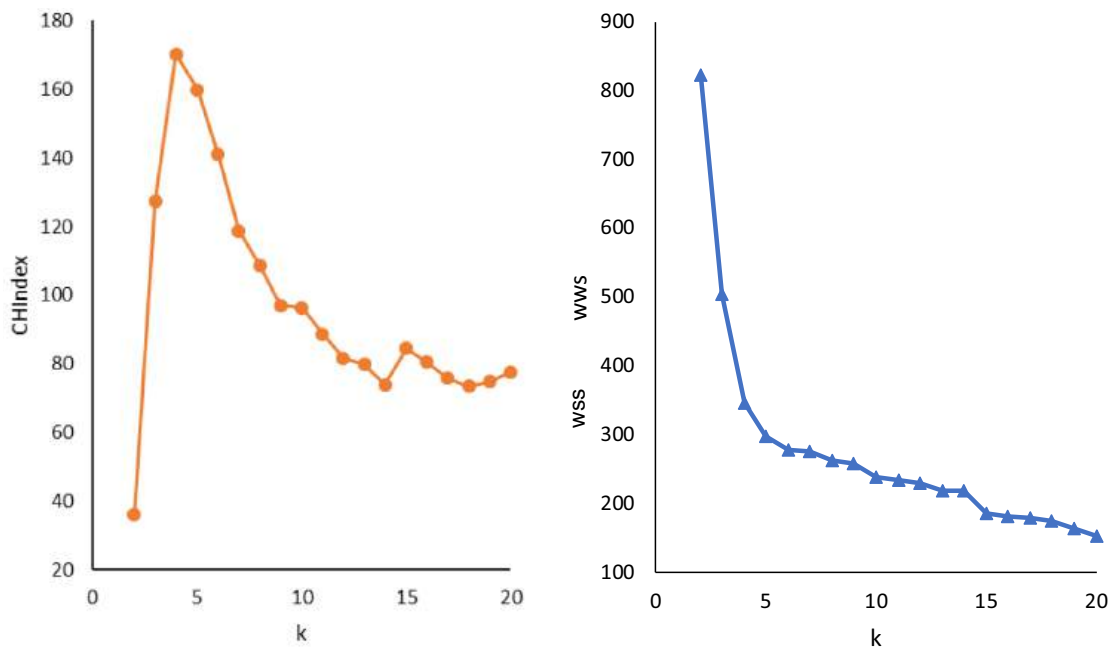


Fig. 7. Value of the CHIndex and total within sum of squares (wss), and for a set 1 of 313 rainfalls from Kraków, depending on the adopted number of clusters k.

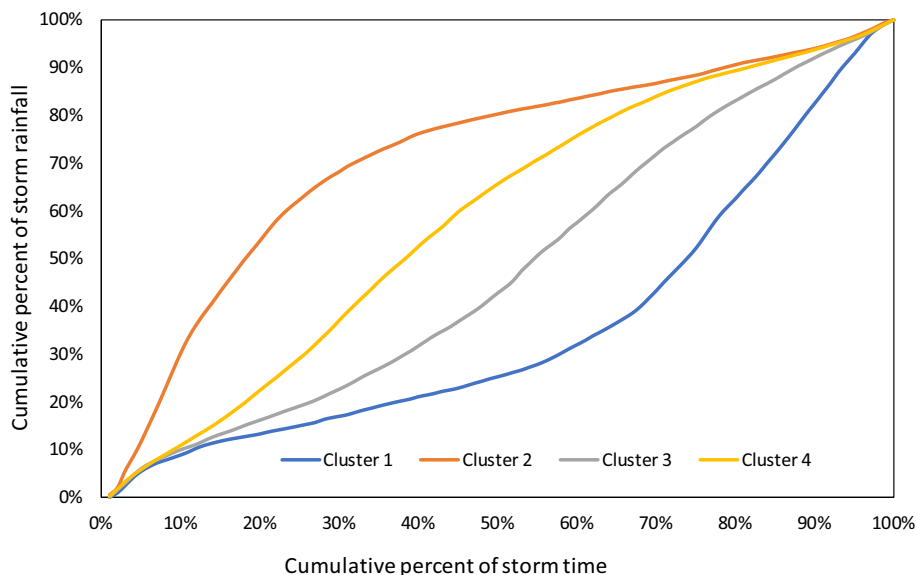


Fig. 8. Diagrams of averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for four clusters designated by means of k-means clustering for Kraków based on set No. 1 for 313 storm rainfalls.

accuracy of the methodology of identification of model hyetographs of storm rainfalls based on complete cluster analysis and quality indices.

4. Summary and final conclusions

Progress in the scope of atmospheric precipitation measurements techniques, and the occurring municipal rain gauge networks expansion requires simultaneous modernisation of the methodology of recorded precipitation series processing. A necessary element of such a methodology are certainly modern methods of objective and automatic search of rainfalls groups with similar courses in time that can be described in a general way by means of model hyetographs. The practical application area of such methods can currently exceed processing sets of local model hyetographs,

and find implementation in the practical rainwater runoff control systems operation. Due to the growing number of rain gauges and rapidly increasing sets of rainfall records, also in the case of model hyetographs identification, it becomes justified and necessary to reach for data mining tools, primarily including the cluster analysis.

This paper is not pioneer in terms of the very idea of the cluster analysis application in storm rainfall hyetographs classification. The application of the cluster analysis in research on temporal distributions of storm rainfalls has already been postulated by Licznar et al. (2017), and then tested for several locations in Poland (Licznar, 2018; Wartalska et al., 2020). The primary objective of the paper was the improvement of the research methodology to meet the requirements of the complete cluster analysis methodology covering seven stages (Milligan, 1996), including: selection

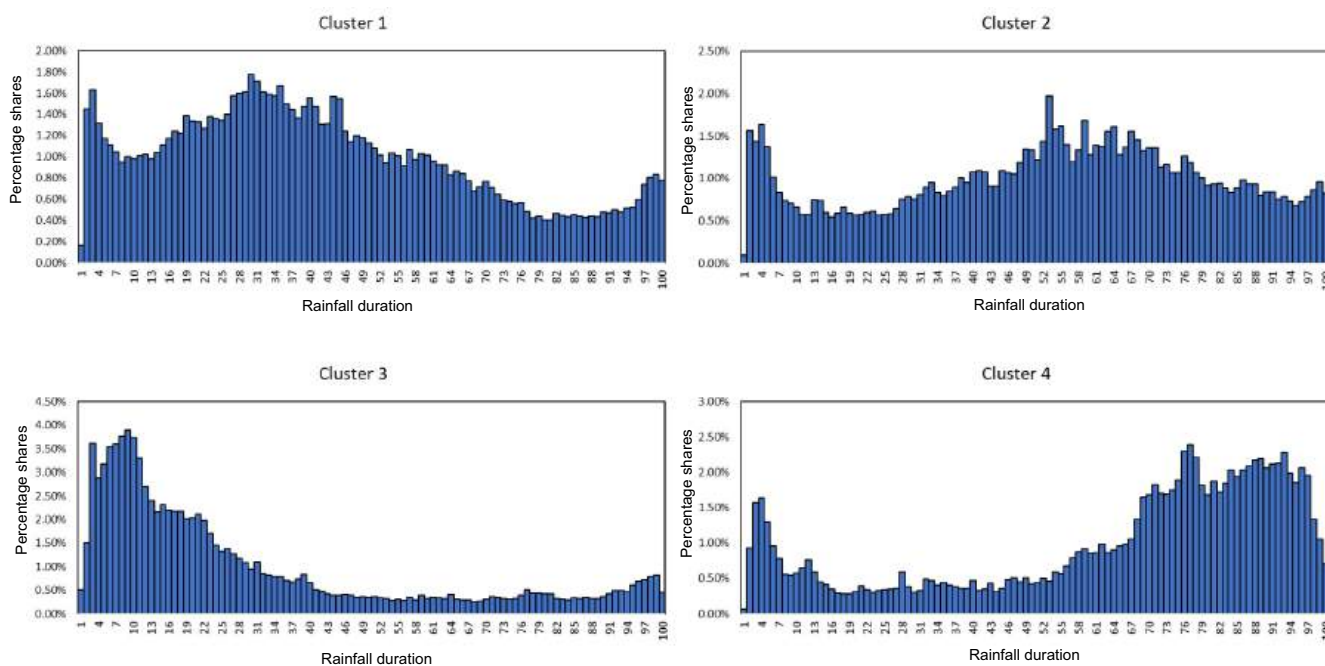


Fig. 9. Model dimensionless rainfall hyetographs developed by means of the k-means clustering method for set No. 1 for 313 rainfalls from Kraków. The horizontal axis shows percent increase in rainfall duration, and the vertical axis shows percent shares in total precipitation amount.

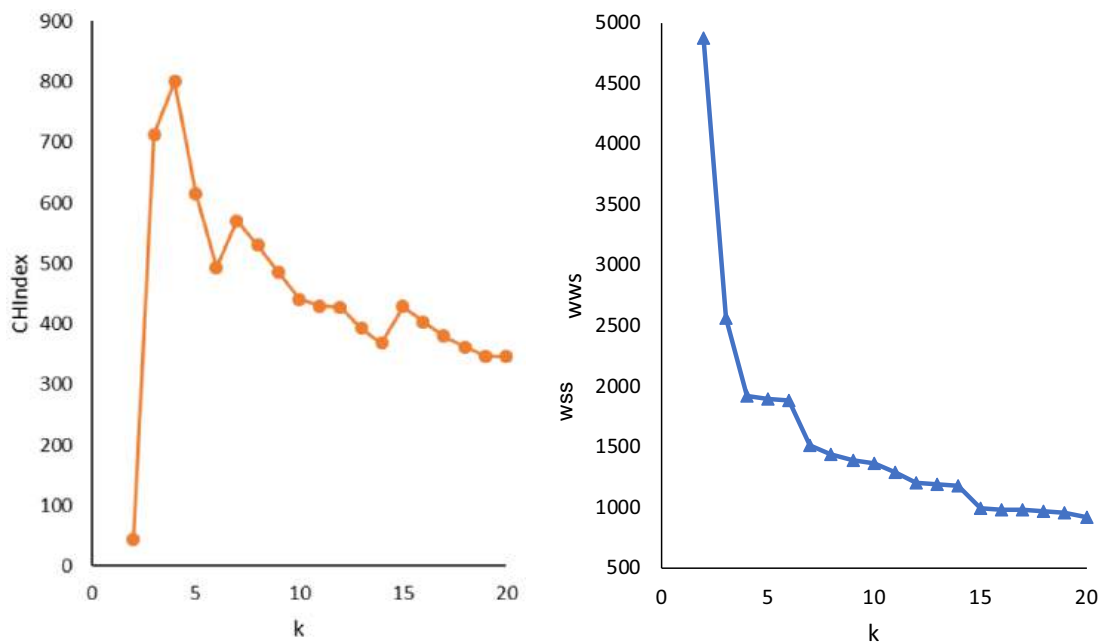


Fig. 10. Value of the CHIndex and total within sum of squares (wss), and for set No. 2 of 1493 rainfalls from Kraków, depending on the adopted number of clusters k.

of objects and variables; formula selection of variable values normalisation; selection of distance measure; selection of the classification method; the number of classes determination; assessment of classification results; class description and profiling. The aforementioned objective covered the three primary detailed objectives involving: objectivization of the number of clusters determination, the internal coherence and external isolation of clusters verification, and profiling of the retrieved clusters.

Another substantial objective of the paper was to demonstrate the developed methodology at the scale of a large precipitation field in Poland. This objective covered two detailed objectives, namely testing the methodology on a large measurement set, and equally importantly, analysing its repeatability at the scale of a large urban precipitation field. The basic question was also to what extent model hyetographs developed based on records from nearby

rain gauges (located e.g., at an airport or in suburbs) correspond with the shapes of model hyetographs for rain gauges of the urban rain monitoring network. Owing to the collaboration with the Municipal Water Supply and Sewerage Company (MWSSC) in Kraków, Poland, it was possible to apply the developed complete cluster analysis methodology to a large measurement set of 1806 storm rainfalls (Set No. 3), composed of set No. 1–313 storm rainfalls designated from two nearby rain gauges belonging to the countrywide network of IMGW, and set No. 2–1493 storm rainfalls designated from 23 rain gauges belonging to the municipal rain monitoring network of MWSSC. Three applications of the complete cluster analysis methodology for sets No. 1, No. 2, and No. 3 permitted its thorough testing, designation of a set of model hyetographs for practical application in modelling of drainage systems in Kraków, and drawing the following final conclusions:

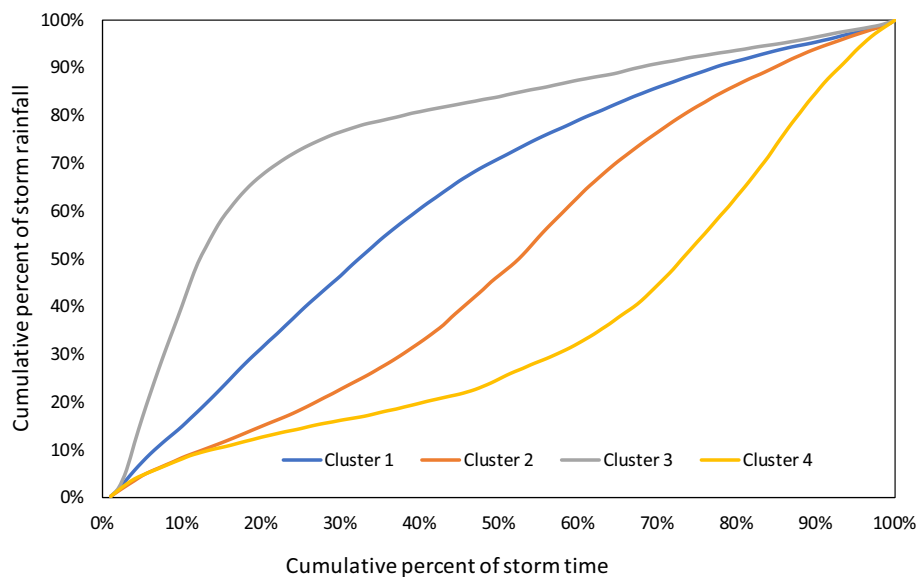


Fig. 11. Diagrams of averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for four clusters designated by means of the k-means clustering method for Kraków based on set No. 2 for 1493 storm rainfalls.

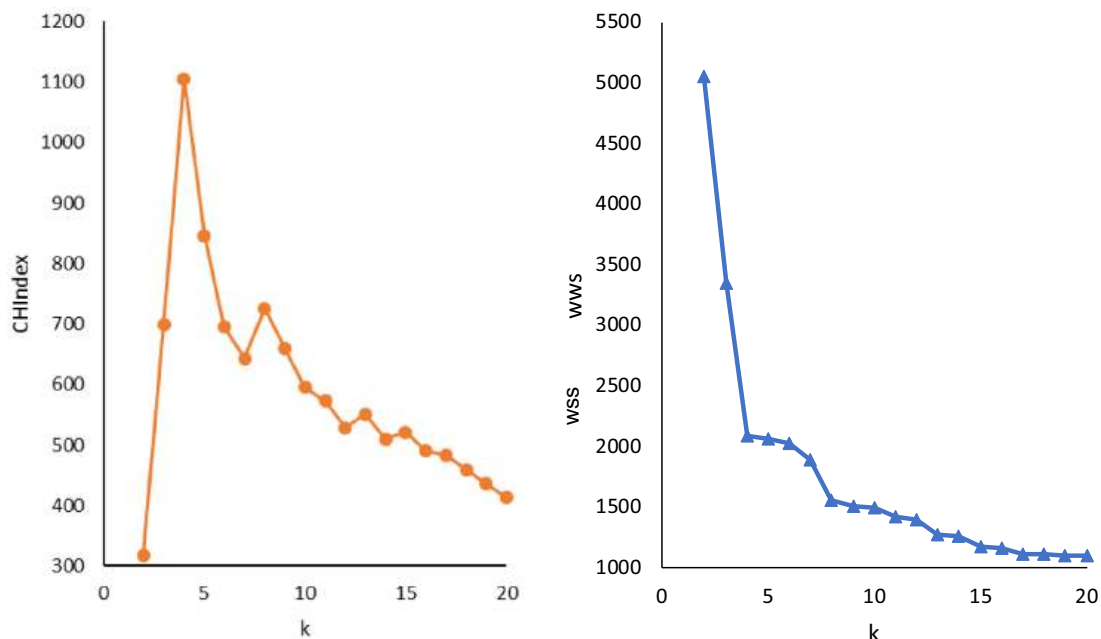


Fig. 12. Value of the CHIndex and total within sum of squares (wss), and for a set 3 of 1806 rainfalls from Kraków, depending on the adopted number k of clusters.

- 1) The complete methodology of the storm rainfall hyetographs cluster analysis should cover tools for both hierarchical and non-hierarchical analysis of the sets structure. Before the application of the cluster of normalised (dimensionless) hyetographs, key in terms of the final products, i.e., model hyetographs, by means of the k-means method, the hierarchical agglomeration method should be applied to prepare dendrograms of similarity of temporal courses of rainfalls in the analysed sets. The dendrograms should be subject to expert analysis not only in terms of determination of a potential number of clusters in the analysed sets, but more importantly the identification of particularly peculiar rainfall patterns. Like in the case of set No. 2 and rainfall recorded by rain gauge No. 12 in Płaszów in 2014, such records should be removed before the division of the set using a predefined number k of clusters by means of non-hierarchical methods;
- 2) The diagrams analysis of correlation of values of the Caliński and Harabasz index (CHIndex) and total within sum of squares (wss) with number k of clusters permits completely objective determination of the correct number of clusters for which the division of storm rainfall sets should be performed from the similarity point of view of their normalised (dimensionless) hyetographs. For the accurate, optimal number of clusters, maximisation of CHIndex values is observed combined with an evident decrease in the gradient of the decrease in wss values. In the case of all three analysed sets of storm rainfalls from Kraków, based on analyses of CHIndex and wss values, the adopted optimum number of clusters was four (k = 4), and the choice was positively verified in all further research through obtaining clusters meeting the requirements of internal coherence and external isolation;

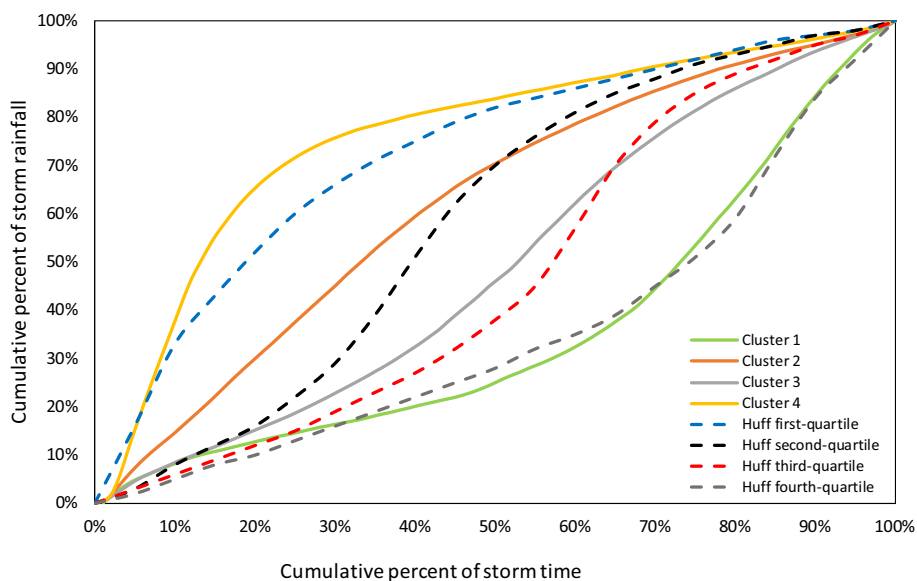


Fig. 13. Diagrams of averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for four clusters designated by means of the k-means clustering method for Kraków based on set No. 3 for 1806 storm rainfalls. For comparison, the diagram also shows Median Time Distributions of Heavy Storm Rainfall at a Point developed by Huff (1990).

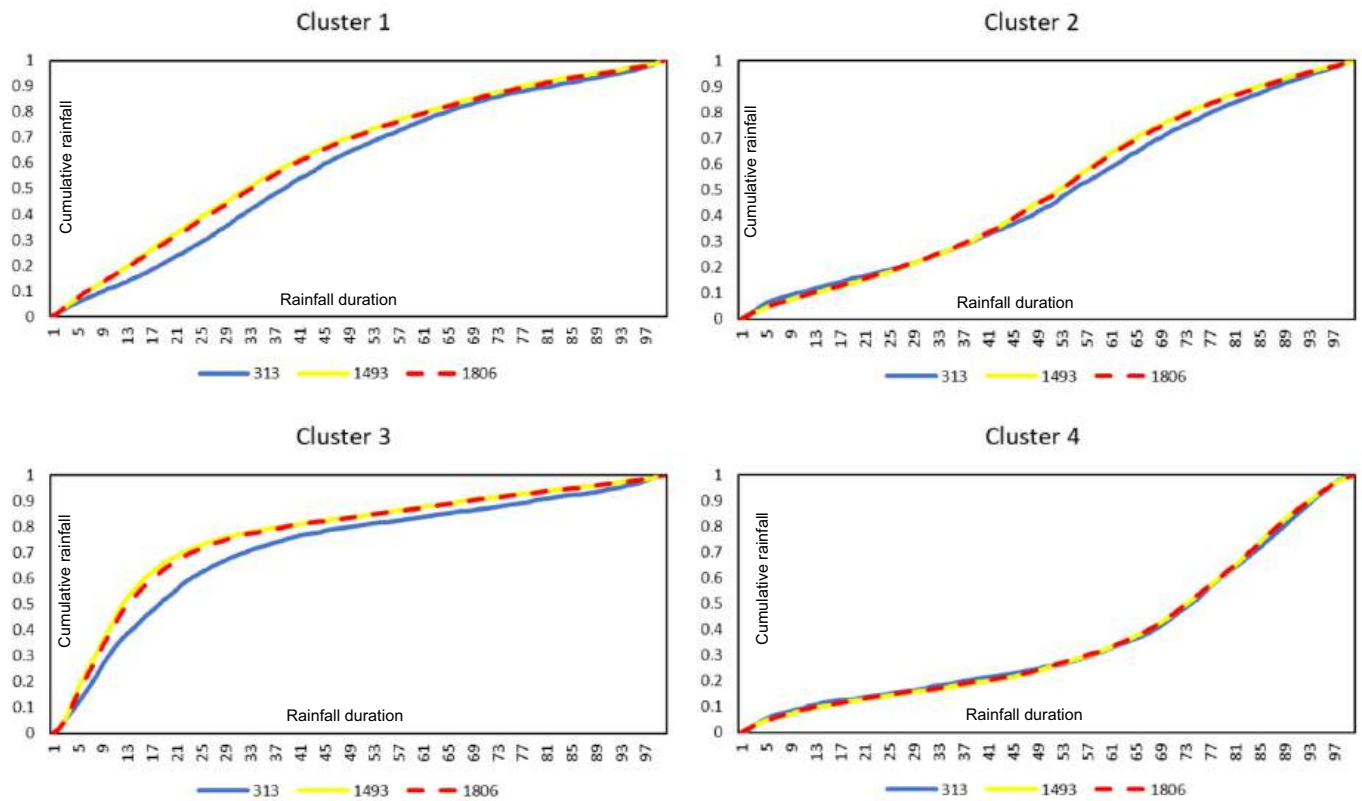


Fig. 14. Comparison of averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for four clusters designated by means of the k-means clustering method based on sets No. 1, 2, and 3: 313, 1493, and 1806 storm rainfalls recorded in Kraków. The horizontal axes present percent increase in rainfall duration, and the vertical axes show percent shares in total rainfall depth.

3) The fundamental element for the credibility of the obtained results of storm rainfalls divisions and model hyetographs identification is the assessment of classification results. The study conducted on three sets of rainfalls from Kraków justified the repeated launching of the clustering algorithm with the application of the bootstrap method. Although this undoubtedly complicates the computing algorithms and prolongs the time of calculations, it allows for calculating the bootmean parameter corresponding to the mean value of the Jaccard Index (Jaccard similarity coefficient) for each of the designated clusters. The bootmean parameter permits drawing objective conclusions on whether particular clusters meet the criteria of internal coherence and external isolation (Gordon, 1999). For all clusters designated from three sets of rainfalls from Kraków, the bootmean parameter usually exceeded the adopted threshold of 0.6, confirming that the designated subclusters included no clusters with random character,

Table 2

Mean values of total depths, durations, and intensities of storm rainfalls included in particular clusters for sets No. 1 and No. 2 from Kraków.

Cluster	Total depth, mm	Total duration, min	Mean intensity, $dm^3/(s\cdot ha)$
Set No. 1			
1	20.0	577	13.0
2	19.3	598	8.5
3	19.5	348	14.7
4	18.8	505	9.7
Set No. 2			
1	19.6	665	10.8
2	20.4	712	11.3
3	17.5	365	14.2
4	19.9	668	7.7

i.e., those including rainfall patterns deviating from the remaining clusters, but also evidently mutually different. Relatively lowest values of the bootmean parameter were obtained for the least abundant set No. 1 (in a range from 0.65 to 0.84), whereas for approximately five or six times more abundant sets No. 2 and 3, they were higher than 0.9, or even approximate to 1.0. The latter observation suggests that the k-means clustering method is predestined for the analysis of very large sets, and is more reliable in their case;

4) The developed complex cluster analysis methodology for the division of sets of storm rainfalls and identification of model hyetographs implemented in the case of all three sets of storm rainfalls from Kraków generated coherent final results. For each of the three sets, the optimum number of clusters was four, and the resulting averaged normalised cumulative hyetographs for particular clusters showed no mutual differences within the three analysed sets. The coherence of the obtained results also concerned the frequency of storm rainfalls occurrence included to particular clusters. For all the three sets, storm rainfalls were distributed in proportions of approximately: 1/3, 1/3, 1/6, and 1/6 for clusters No. 1, 2, 3, and 4, respectively. All the aforementioned observations suggest the possibility of development of model hyetographs based on multiannual records from suburban stations (e.g., from the rain gauge at the nearby airport), and like in the case of set No. 1, their application in practice throughout the city in the case of lack of the possibility of hyetographs development based on records from the territory of the city itself (based on set No. 2).

5) The obtained set of model hyetographs for Kraków does not include hyetographs with a shape corresponding to that of synthetic hyetographs developed based on IDF (Intensity-Duration-Frequency) or DDF (Depth-Duration-Frequency) models, adopted a priori for hydrodynamic modelling of drainage systems in Poland, such as: model rainfall according to Euler type II, block rainfall, or model rainfall according to DVWK. Nonetheless, the shapes of the developed hyetographs point to high similarity to

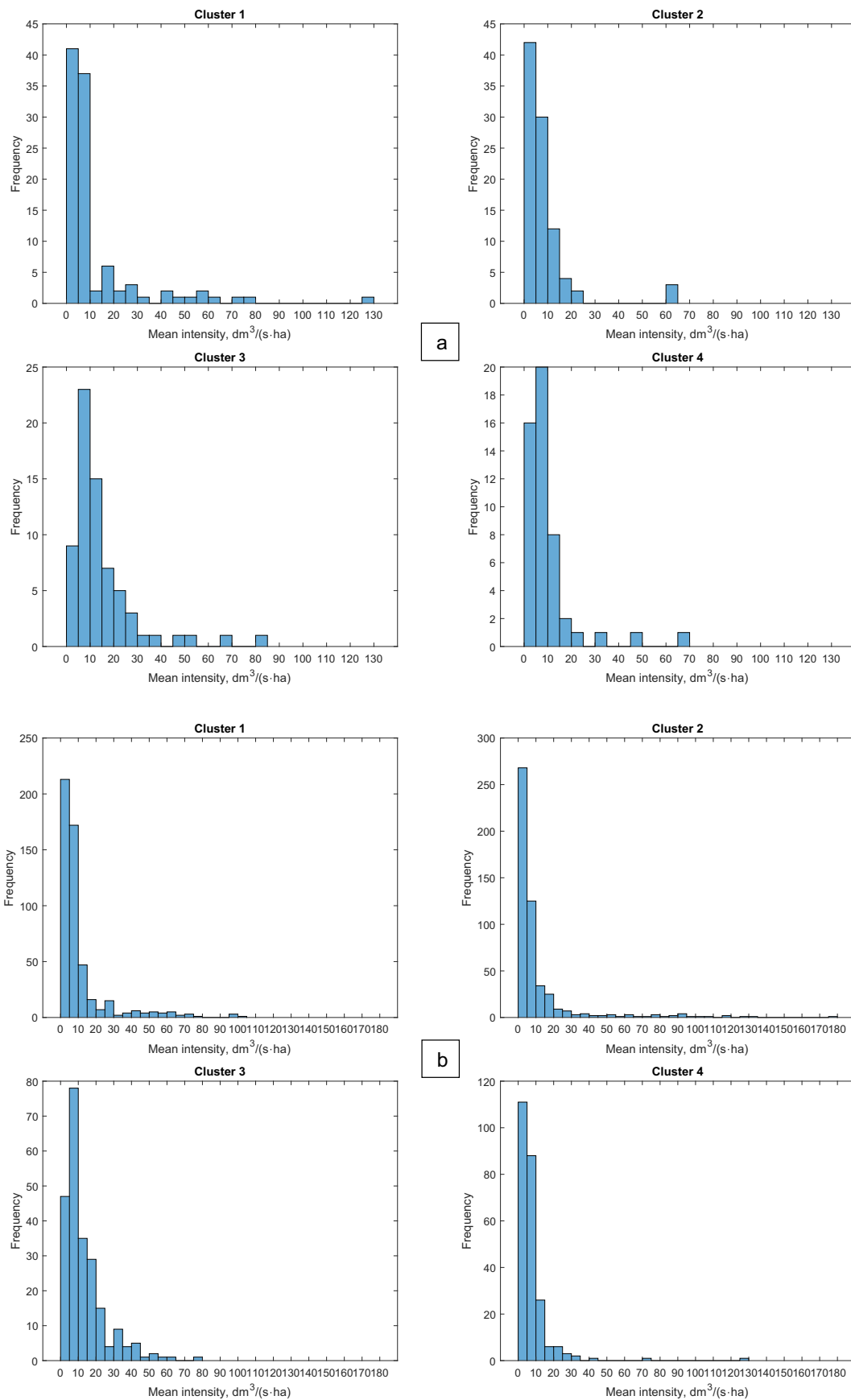


Fig. 15. a. Histograms of mean rainfall intensities for four designated clusters in rainfall set No. 1 from Kraków (313 rainfalls); b. Histograms of mean rainfall intensities for four designated clusters in rainfall set No. 2 from Kraków (1493 rainfalls).

classic medians (50th-percentile) of dimensionless hyetograph curves derived from point rainfall values derived by Huff (1967, 1990) and Pani and Haragan (1981). In results from Kraków, model hyetographs for subsequent clusters No. 3, 1, 2, and 4 correspond to medians (50th-percentile) of dimensionless hyetographs for: first-quartile storms, second-quartile storms, third-quartile storms, and fourth-quartile storms. Profiling of clusters results of storm rainfalls from Kraków also remain in complete accordance with earlier research by Huff (1990) according to which first-quartile storms (storms from cluster 3) usually correspond with time scales of about 6 h or less, whereas second-quartile storms (storms from cluster 1) usually have longer durations within a range from 6 to 12 h.

The development of a complex methodology of storm rainfall hyetographs analysis and its successful testing in a polygon of a large rain gauge network in Kraków offers the possibility of its implementation at a considerably broader scale in the scope of implementation of the WaterFolder Connect project. The practical objective here is to develop credible sets of local model hyetographs in a network of 100 rain gauges in Poland for the purpose of their later use in practice for supplying a digital platform dedicated for designing and modelling drainage systems throughout Poland. Further research, however, must be also undertaken due to new hypotheses that appeared as a result of the study. Firstly, the research hypothesis assuming the correlation of the division of storm rainfalls into particular clusters with the genesis of rainfalls needs to be verified. Moreover, in the context of the determined lack of variability of model hyetographs at the single urban precipitation field scale, it is important to verify the thesis on the regionalisation of study results possibility from more mutually distant rain gauges, and the practical application of common sets of model hyetographs in larger areas of the country. In the future, the developed methodology of hyetograph analysis could be also implemented in other countries around the globe.

CRedit authorship contribution statement

We declare that all authors contributed to this paper's conception and design. The methodology, data collection and analyses were performed by Karol Mikołajewski and Paulina Dżimińska. They were also responsible for writing the initial draft of the manuscript. Marek Ruman and Klaudia Kosek were responsible for preparing the results' discussion and the final edition of the manuscript. Marcin Glixelli and Piotr Zięta Karol were responsible for preparing the selected part of the results' description. Karol Mikołajewski performed the statistical analyses of obtained data. Paweł Licznar was responsible for the coordination of research and the scientific concept of the manuscript. Finally, each author read and approved the final paper.

Declaration of competing interest

The authors declare no conflict of interest. The funding institution had no role in the design of the study, in the samples collection, analyses, interpretation of data, in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

Acknowledgments

This work was carried out as part of the fourth edition of the programme implementation doctorate conducted by the Ministry of Science and Higher Education, Republic of Poland, and within the project entitled 'WaterFolder Connect – an integrated platform for design and modelling of drainage systems – POIR.01.01.01-00-0119/21', financed by the National Centre for Research and Development under the Smart Growth Operational Programme 2014-2020, Priority axis: Support for R&D in enterprises; Measure: R&D projects in enterprises; Sub-measure: Industrial research and development conducted by enterprises. Precipitation data were partially provided by the Municipal Water Supply and Sewerage Company (MWSSC) in Kraków, Poland.

References

- Bonta, J.V., 2004. Development and utility of huff curves for disaggregating precipitation amounts. *Appl. Eng. Agric.* 20, 641–652.
- Bonta, J.V., Rao, A.R., 1987. Factors affecting development of huff curves. *Trans. ASAE* 30, 1689–1693.
- Burszta-Adamiak, E., Licznar, P., Zaleski, J., 2019. Criteria for identifying maximum rainfalls determined by the peaks-over-threshold (POT) method under the polish atlas of rainfalls intensities (PANda) project. *Meteorol. Hydrol. Water Manag.* 7, 3–13.
- Deidda, R., 2000. Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1029/2000WR900038>.
- Deidda, R., Benzi, R., Siccardi, F., 1999. Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall. *Water Resour. Res.* 35, 1853–1867.
- Desbordes, M., 1978. Urban runoff and design storm modeling. *Proceedings of the First International Conference on Urban Drainage*, London, UK, April 1978, pp. 353–361.
- DVWK, 1984. *Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Regeln 113 (Teil II: Synthese)*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Germany.
- Dżimińska, P., Drzewiecki, S., Ruman, M., Kosek, K., Mikołajewski, K., Licznar, P., 2021. The use of cluster analysis to evaluate the impact of COVID-19 pandemic on daily water demand patterns. *Sustainability* 13, 5772.
- Elfeki, A.M., Ewea, H.A., Al-Amri, N.S., 2014. Development of storm hyetographs for flood forecasting in the Kingdom of Saudi Arabia. *Arab. J. Geosci.* 7, 4387–4398.
- Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M., 2001. *Cluster Analysis*. Edward Arnold, London.
- Gires, A., Onof, C., Maksimovic, C., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Simoes, N., 2012. Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban hydrology through multifractal downscaling: a case study. *J. Hydrol.* 442–443, 117–128.
- Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Lovejoy, S., 2013. Multifractal analysis of an urban hydrological model on a seine-Saint-Denis study case, urban water J. 10, 195–208. *Ighlights. Remote Sens. Environ.* 147, 173–185.
- Gordon, A.D., 1999. *Classification*. Chapman and Hall/CDC, London.
- Güntner, A., Olsson, J., Calver, A., Gannon, B., 2001. Cascade-based disaggregation of continuous rainfall time series: the influence of climate. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 5, 145–164.
- Hingray, B., Ben Haha, M., 2005. Statistical performances of various deterministic and stochastic models for rainfall series disaggregation. *Atmos. Res.* 77, 152–175.
- Huff, F.A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.* 3, 1007–1019.
- Huff, F.A., 1970. Time distribution characteristics of rainfall rates. *Water Resour. Res.* 6, 447–454.
- Huff, F.A., 1990. *Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois*; Circular. Available online 1990. Illinois State Water Survey 173, Champaign, IL, USA. <http://hdl.handle.net/2142/94492>.
- Jakubiak, P., Licznar, P., Malinowski, S., 2014. Rainfall estimates from radar vs. raingauge measurements. *Warsaw case study. Environment Protection Engineering* 40, 162–170.
- Keifer, C.J., Chu, H.H., 1957. Synthetic storm pattern for drainage design. *J. Hydrol. Eng. Div.* 83, 1–25.
- Kundzewicz, Z., Licznar, P., 2021. Climate change adjustments in engineering design standards. European perspective. *Water Policy* 2022 in print.
- Larose, D.T., 2005. *Discovering knowledge in data. An Introduction to Data Mining*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey and Canada.
- Lee, K.T., Ho, J.Y., 2008. Design hyetograph for typhoon rainstorms in Taiwan. *J. Hydrol. Eng.* 13, 647–651.
- Licznar, P., 2008. Obliczenia częstotliwości nadpiętrzenia sieci kanalizacji deszczowej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 7–8, 16–21.
- Licznar, P., 2009. *Generatory syntetycznych szeregów opadowych do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych*. Monografie LXXVII. UP we Wrocławiu, p. 180.
- Licznar, P., 2013. Stormwater reservoir dimensioning based on synthetic rainfall time series. *Ochrona Środowiska* 35, 27–32.
- Licznar, P., 2018. *Analiza opadów atmosferycznych na potrzeby projektowania systemów odwodnienia*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN 137, Wrocław 2018, p. 209.
- Licznar, P., Szeląg, B., 2014. *Analiza zmienności czasowej opadów atmosferycznych w Warszawie*. 36. *Ochrona Środowiska*, pp. 23–28.
- Licznar, P., Lomotowski, J., Rupp, D.E., 2011. Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: an evaluation of six models and a new generator. *Atmos. Res.* 99, 563–578.
- Licznar, P., Schmitt, T.G., Rupp, D.E., 2011. Distributions of microcanonical cascade weights of rainfall at small timescales. *Acta Geophys.* 59, 1013–1043.
- Licznar, P., De Michele, C., Adamowski, W., 2015. Precipitation variability within an urban monitoring network via microcanonical cascade generators. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 485–506.
- Licznar, P., Burszta-Adamiak, E., Lomotowski, J., Stańczyk, J., 2017. Modern proposal of methodology for retrieval of characteristic synthetic rainfall hyetographs. In: *Kazmierczak, B., Kutylowska, M., Piekarska, K., Jouhara, H., Danielewicz, J. (Eds.), E3S Web of Conferences* 22, 00104 (2017) DOI:10.1051/e3sconf/20172200104 (E3S Web of Conferences, Volume 22 (2017), International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17), Wrocław, Poland, July 2-5, 2017).
- Licznar, P., Siekanowicz, K., Stach, A., Zaleski, J., 2020. *Atlas opadów*. W: *Metodyka opracowania polskiego atlasu nateżeń deszczów (PANda) / pod red. Pawła Licznara i Janusza Zaleskiego*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, pp. 99–137.
- de Lima, M.I.P., 1998. *Multifractals and the Temporal Structure of Rainfall*. Wageningen Agricultural University, Wageningen Doctoral dissertation.
- McCuen, R.H., 1986. *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice Hall.

- Molnar, P., Lüscher, R., Hausherr, R., 2006. Impact of storm rainfall variability on urban drainage system performance. Proc. 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas: Extreme Precipitation, Multisource Data Measurement and Uncertainty, 7–10 Dec. 2006, St. Moritz, Switzerland.
- Nayak, M.A., Ghosh, S., 2013. Prediction of extreme rainfall event using weather pattern recognition and support vector machine classifier. *Theor. Appl. Climatol.* 114, 583–603.
- Nix, S.J., 1994. *Urban Stormwater Modelling and Simulation*. Lewis Publishers, CRC Press.
- Over, T.M., Gupta, V.K., 1994. Statistical analysis of mesoscale rainfall: dependence of a random cascade generator on large-scale forcing. *J. Appl. Meteorol.* 33, 1526–1542.
- Pan, C., Wang, X., Liu, L., Huang, H., Wang, D., 2017. Improvement to the huff curve for design storms and urban flooding simulations in Guangzhou, China. *Water* 9, 411.
- Pani, E.A., Haragan, D.R., 1981. A comparison of Texas and Illinois temporal rainfall distributions. Proceedings of the Fourth Conference on Hydrometeorology, Reno, NV, USA, 7–9 October 1981. 1981. American Meteorological Society, Boston, MA, USA, pp. 76–80.
- Peyron, N., Nguyen, V.T.V., Rivard, G., 2002. An optimal design storm pattern for urban runoff estimation in southern Québec. Proceedings of the 30th Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, QC, Canada, 5–8 June 2002.
- Rupp, D.E., Licznar, P., Adamowski, W., Leśniewski, M., 2012. Multiplicative cascade models for fine spatial downscaling of rainfall: parameterization with rain gauge data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 671–684.
- Schmitt, T.G., 2000. Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA, Hennef.
- Sifalda, V., 1973. Entwicklung eines berechnungsregens für die bemessung von kanalnetzen. *GWF Wasser Abwasser* 114, 435–440.
- Stanisz, A., 2007. *Przystępny Kurs Statystyki z Zastosowaniem STATISTICA PL na Przykładach z Medycyny. Tom I-III*. StatSoft Polska Sp. z o.o., Kraków, Poland.
- Terranova, O.G., Iaquina, P., 2011. Temporal properties of rainfall events in Calabria (southern Italy). *Nat. Hazard. Earth Syst.* 11, 751–757.
- Walesiak, M., Gatnar, E., 2009. *Analiza Skupień. Statystyczna Analiza Danych z Wykorzystaniem Programu R*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Poland.
- Wartalska, K., Kaźmierczak, B., Nowakowska, M., Kotowski, A., 2020. Analysis of hyetographs for drainage system modeling. *Water* 12, 149.
- Yen, B.C., Chow, V.T., 1980. Design hyetographs for small drainage structures. *J. Hydraul. Eng. Div. ASCE* 106, 1055–1076.
- Zhou, Y., Smith, S.J., Elvidge, C.D., Zhao, K., Thomson, A., Imhoff, M., 2014. A Cluster-based Method to Map Urban Area From DMSP/OLS n.

Załącznik nr 9
do pisma okólnego nr 2
Prorektora ds. nauki i finansów
z dnia 19 lutego 2024 r.

Sosnowiec 25.09.2024
miejsowość, data

Karol Mikołajewski

imię i nazwisko kandydata

44-105 Gliwice, ul Śniadeckich 8H
adres do korespondencji

602 529 300
nr telefonu

karol.mikolajewski@us.edu.pl
adres e-mail

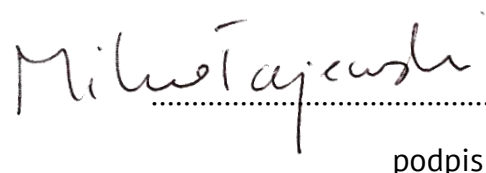
Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk o Ziemi, Będzińska 60, Sosnowiec
afiliacja

OŚWIADCZENIE OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

Mój udział polegał na opracowaniu i sprawdzeniu metodologii, współpracy w przygotowaniu bazy danych, prowadzeniu badań i analizie danych, współpracy w interpretacji wyników. Zredagowałem tekst artykułu oraz przygotowałem rysunki i wykresy.


.....
podpis

Location Sosnowiec date 25.09.2024

Karol Mikołajewski

imię i nazwisko kandydata

44-105 Gliwice, ul Śniadeckich 8H

adres do korespondencji

602 529 300

nr telefonu

karol.mikolajewski@us.edu.pl

adres e-mail

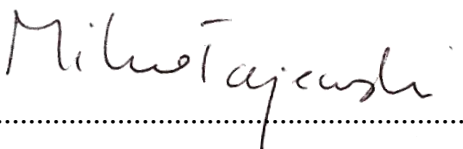
University of Silesia, Faculty of Natural Sciences, Institute of Earth Sciences, Będzińska 60, Sosnowiec
Affiliation

**STATEMENT OF THE APPLICANT REGARDING THEIR OWN CONTRIBUTION
TO THE CREATION OF THE WORK**

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

My involvement consisted of developing and reviewing the methodology, collaborating in the preparation of the database, conducting research and data analysis, and cooperating on the interpretation of results. I edited the article's text and prepared the figures and charts.



Signature of the author of the publication

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Sosnowiec, 25.09.2024

Marek Ruman

Imię i nazwisko współautora publikacji

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk o Ziemi, Będzińska 60, Sosnowiec

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

Mój udział polegał na koordynacji tworzenia ostatecznej wersji artykułu. Byłem również odpowiedzialny za redagowanie rozdziału opisującego wyniki i ich dyskusję.



.....
Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Sosnowiec, 25.09.2024

Marek Ruman

First and last name of co-author of the publication

University of Silesia, Faculty of Natural Sciences, Institute of Earth Sciences, Będzińska 60, Sosnowiec

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

My involvement included coordinating the creation of the final version of the article. I was also responsible for editing the chapter describing the results and their discussion.



.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Sopot, 25.09.2024

Klaudia Kosek

Imię i nazwisko współautora publikacji

Institut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, Zakład Chemii i Biochemii Morza, ul. Powstańców Warszawy 55, Sopot
Afilacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

Mój udział polegał na pomocy w zbieraniu materiałów, tłumaczeniu tekstu, sprawdzaniu i redagowaniu tekstu dotyczącego dyskusji wyników badań.

Klaudia Kosek

.....
Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Sopot, 25.09.2024

Klaudia Kosek

First and last name of co-author of the publication

Institute of Oceanology, Polish Academy of Sciences, Marine Chemistry and Biochemistry Department, Powstańców Warszawy 55, Sopot

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

My involvement consisted of assisting in the collection of materials, translating the text, and reviewing and editing the section related to the discussion of the research results.

Klaudia Kosek

.....

Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Kraków, 25.09.2024

Marcin Glixelli

Imię i nazwisko współautora publikacji

Wodociągi Miasta Krakowa S.A. , ul. Senatorska 1, Kraków

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo lub wydawca, tom, strony)

Mój udział polegał na przygotowaniu i udostępnieniu bazy danych z deszczomierzy należących do przedsiębiorstwa Wodociągi Miasta Krakowa S.A. oraz opracowaniu opisu tego systemu.



Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Kraków, 25.09.2024

Marcin Glixelli

First and last name of co-author of the publication

Krakow Water S.A. , ul. Senatorska 1, Kraków

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My contribution involved preparing and providing access to a database of rain gauges belonging to the company Krakow Water S.A. and developing a description of this system.



Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Bydgoszcz, 25.09.2024

Paulina Dzimińska

Imię i nazwisko współautora publikacji

Miejskie Wodociągi i Kanalizacja w Bydgoszczy – sp. z o.o., ul. Toruńska 103, Bydgoszcz

Afiliacja

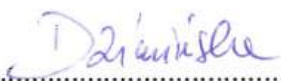
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo lub wydawca, tom, strony)

Mój udział polegał na wsparciu w przygotowaniu metodologii, pomocy w opracowaniu danych oraz przygotowywaniu draftu artykułu.



Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Bydgoszcz, 25.09.2024

Paulina Dzimińska

First and last name of co-author of the publication

Municipal Water and Sewage Company in Bydgoszcz, ul. Toruńska 103, Bydgoszcz

Affiliation

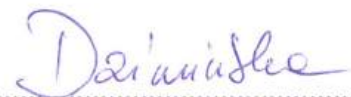
STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My contribution involved supporting the preparation of the methodology, assisting in data analysis, and drafting the article.



.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Kraków, 25.09.2024

Piotr Ziętara

Imię i nazwisko współautora publikacji

Wodociągi Miasta Krakowa S.A. , ul. Senatorska 1, Kraków

Afiliacja

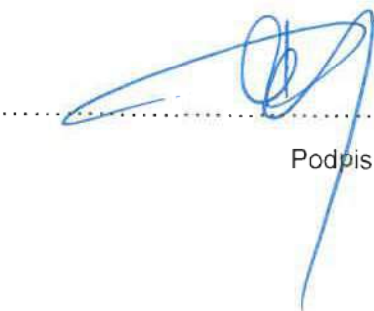
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo lub wydawca, tom, strony)

Mój udział polegał na przygotowaniu i udostępnieniu bazy danych z deszczomierzy należących do przedsiębiorstwa Wodociągi Miasta Krakowa S.A. oraz opracowaniu opisu tego systemu.



.....

Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE
WORK

Kraków, 25.09.2024

Piotr Ziętara

First and last name of co-author of the publication

Krakow Water S.A. , ul. Senatorska 1, Kraków

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My contribution involved preparing and providing access to a database of rain gauges belonging to the company Krakow Water S.A. and developing a description of this system.



.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Warszawa, 25.09.2024

Paweł Licznar

Imię i nazwisko współautora publikacji

**Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, ul. Nowowiejska 20, Warszawa**

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo lub wydawca, tom, strony)

Mój udział polegał na koordynacji badań, konsultacji i interpretacji wyników. Byłem też odpowiedzialny za naukową koncepcję artykułu, oraz akceptowałem jego końcową wersję przed przekazaniem do publikacji



Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Warszawa, 25.09.2024

Paweł Licznar

First and last name of co-author of the publication

**Warsaw University of Technology, Faculty of Building Services, Hydroengineering, and Environmental Engineering
Department of Hydraulic Engineering and Hydraulic, ul. Nowowiejska 20, Warszawa**

Affiliation

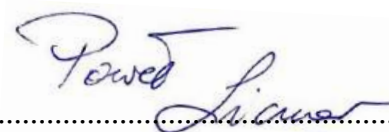
STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, GLIXELLI, Marcin, DZIMIŃSKA, Paulina, ZIĘTARA, Piotr and LICZNAR, Paweł, 2022, Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 829, p. 1–20. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.154588

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My contribution involved coordinating the research, consulting, and interpreting the results. I was also responsible for the scientific concept of the article and approved its final version before submission for publication.



Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

Publikacja 2

Heavy storms and their model hietographs in Poland







MIKOŁAJEWSKI Karol, STACH Alfred, KUNDZIEWICZ Zbigniew, RUMAN Marek,
KOSEK Klaudia, LICZNAR Paweł

Ambio, 2024; 140 punktów MNiSW; Journal IF 5,8 (2023); 5-year Journal IF 6,2 (2023)



RESEARCH ARTICLE

Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs

Karol Mikołajewski , Alfred Stach , Marek Ruman ,
Klaudia Kosek , Zbigniew W. Kundzewicz , Paweł Licznar 

Received: 28 April 2024 / Revised: 12 July 2024 / Accepted: 5 August 2024
© The Author(s) 2024

Abstract In the light of observed variability in precipitation patterns, there is a growing need for comprehensive data mining of regularly updated rainfall recording databases. Therefore, an analysis of heavy rainfall and hyetographs was conducted using a 30-year high-resolution dataset from 100 rain gauges across Poland, covering 31 646 rainfall events. Distributions of rainfall depths, durations, and intensities were explored, and maxima were compared to global records. Spatial analysis revealed significant variations in the frequency, depths, and durations of extreme rainfall across different regions. Cluster analysis determined model hyetographs for each station. The likelihood of regions belonging to clusters with three to five model hyetographs was assessed using Indicator Kriging. Findings underscore the importance of using local, characteristics rainfalls in hydrodynamic modelling of drainage systems and future rainfall scenarios. These results provide a foundational step towards understanding and monitoring the impacts of climate change on rainfall characteristics, especially extremes, in future decades.

Keywords Classification quality assessment indices · Cluster analysis · Heavy rainfalls · Model hyetographs · Poland · Precipitation modelling

INTRODUCTION

In recent years, the world has witnessed a significant shift in the occurrence of extreme rainfall events, driven by ongoing

and intensifying climate change. These changes in precipitation patterns have profound implications for various regions, including Poland. Characterising the prevailing rainfalls in Poland, it can be stated that they are primarily occurring during the movement of frontal zones from the Atlantic Ocean. Their efficiency is higher when storms form in the zone of cold fronts. Relatively short-lived but intense rainfall is associated with convection within a homogeneous, moist air mass. Their spatial distribution is most often random and has no clear connection with the terrain. However, maximum rainfall totals have a different origin. They occur in the Carpathians and Sudetes Mountains during a northern cyclonic situation, when moist air masses accumulate on the windward slopes of the mountains. In Poland, rains of high efficiency and intensity most often occur in June and July, accounting for over 60% of cases. The natural water cycle in Poland, like in many other parts of the globe, has experienced disruption due to rapid changes in land use and land cover, primarily stemming from urbanisation and the extensive transformation of agricultural areas into built-up zones (Tanaś and Trojanek 2014; Castanho et al. 2019; Gargula et al. 2020; SOER 2020). One notable consequence of this transformation is the increasing surface sealing, which hinders rainfall from infiltrating into the ground. Consequently, the retention capacity of built-up areas diminishes, and the runoff coefficient rises. As rainwater cannot percolate into the soil, it instead flows over paved surfaces, potentially culminating in violent surface runoff. This alteration in the natural water cycle has far-reaching implications for urban areas and their vulnerability to flooding.

However, the challenges posed by shifting land use and urbanisation are compounded by the broader context of climate change. Climate change is not solely synonymous with rising temperatures; it also entails shifts in the spatial

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>.

and temporal patterns of extreme precipitation events. These changes encompass an increase in both the intensity and frequency of heavy rainfalls on a global scale (Seneviratne et al. 2021), a trend similarly observed in numerous European regions and countries (Madsen et al. 2014). This phenomenon aligns with the Clausius–Clapeyron equation, which describes the relationship between saturated vapour pressure and temperature, elucidating that a warmer atmosphere can accommodate more water vapour, potentially leading to more intense precipitation (Kundzewicz and Pińskwar 2022).

Furthermore, formal detection and attribution analyses (Pall et al. 2011) have unveiled a noteworthy contribution of anthropogenic greenhouse gas emissions to the intensification of heavy precipitation. Consequently, the consequences of increased intense precipitation are evident, particularly in the form of pluvial floods—flash and urban floods caused by heavy rainfalls—which have surged in both frequency and magnitude. According to projections for the future, the load is likely to aggravate, not only due to increasing urbanisation, but also due to climate change. Even if the nature of changes of extreme precipitation in the warming climate of Poland is complex (Pińskwar 2022), the occurrence of long intervals with low precipitation interspersed by episodes of increasingly heavy rainfall can be expected. The system's resistance should therefore be increased to match the increasing load. Hence, it is becoming necessary to upgrade municipal rainwater drainage systems so that they can accommodate greater loads (Kundzewicz and Licznar 2021). Rainwater drainage systems are a key element of the critical municipal infrastructure. The tasks they are facing today are not only limited to the interception and discharge of rainwater to nearby receivers, i.e. surface water bodies. There is an increasing need to store water in drainage systems. Storage reservoirs built on rainwater drainage systems are intended not only to simply slow down the runoff of rainwater, but also to restore and compensate for the water retention lost due to sealing of natural surfaces. Water retention should be of a long-term nature, and the rainwater captured in such storage reservoirs should be treated as a resource for use by city dwellers. Measures increasing the retention of drainage systems aim at reducing not only the maximum runoff caused by rainwater, but also the total runoff volume. Active management of rainwater is also becoming increasingly important. According to the smart cities concept, drainage systems and their retention resources should be managed intelligently. The growing role of drainage systems and the need to restore rainwater retention pose new challenges related to the modernisation of the toolbox of engineering design and modelling. New tools and data sources have already emerged. The design of drainage systems is increasingly frequently carried out in specialised

computer applications using digital maps, GIS resources, and digital terrain models.

Despite the vivid consequences of climate change on precipitation dynamics, the assumption of stationarity, i.e. temporal invariance of the frequency of annual maximum daily precipitation, is commonly used in practice for designing infrastructure: storm sewers, roads, railways, bridges, and culverts (Kundzewicz and Licznar 2021). The concept of design rainfall is of crucial importance in natural hazard risk reduction, water management, and climate change adaptation. The engineering design standards serve as the basis of both designing the infrastructure and perception of tolerable risk. Only in selected countries is the awareness of climate change high enough to systematically update technical standards based on the latest observational data on precipitation or even make projections based on the results of climate models (Kundzewicz and Licznar 2021). The determination of design rainfall requires information on the greatest observed point rainfalls, probable maximum precipitation, as well as intensity–duration–frequency–area and depth–duration–frequency–area relations (Markiewicz 2021). The advent of urban runoff models brought new demands on hydroclimatology, namely the requirement of information on the time-distribution characteristics of rainfall during heavy storms. This method is recommended for computing runoff, particularly through rainfall–runoff models used in designing and operating runoff control structures, as well as for assessing individual storm events after they occur. It is important to note that variations in time-distribution models can significantly impact the results of runoff modelling for urban basins.

Bearing in mind the increasing frequency and severity of pluvial floods, flash floods, and urban floods, the understanding of the structure of the spatial–temporal fields of extreme precipitation in Poland needs improvement (Stach 2009). This includes the regional variability of characteristics of extreme precipitation, as well as the temporal change (that can be detected as a trend) and variability (deviations from the long-term trend, if such is detected). Moreover, the distribution of rainfall depth over the storm's duration needs to be determined.

The calculation of non-stationary surface storm runoff and its further transformation in the urban system requires scenarios of temporal distribution of a rainfall episode (Mikołajewski et al. 2022). Hydrological analyses require consideration of the temporal variability of point rainfall intensity, represented in the form of hyetographs. Adopting hyetographs in design aims at reflecting the temporal distribution of rainfall in recent past, and implicitly also potential rainfalls that may occur in the future, understood as the assumed duration of operation of the designed technical solutions. This is not a trivial task, however, not only because of the stochastic (random) nature of rainfall, but also of its multifractal nature (Deidda 2000; Gires et al.

2012). Until recently, the availability of accurate rainfall records at a high temporal resolution has typically been very limited. Hence, the historical methodology of model hyetograph development used to be based on generalisation and simplified assumptions without adequate validation. Interest in model hyetographs increased with first attempts of transition from stationary methods of calculation of urban stormwater systems. The model of stormwater runoff transformation in the drainage system can be combined with the hydrological surface runoff model, describing stormwater inflow to network nodes such as manholes and inlets from the catchment area and the stormwater system. The interaction of the stormwater system with the rainfall receiver could only be reflected by means of a suitable threshold condition on the network outlet.

Despite the currently growing access to precipitation time series records at a high temporal resolution, in hydrology, and particularly urban hydrology, engineers still model and design drainage systems using scenarios of temporal distributions of rainfall predefined by means of model hyetographs (Mikołajewski et al. 2022). Knowledge on how much rain can fall in a particular location in the country is in increasing demand. Regionalisation can be based on pooling similar or neighbouring stations together. The use of geostatistical tools allows for the estimation of the spatial field of precipitation depth with specific exceedance probabilities in locations for which there are no measurements (which allows for the extension of information and coverage of the entire country), but also for the estimation of the confidence intervals of these quantities. Because climate, land use, and land cover have changed in Poland in recent decades, and are projected to change in the future, reliable knowledge about properties of time-distribution of precipitation is needed for various spatial locations.

The occurring and forecasted climate changes and the resulting changes in recorded precipitation in Central Europe are manifested not so much in changes in average annual precipitation totals as in unfavourable prolongation of drought periods and occurrence of more seldom appearing, but more intensive rainfall. Proper monitoring of such transformations requires reference knowledge on heavy rainfalls from the period of recent decades. Considering the above, research was undertaken involving complex analyses of heavy rainfalls in Poland in terms of their basic characteristics and spatial distribution in the country, as well as regarding only temporal distributions, i.e. hyetograph models of recorded heavy rainfalls (Mikołajewski et al. 2022).

This study represents a pioneering effort, utilising a large and verified digital dataset of high-resolution precipitation data, and applying modern techniques such as geostatistical simulations and data mining. It aims to

determine reference statistics for heavy rainfalls in Poland from 1986 to 2015 and develop methodologies for analysing extensive precipitation series from rain gauge networks. Pragmatically, it seeks to quantify the amount and duration of maximum heavy rainfalls and establish typical hyetographs, crucial for designing and modelling drainage systems in Poland.

By employing advanced geostatistical and data mining techniques, the study offers a robust methodological framework adaptable to regions experiencing similar precipitation shifts. Its comprehensive analysis of the temporal distribution of heavy rainfalls enhances understanding of hydrological processes, vital for creating resilient infrastructure and sustainable urban planning practices globally. This research underscores the need for updated engineering standards and proactive adaptation strategies, making it have a significant meaning to a readership widely interested in environmental sciences, urban planning, and climate change mitigation.

MATERIALS AND METHODS

Digital base of precipitation data

The study employed resources of the national precipitation base of the Polish Atlas of Rainfall Intensities (PANDa) Project. The base was developed in the period 2016–2017, and covered data from 30 years of precipitation records from 100 rain gauges in Poland (hence a total of 3000 station-years of observations), including synoptic stations (I and II order), climatic stations (III and IV order), and precipitation stations (V order). The list of all stations included in the digital base of the PANDa project with their geographic coordinates and heights above sea level is presented in Table S1 (Supplementary information). The preparation of the PANDa precipitation base employed analogue records (pluviograph strip charts) subject to digitisation with the application of a methodology proposed by Licznar et al. (2011), and digital records from electronic rain gauges. Analogue data in the form of pluviograph strip charts primarily covered observations of the warm hydrological half-year (from May to October), and digital data from electronic rain gauges already usually covered complete year-long records. Precipitation data recorded in the base adopt the form of time series with a standard temporal resolution of 1 min. All precipitation series in the base were verified in terms of accuracy, referring them to alternative precipitation records and analysing their structure with the application of methods of multifractal research. Detailed information regarding the PANDa digital precipitation base and its verification can be

found in papers by Burszta-Adamiak et al. (2019) and Wilk et al. (2020).

The database includes values recorded between 1986 and 2015. To fill in gaps in the observation data, about 2% of the resources were supplemented with records from earlier years (dating back to 1980) and from the later year 2016. Approximately 40% of the data in the resulting PANDa database consists of year-round observations from electronic rain gauges. The remaining 60% is analogue data, which required digitising pluviographs from periods of the warm half-year.

Designation of sets of heavy rainfalls

Based on the cluster analysis methodology, the observed heavy rainfall sets were divided into rainfall clusters with similar temporal distributions, allowing for the final identification of local model hyetograph clusters. The cluster number was optimised in a rational, theoretically-justified way. The study deals with rainfall only (no snow), although in Poland snow may incidentally fall in late spring and early autumn, i.e. during the warm half-year. The methodology of the entire process, briefly described in this chapter, is presented in the diagram below as a flowchart—Fig. 1. References to individual blocks in this flowchart are included in the text of this and next subsection.

Heavy rainfalls were designated from precipitation time series of the PANDa database (Block [1] in Fig. 1) by criteria proposed by Wilk et al. (2020) for the identification of precipitation used for modelling municipal drainage systems. The criteria are a standard applied in Germany and Poland, and have been used, e.g. in papers written by Licznar et al. (2011, 2017) and Mikołajewski et al. (2022) (Block [2] in Fig. 1). A value of 10 mm was adopted as the threshold of total amount of heavy rainfall, and 4 h as the minimum time interval between individual rainfalls. These criteria were derived from the Commentary on the DWA-A118 guideline (Schmitt 2000). The foundation for this criterion was the results of research conducted by Wenzel and Voorhees (1981), which, in the context of urban watershed analysis, allowed for the estimation of the minimum break to distinguish independent cloudbursts over a period of 4–5 h. The MDPD (minimum dry-period duration) criterion according to the commentary on the DWA—A118 guidelines is frequently used in Poland (Licznar and Szelag 2014; Mikołajewski et al. 2022). The comparative rationale for adopting such an assumption is the similarity of climatic conditions in central Europe, the differentiation of rainfalls and periods with no rainfall adopted the minimum value of rainfall depth equal to 0.1 mm over 5 min as a threshold, so that the interval, due to the rainfall duration and depth, is considered as a part of the rainfall event.

Heavy rainfalls were designated automatically in the RainBrain Internet Base¹ with the application of a specially prepared function. Table S1 (Supplementary information) which in addition to location data of measuring stations included in the PANDa database, also contains information on the number of heavy rainfalls distinguished on them, based on the criteria given above. The result of the designation of heavy rainfalls separately from rain gauges of the PANDa project was sets of heavy rainfalls. In sets of heavy rainfalls from particular stations, not only their total number and number in periods of the summer half-year was determined, but also total depths and durations (Block [3] in Fig. 1). The aforementioned parameters also provided the basis for the calculation of mean intensities of particular heavy rainfalls (expressed in mm min^{-1}).

The selection and fitting of functions describing the continuous distributions of histograms for duration, depth, and intensity at individual locations were done using EasyFit Pro v 5.5 software (Block [5] in Fig. 1). Over 30 theoretical continuous distributions were tested. The goodness of fit was assessed using Kolmogorov–Smirnov, Anderson–Darling, and Chi-squared tests. From the available distributions, gamma, exponential, and general extreme value were chosen. Those functions are frequently used in analyses of precipitation regimes. In each case, the empirical and theoretical distributions were found to be consistent at the alpha level < 0.01 . Additionally, the fitting parameters of these distributions were determined for the entire dataset of all rainfall events. Detailed information about the used functions and their parameters is described below:

Distributions of heavy rainfall depth were modelled by means of the 2-parameter exponential distribution. The function of probability density of the distribution is described by the following equation:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda(x-\gamma)}, \quad (1)$$

where λ —inverse scale parameter (scale parameter is $1/\lambda$). The parameter meets the condition $\lambda > 0$, γ —location parameter (for each rain gauge $\gamma = 10$, as resulting from the adopted criterion of designation of heavy rainfalls as precipitation with a depth higher or equal to 10 mm).

Distributions of values of total durations of heavy rainfalls were modelled with the application of the gamma distribution, given by the following probability density function:

$$f(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \cdot x^{a-1} \cdot e^{-x/b}, \quad (2)$$

where a —shape parameter ($a > 0$), Γ —gamma function, b —scale parameter ($b > 0$).

¹ <https://retencja.pl/en/applications/rainbrain/>.

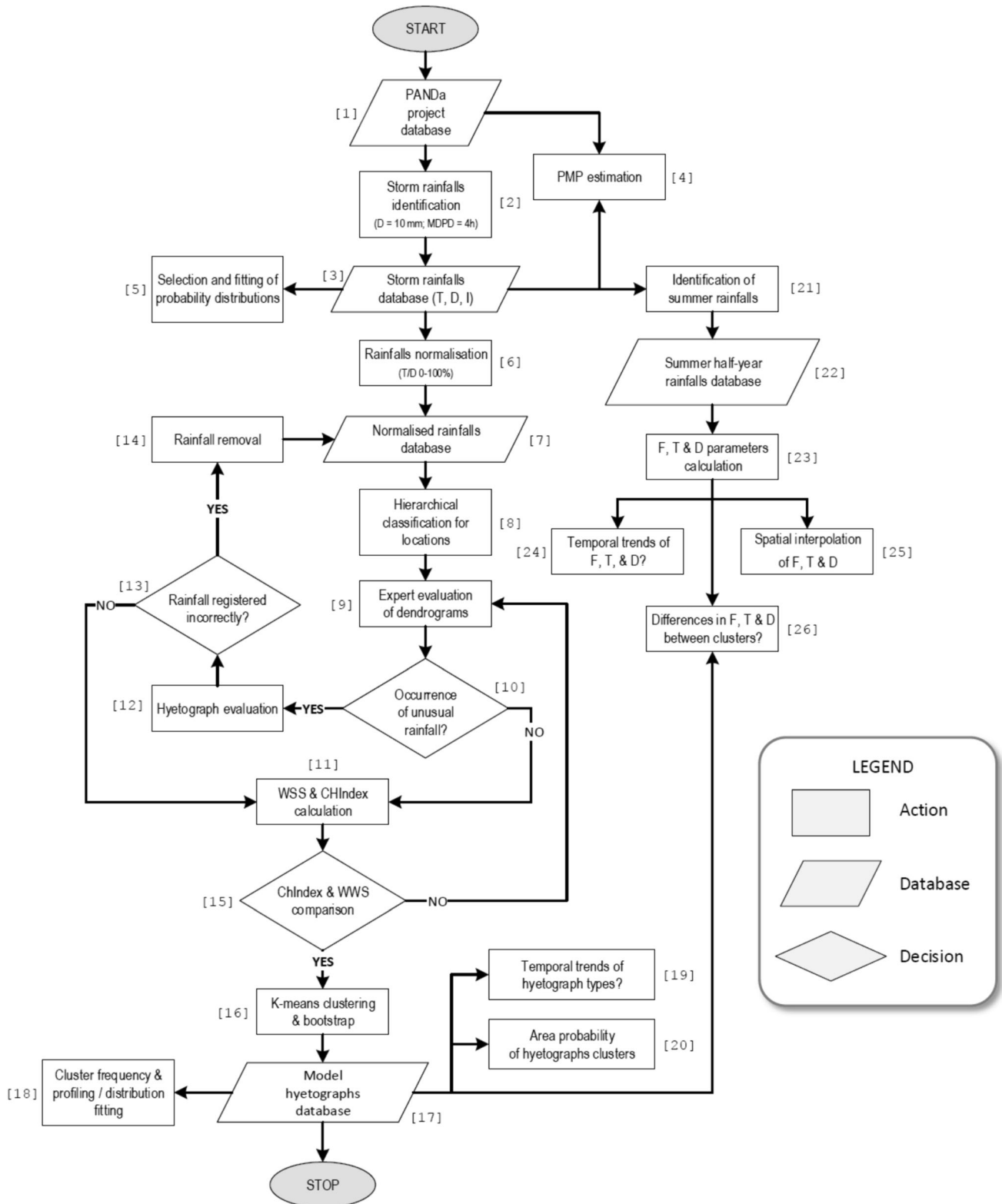


Fig. 1 Flowchart of the entire process of creating standard hyetographs and additionally conducted data analysis. The numbers in square brackets next to the individual components of the diagram serve as references in the descriptions of the stages of the methodology in the text

Distributions of values of average intensity of heavy rainfalls were modelled with the application of the generalised extreme value distribution (GEV). The function of probability density of the distribution for nonzero

values of the shape parameter k ($k \neq 0$) is defined as below:

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \cdot \exp\left(-\left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/k}\right) \cdot \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}}, \quad (3)$$

$$\text{for } 1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} > 0, \quad (4)$$

and in the case of the shape parameter $k = 0$ with the following equation:

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \cdot \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right) - \frac{x - \mu}{\sigma}\right), \quad (5)$$

where k —shape parameter, σ —scale parameter, μ —location parameter.

The parameters in the distribution Eqs. (1), (2), and (3) have been designated using common notations found in standard literature. Although different symbols are used to denote the scale, shape, and location parameters across different distributions, they refer to the respective properties of these distributions as described. For examples and further details, refer to Ross (2014), Wasserman (2004), or Rice (2006).

Analysis of heavy rainfall hyetographs

Due to differing durations and depths of the designated heavy rainfalls, further analysis of the sets, i.e. mutual comparison and identification of typical (measurable, model) time distributions of heavy rainfalls, their cumulative hyetographs were converted into so-called dimensionless (normalised) cumulative hyetographs (Block [6] in Fig. 1). The conversion was performed in accordance with the methodology described in the publication by Licznar et al. (2017) and in the report written by Licznar and Mikołajewski (2021), also following the methodology of preparation of dimensionless hyetographs originally proposed by Huff (1967). Each cumulative hyetograph of heavy rainfall with known total duration was divided into 100 equal time intervals. For each of the subsequent intervals, a corresponding cumulative rainfall increase was determined. Subsequent cumulative rainfall increments were divided by total depth to obtain unitary cumulative rainfall increments. As a result, the shape of each heavy rainfall was modelled by a hyetograph normalised to a range from 0 to 100% for duration and to a range from 0 to 1 (100%) for depth.

Mutual comparison of the shapes of dimensionless hyetographs within the analysed sets of heavy rainfalls from a hundred analysed stations, and further designation of clusters of typical (model) rainfall hyetographs employed the expanded methodology described in detail in

paper by Mikołajewski et al. (2022). The applied research methodology covered tools for hierarchical and non-hierarchical analysis of the structure of groups of dimensionless heavy rainfall hyetographs. The application of the hierarchical agglomeration method permitted preparation of dendrograms of similarity of dimensionless hyetographs in the analysed groups (Block [8] in Fig. 1). The dendrograms were subject to expert analysis for the purpose of determination of a potential number of clusters in the analysed groups, and identification of particularly specific rainfalls (Block [9] in Fig. 1).

Specific rainfalls observed in the dendrograms (Block [10] in Fig. 1) (separate rainfalls incompatible with others) were analysed by assessing their course over time (Block [12] in Fig. 1). Example of dendrograms with specific rainfall is presented in Fig. S1 supplementary information. Experts rejected rains whose intensity was greater than the measuring capacity of used rain gauge, or those whose hyetograph suggested that the device was not working properly (Block [13] in Fig. 1). Incorrectly recorded hyetograph, which was caused by clogged funnel, is presented in Fig. S2 in supplementary information.

Then, for corrected groups (with the exception of specific rainfalls), diagrams of dependency of Caliński and Harabasz Index (*CHIndex*) values and total within sum of squares (*wss*) (Mikołajewski et al. 2022) on the number of k —clusters were prepared (Block [11] in Fig. 1). The analysis of these diagrams provides the basis for the determination of the cluster number for which a division of clusters of heavy rainfalls should be performed from the point of view of similarity of their dimensionless hyetographs.

The maximum value read from the *CHIndex* chart combined with the value in which the gradient of the *wss* index decrease significantly allowed to determine the value of k corresponding to the number of clusters (Block [15] in Fig. 1), (Fig. S3 in supplementary information).

The accuracy of adopting the optimum cluster number (meeting the requirements of internal coherence and external isolation) was verified at the stage of clustering of sets of hyetographs by means of the k -mean method and with the application of bootstrap (with 150 repetitions of the grouping algorithm for each of the sets and number of clusters in the range of 2–20), (Block [16] in Fig. 1). The number 150 was determined based on examining the course of the function of the ratio of standard deviation to the mean for the bootmean values for number of simulations of the Bootstrap parameter in the range of 20–250. For bootstrap = 150, the lowest not exceeding 6% values were obtained. Example is shown in Fig. S4 in supplementary information. The accuracy of the adopted number of clusters and the performed division of hyetographs was verified through control of obtaining the average Jaccard

index value for each of the clusters at a minimum level of 0.6 (Mikołajewski et al. 2022). In the case of a lower Jaccard index value for any of the clusters, the number of clusters was reduced, and the bootstrap calculations were repeated until obtaining Jaccard index values not lower than 0.6 for all clusters. After meeting that criterion, centres of gravity were determined for all clusters (arithmetic means calculated from the original values of each variable based on objects included in a given cluster). As a result, averaged cumulative dimensionless hyetographs of heavy rainfalls were obtained for the designated clusters. A set of model hyetographs was eventually identified for each rain gauge (Block [17] in Fig. 1).

In each set of model hyetographs, the frequency of occurrence of rainfalls with hyetographs classified to particular clusters was analysed (Block [18] in Fig. 1). Moreover, profiling of clusters was conducted with the application of variables that did not participate in the process of classification of the set of objects. Such variables included total depths and total durations, as well as the resulting mean intensities of heavy rainfalls.

RESULTS

Heavy rainfalls and their characteristics

The numbers of designated heavy rainfalls in a hundred analysed stations are presented in Table S1 in supplementary information. According to the data from Table S1 (Supplementary information), the number of designated heavy rainfalls (except for strongly deviating rainfalls with particularly specific precipitation models) varied from 200 to 726 within 100 analysed rain gauges. Nonetheless, in the case of three stations to reach at least a 200-element sets, it was necessary to supplement the number of heavy rainfalls by events designated from additional observation years. For the rain gauge from Poznań, heavy rainfalls from 2018 and 2019 were added, for the rain gauge from Biebrza from 2017, and for the rain gauge from Chwałkowiec from 2016 and 2017. A total of 31 646 heavy rainfalls were therefore designated and accepted for further analyses. The depths and durations of all the designated heavy rainfalls are presented in Fig. 2.

Pursuant to expectations, total amounts of heavy rainfalls did not exceed maximum interval precipitation amounts designated in the implementation of the PANDa project (Licznar et al. 2020), or the values described by the scale dependency of the probable maximum precipitation (PMP) (Block [4] in Fig. 1) (Banasik and Ostrowski 2010):

$$P_D = 65 \cdot D^{0.475}, \quad (6)$$

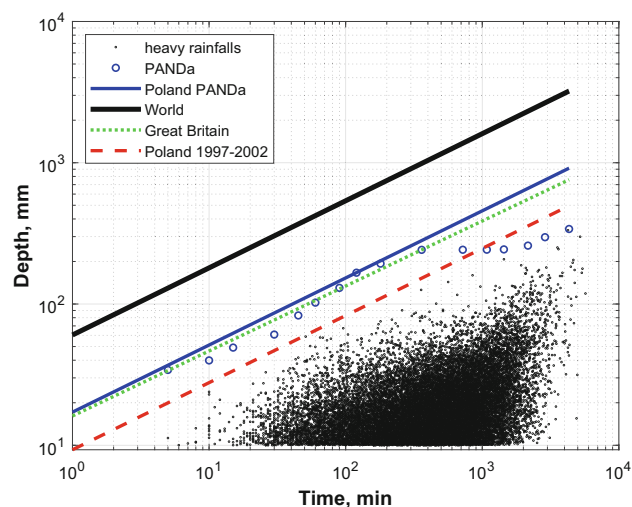


Fig. 2 Set of 31 646 designated heavy rainfalls on the background of scale dependencies of maximum rainfalls recorded globally (Paulhus 1965), in Great Britain (Wilson 1990), and in Poland in selected stations during floods in the years 1997–2002 (Banasik 2005, 2009). Moreover, the diagram shows maximum phase rainfalls designated in the scope of the PANDa project on a network of a hundred stations in Poland for durations from 5 to 4320 min with their scale dependency

where P_D —point probable maximum precipitation (mm), D —rainfall duration (h).

However, the scale dependency (6) was determined based on an independent set of heavy rainfalls, collected by Ozga-Zielińska and Ozga-Zieliński (2003), that caused the greatest floods in Poland in the multiannual period 1997–2002.

Values of probable maximum precipitation PMP determined based on formula (6) are approximately 3.5 times lower than probable maximum precipitation PMP determined globally (Paulhus 1965). It is, however, not methodically justified to compare values of precipitation extremes in Poland with precipitation extremes recorded by rain gauges in other climate zones or at considerably different latitudes, i.e. in areas with substantially higher annual precipitation totals. Due to this, Ozga-Zielińska and Ozga-Zieliński (2003) postulated operating on relative values of maximum precipitation, referred to annual normal precipitation. In that case, the relative record precipitation values from Poland become approximate to those of relative global record precipitation with more than day-long durations, e.g. from India or the Philippines. According to Banasik and Ostrowski (2010), relative values of record precipitation from Poland presented by Ozga-Zielińska and Ozga-Zieliński (2003) can be described by a common formula:

$$P_D/P_y = 0.10 \cdot D^{0.40}, \quad (7)$$

where P_D —point probable maximum precipitation PMP (mm), P_y —annual normal precipitation (mm), D —rainfall duration (h).

Relative depths of 31 646 designated heavy rainfalls were calculated through dividing their depth by normal precipitation determined for particular stations. The resulting values are plotted versus rainfalls durations on scatter plot in Fig. 3.

The highest of the obtained values exceeded threshold values described by formula (7). Due to this, the red colour (dotted line) in the plot denotes the course of a new, higher scale equation:

$$P_D/P_y = 0.12 \cdot D^{0.40}, \quad (8)$$

where P_D —point probable maximum precipitation PMP (mm), P_y —annual normal precipitation (mm), D —rainfall duration (h).

It is worth emphasising that although the higher scale dependency limiting maximum relative rainfall depth was drawn, according to the expectations, the curve was below the curve previously developed for relative maximum phase precipitation from the PANDa project. The latter curve is marked in Fig. 3 with blue colour, and is described with the following formula (Licznar et al. 2020):

$$P_D/P_y = 0.20 \cdot D^{0.40}, \quad (9)$$

where P_D —point probable maximum precipitation PMP (mm), P_y —annual normal precipitation (mm), D —rainfall duration (h).

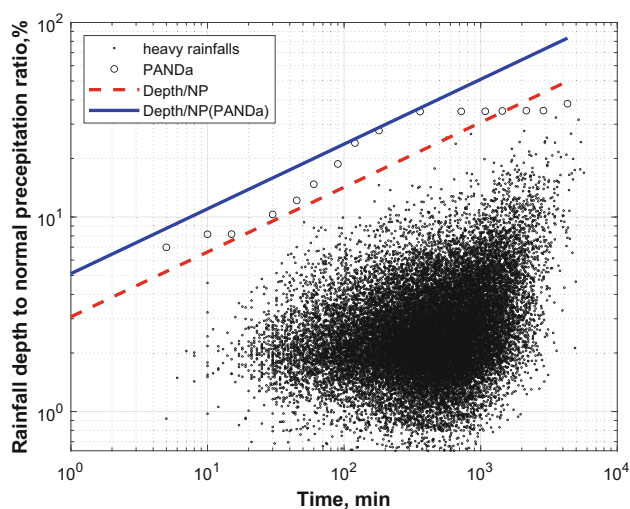


Fig. 3 Scatter plot of ratios of depths of 31,646 designated heavy rainfalls to the corresponding normal precipitation in the duration function. Analogical ratios for maximum depths of interval (phase) rainfalls designated in the scope of the PANDa project in a network of a hundred stations in Poland for durations from 5 to 4320 min are also marked on the plot. The upper limiting scale dependencies were determined for both sets

As already mentioned, in the case of each station, the obtained sets of heavy rainfalls were analysed in terms of distributions of rainfall depths, durations, and mean intensities. For this purpose, histograms of the aforementioned parameters were prepared, and probability distributions were fitted (2-parametric exponential, gamma, and GEV distributions, respectively) (Block [5] in Fig. 1). Example histograms with fitted probability distributions prepared for the rain gauge from Warsaw, the capital of Poland, are presented in supplement as Figs. S5–S7. Moreover, for a combined set of 31 646 designated heavy rainfalls, histograms of rainfall depth, duration, and mean intensities were prepared, and relevant probability distributions were fitted: 2-parametric exponential, gamma, and gev. The histograms with fitted probability distributions are presented in supplementary information—Fig. S8. Except that the variability of parameters of fitted probability distributions within a hundred analysed stations is presented in supplement as Fig. S9. The analysis indicates substantial variability in the distribution parameters fitted to data from 100 meteorological stations analysed in Poland. The box plots illustrate the dispersion of parameter values for different distributions, suggesting differences in climatic conditions among various regions of the country. Moreover, the identification of outliers underscores potential anomalies in the data that could be significant for further climatological analysis.

The investigation of heavy rainfalls also covered the analysis of the frequency of their occurrence in particular stations, as well as mean total rainfall depths and mean total durations. Pursuant to the limitations of the base of the PANDa project, the analysis was narrowed down to the summer hydrological half-year (from 1 May to 31 October). In this period, a total of 28 457 heavy rainfalls occurred the statistics of which are presented in Table S2 (Supplementary information). Table S2 which shows PANDa project stations' statistics of the designated set of heavy rainfalls of the summer half-year is presented in supplement. According to the data in the table, the mean frequency of occurrence of heavy rainfalls in the summer half-year is 9.5 heavy rainfall events per year, and its highest value of 22.5 heavy rainfall events per year was recorded for Hala Gąsienicowa station located in Tatra Mountains (1523 m a.s.l.). The lowest value of 5.7 heavy rainfall events per year was captured at Poznan station (88 m a.s.l.). The determined frequencies are in accordance with expectations and results of previously published research from the territory of Poland. For example, Licznar et al. (2011) designated 250 heavy rainfalls from a set of digitised precipitation records from pluviographs from 38 years from Wrocław (south-west Poland) using analogical criteria. They determined their frequency of occurrence at a level of 6.6 times per year. For comparison

in Warsaw, the capital of Poland, in a network of 25 electronic weight rain gauges recording precipitation all year round, a total of 669 heavy rainfalls were designated by Licznar and Szelag (2014), which was equivalent to a frequency of occurrence of heavy rainfalls equal to 12.3 events per year.

The frequencies of occurrence of heavy rainfalls are evidently higher in the belts of mountain and coastal stations. Analogically, the longest mean annual durations of rainfalls of the summer half-year and mean annual depths of heavy rainfalls of the summer half-year are recorded for mountain stations. The longest mean durations of heavy rainfalls and their highest total depths of 260.2 h and 667.2 mm, respectively, were again observed for the highest located rain gauge on Hala Gąsienicowa. For comparison, mean values of these parameters in the set of 100 analysed stations are 85.4 h and 191.4 mm, respectively.

Hyetographs of heavy rainfalls and their classification

For all hundred stations, their cumulative, dimensionless (normalised) hyetographs were developed for all designated heavy rainfalls. At the next stage of the study, by means of the methods of hierarchical agglomeration, dendrograms of similarity of temporal courses of rainfalls were prepared in the analysed sets of particular rain gauges. Prior more advanced clustering studies, particularly specific, most probably improperly recorded precipitation patterns, like presented in Fig. S2, were removed (in analogical way like in the case of research from Kraków, Mikołajewski et al. 2022). The necessity of removal of extreme outliers among hyetographs occurred only for 29 heavy rainfalls recorded in 11 out of 100 analysed stations, constituting less than 0.09% of the entire base of heavy rainfalls.

Based on the graph analysis, the optimum and maximum number of clusters k was determined using WSS and CHIndex values. The accuracy of the chosen number of clusters and the hyetograph classification was verified through bootstrapping. If any cluster's Jaccard Index was too low, the initial number of clusters k was reduced, and bootstrapping was repeated. Consequently, as detailed in Table S1, the final cluster numbers were set as $k = 3$, $k = 4$, and $k = 5$ for 37, 58, and 5 rain gauges, respectively. In all clusters, the Jaccard Index values were maintained above 0.6, confirming the robustness of the clustering.

Averaged cumulative dimensionless hyetographs of heavy rainfalls were determined for the designated clusters (Fig. 4). The variability of the resulting courses of model hyetographs in subsets of 37, 58, and 5 stations for which the optimum cluster number was $k = 3$, $k = 4$, and $k = 5$,

respectively, is presented on the graphs in Fig. 4. Moreover, frequency of occurrence of heavy rainfalls with a distribution approximate to the determined model hyetographs was calculated for each station. The variability of per cent shares of heavy rainfalls classified to particular clusters in subsets of 37, 58, and 5 stations for which the optimum cluster number was equal to $k = 3$, $k = 4$, and $k = 5$, respectively, is presented in box plots in supplement as Figs. S10–S12. More detailed analysis of Fig. S11 shows that in the case of stations with a cluster number of $k = 4$, heavy rainfalls with hyetographs classified to clusters No. 3 and 2 were recorded the most often (average of 37% and 31%, respectively). Heavy rainfalls with hyetographs with highly variable rainfall intensity values, corresponding with patterns in clusters 1 and 4, were recorded considerably more seldom (on average 15% and 17%, respectively). The designated standard hyetographs on the aggregate chart (Fig. 4d) evenly cover its surface, indicating continuity between the various types of rainfall distributions. The arrangement of hyetographs on the aggregate chart is symmetrical (Fig. 4d). The most distinct (located at the extremes) are the hyetographs for the cluster with the greatest number of types (5), followed by those for clusters with fewer types. Clusters 3.2 and 5.3 are practically identical.

Analogically as in the case of research in the Kraków polygon (Mikołajewski et al. 2022), also research regarding relations of large-scale forcings in the form of, e.g. depth, duration, and mean intensity of rainfall with particular types of local model hyetographs was undertaken. Results of that research are presented in Figs. S13–S15 shown in supplementary information, including diagrams of probability distribution density fitted to sets of values of depth, duration, and mean intensity of heavy rainfalls classified to subsequent clusters in the case of respective subsets: 37, 58, 5 of the analysed rain gauges for which the optimum cluster number was equal to $k = 3$, $k = 4$, and $k = 5$, respectively.

Distributions of rainfall depths and durations could be modelled by means of 2-parameter exponential distribution and gamma distribution respectively, whereas distributions of values of mean intensities of heavy rainfalls in particular clusters could be fitted with the application of a GEV distribution. In the case of each subset of stations, heavy rainfalls classified to clusters No. 1 due to the shapes of their hyetographs are usually characterised by the highest intensities and shortest durations. This is fully confirmed by data presented in Table 1 regarding mean values of depths, durations, and mean intensities of rainfalls classified to particular clusters. For example, values of mean rainfall intensity and duration in cluster No. 1 in a subset of 58 stations with determined cluster number $k = 4$ were $0.092 \text{ mm min}^{-1}$ and 356 min, respectively. For

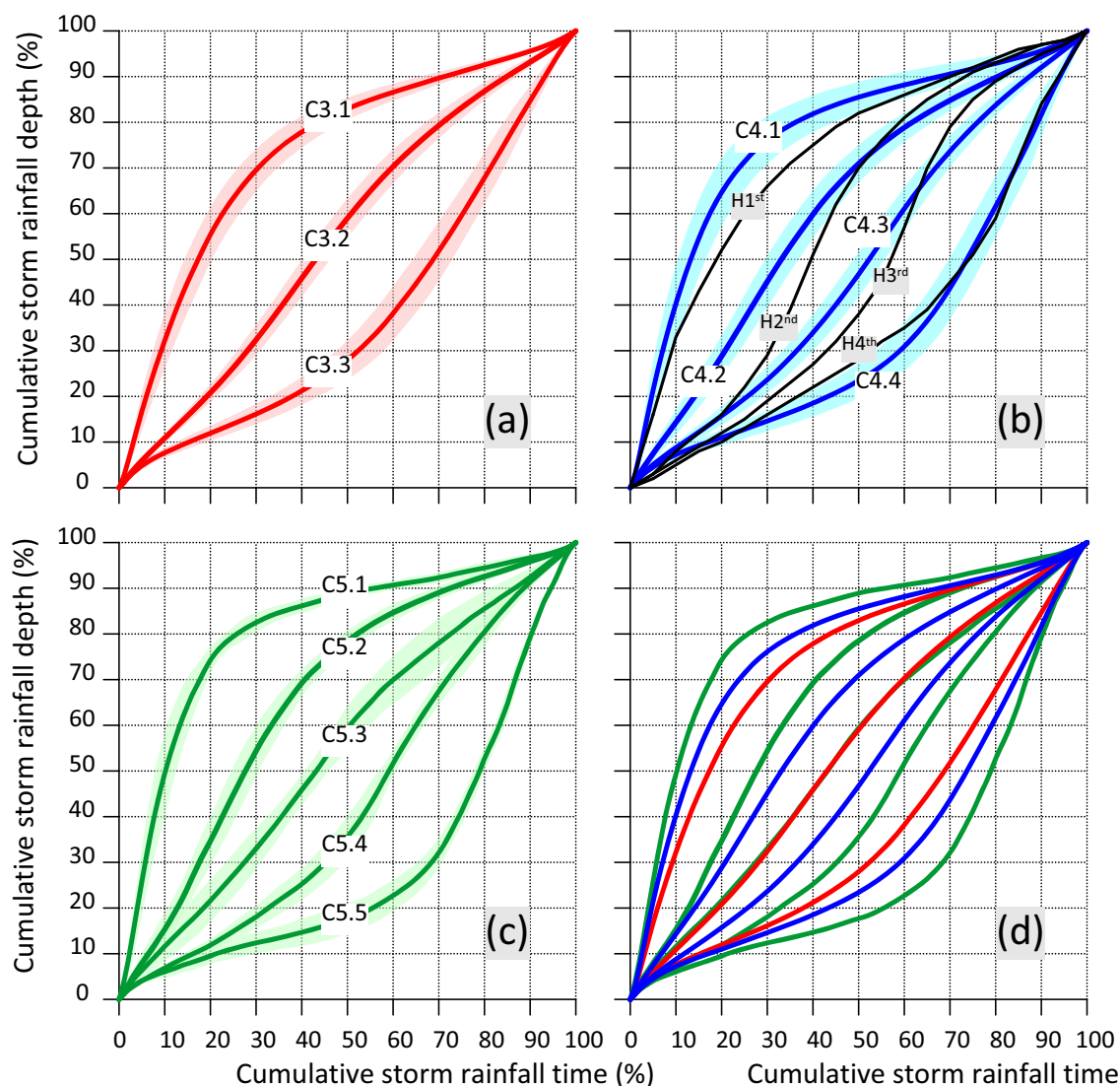


Fig. 4 Diagram **a** shows averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for three clusters identified through k-means clustering using a 37-gauge subset in Poland (optimum cluster number: 3). Diagram **b** displays averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for four clusters identified using a 58-gauge subset in Poland (optimum cluster number: 4), including a comparison with Huff's Median Time Distributions of Heavy Storm Rainfall at a Point (1990). Diagram **c** presents averaged dimensionless cumulative rainfall hyetographs for five clusters identified using a 5-gauge subset in Poland (optimum cluster number: 5). The mean values for each cluster are represented by lines on a semi-transparent background of standard deviation ribbons. Diagram **d** contains a summary of averaged cumulative precipitation hyetographs for all three subsets of gauge sites

comparison, mean intensities and durations of rainfalls in clusters No. 2, 3, and 4 were 0.072, 0.059, and 0.054 mm min⁻¹ and 587, 672, and 562 min, respectively. Similar observations can be done for the two remaining subsets of stations. They are analogical to conclusions from research by Huff (1967, 1990) in the USA and Mikołajewski et al. (2022) in Kraków. Huff (1990) postulated the application of first-quartile hyetographs for time scales of approximately 6 h and shorter in designing and modelling drainage systems, and second-quartile heavy hyetographs for time scales from approximately 6–12 h.

Regionalization of sets of model hyetographs and spatial variability of heavy rainfalls

A broader analysis of the spatial variability of the heavy rainfall regime in Poland will be included in a separate study. This subchapter presents selected and simplified results, important in the context of hyetographs modelling.

Climatic conditions in the territory of Poland, including precipitation regime, are strongly dependent on two meso-scale factors. One of them is location between the “peninsula” of West Europe and the core of the Eurasian “continent” where there is frequent and active air flow from

Table 1 Mean values of total depths, durations, and intensities of heavy rainfalls classified to particular clusters

Cluster	Mean rainfall depth, mm	Mean rainfall duration, min	Mean rainfall intensity, mm min ⁻¹	Number of rainfalls	% of all rainfalls
37-gauge subset with cluster number $k = 3$					
Cluster No. 1	19.00	405.8	0.0896	2883	9
Cluster No. 2	20.28	651.7	0.0626	5720	18
Cluster No. 3	19.07	588.5	0.0572	3140	10
58-gauge subset with cluster number $k = 4$					
Cluster No. 1	18.90	355.7	0.0919	2784	9
Cluster No. 2	20.14	587.0	0.0724	5729	18
Cluster No. 3	20.92	672.0	0.0587	6743	21
Cluster No. 4	18.65	562.2	0.0541	3032	10
5-gauge subset with cluster number $k = 5$					
Cluster No. 1	18.00	348.0	0.0807	168	1
Cluster No. 2	18.79	576.4	0.0746	409	1
Cluster No. 3	19.49	769.4	0.0504	518	2
Cluster No. 4	20.07	798.8	0.0459	409	1
Cluster No. 5	17.65	557.4	0.0456	168	1

the west and relatively fast movement of successive pressure systems. Climate in the territory of Poland therefore shows collision of moist air masses from the Atlantic with drier continental masses. This contributes to high year-to-year variability of the spatial and temporal distribution of precipitation, including proportions between solid and liquid precipitation. On the other hand, it contributes to a generally longitudinal course of multiannual means of many climatic parameters. The other factor affecting the characteristics of Polish climate at the mesoscale is the character and genesis of the land relief. The majority, i.e. more than 75% of the territory of Poland, is occupied by low (0–200 m a.s.l.) and relatively flat plain areas, primarily covered with relatively uniform glacial deposits, and mostly used for agriculture. They constitute the northern and central part of the country. In the south, a bipartite zone of uplands, basins, and medium-height mountains occurs, dissected by the depression of the Moravian Gate. Due to the size of Poland and the aforementioned factors, its climatic variability is low, and regional boundaries are vague. In addition to the evident boundary between the mountains with uplands and lowlands, most climatologists also designate a narrow belt of coastal lowlands with a width of several tens of kilometres at the Baltic coast, and a zone of lakelands of north Poland with a high share of postglacial lakes and forests. An example of such regionalisation is the classic study by Romer (1949) (Fig. 5).

Statistical tests (Block [26] in Fig. 1) performed for both means (Kruskal–Wallis) and variances (Bartlett) have shown that belonging to clusters with 3, 4, and 5 model hyetographs does not significantly differentiate, in Poland, both due to the average annual frequency of heavy rainfall,

as well as their duration and depth (Supplement information, Fig. S16). Also, the geographic distribution of sites belonging to individual clusters (Fig. 6) does not show any relationship with the analysed, annual average, values of parameters that characterise heavy storms. These variables are strongly correlated with each other. For this reason, their spatial distribution is very similar (Fig. 6 and Block [25] in Fig. 1).

It reflects the belt, latitudinal layout of the main relief zones of Poland (the Baltic coast, lake districts created during the last glaciation, a belt of great old glacial valleys and lowlands, and the bidivided—Sudetes and Carpathians—zone of highlands and mountains) and the dominant influence of the north-western circulation from the Atlantic, the North Sea, and the Baltic Sea (Olechnowicz-Bobrowska 1970; Paszyński and Niedźwiedz, 1999; Kirschenstein and Baranowski 2005). Their arrangement is very similar to the total precipitation sums from the summer half-year (May–October) or summer (June–August), regardless of the analysed multi-year period (Olechnowicz-Bobrowska 1970; Paszyński and Niedźwiedz, 1999; Kirschenstein and Baranowski 2005; Lorenc 2005; Łupikasza and Małarzewski 2021) and despite the existence of long-term trends of some characteristics of extreme precipitation (Łupikasza 2010; Pińskwar et al. 2019). This proves the existence in Poland of relatively stable, regional relations within the precipitation field.

The map in Fig. 5 (Block [20] in Fig. 1) visualises lack of evident relations between climatic variability in the territory of Poland and distribution of sites classified to particular clusters due to the number of designated model

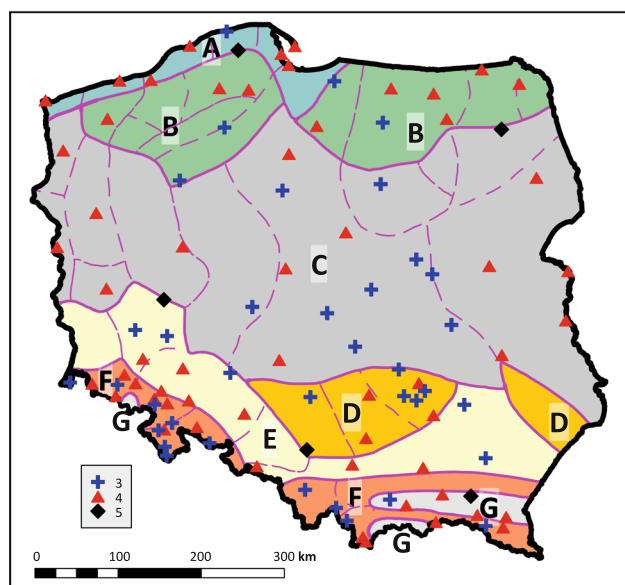


Fig. 5 Determined cluster numbers of model hyetographs on a grid of 100 analysed rain gauges in Poland on the background of climatic regions of Poland (Romer 1949). Explanations: A—Baltic climates, B—lakeland climates, C—climates of the “Land of Great Valleys”, D—climates of central uplands, E—climates of submontane lowlands and basins, F—mountain and submontane climates, G—mountain basin climate. Dotted lines are boundaries of lower order regional units

hyetographs. None of the first level regions is uniform in these terms—each of them includes at least two clusters. Second level regions usually cover an insufficient number of measurement sites (in some cases none) for recognising the uniformity encountered in some cases as credible. However, when approach at the supraregional scale with excluded single outlier locations, the obtained results show certain geographic patterns in their distribution. In the north, in the zone covering coastal lowlands and the northern part of the lakelands (region A and part of region B), a cluster with four model hyetographs is dominant. The situation is similar in the eastern and western part of the belt of “Great Valleys” (region C). In the central part of the belt of “Great Valleys” and the neighbouring southern fragments of the region of lakelands (region B) and uplands (region D), the dominant locations are from a cluster composed of three model hyetographs. Over the remaining area of the “mosaic” of uplands, mountains, and mountain basins (regions D, E, F, and G), sites classified to various clusters neighbour on each other over very small distances. The characteristic location of points classified to a cluster with five model hyetographs is very interesting (Fig. 5). They are located directly at boundaries between first order regions (A/B, B/C, C/E, D/E, and F/G). It is difficult to presume it is incidental.

The distribution of points classified to particular clusters was generalised for the entire territory of Poland by means

of Indicator Kriging for qualitative data (Goovaerts 1997; Remy et al. 2009). The method assumes that the applied classification is complete, and the association with classes (groups, clusters) is mutually exclusive (total probability of membership in all classes is 1). Interesting results were obtained in the determination of the surface area occupied by the value of probability of membership in particular “clusters” higher than 0.5. The data considerably differ from the proportions of measurement points classified to them. For a cluster containing three model hyetographs it is only 11.41% (previously 37% of points), for a cluster composed of four hyetographs it is as much as 78.87% (previously 58% points), and for a cluster composed of 5 hyetographs it is only 0.75% (previously 5%). The remaining 8.97% is an area where the probability of membership to any cluster is not higher than 0.5—i.e. the “uncertain” area.

Conclusions resulting from the analysis of the map presented in Fig. S17 in supplementary information are evident. Firstly, they suggest that locations where the optimum division resulted in five model hyetographs are anomalies. Their occurrence is probably related to very local orographic conditions or land cover/use, or specific atmospheric pollutants affecting the stability of the atmosphere and conditions of precipitation development. Secondly, to a certain degree also areas with the occurrence of three model hyetographs can be designated, particularly in north Poland. Three “regions” are clearly marked, however, with a greater range, namely the Kłodzko Basin, western part of the Carpathians (West Beskids), and the belt extending from Rzeszów through Kielce, Łódź, then turning east towards Warsaw. The occurrence of the third, largest zone can be related to the location of the edge of the central Polish uplands and depressions of the Sandomierz Basin and Vistula River valley, although this explanation is currently a hypothesis requiring further verification. Thirdly, it may be suggested that model with four hyetographs is “typical” of the territory of Poland, and that division should be recognised as “default:” in practical applications.

Changes in the heavy rainfall regime over time

The analysed 30-year period, 1986–2015, is a time of acceleration of climate change (Gulev et al. 2021; Forster et al. 2023). During its duration, previous global air temperature records were exceeded several times (Alexander et al. 2006; Papalexidou et al. 2018; Seneviratne et al. 2021). Precipitation extremes were also observed at that time, although they were continental or regional, rather than global (Alexander et al. 2006; Asadieh and Krakauer 2015; Seneviratne et al. 2021). Therefore, it would be reasonable to check whether there are any time trends in the analysed

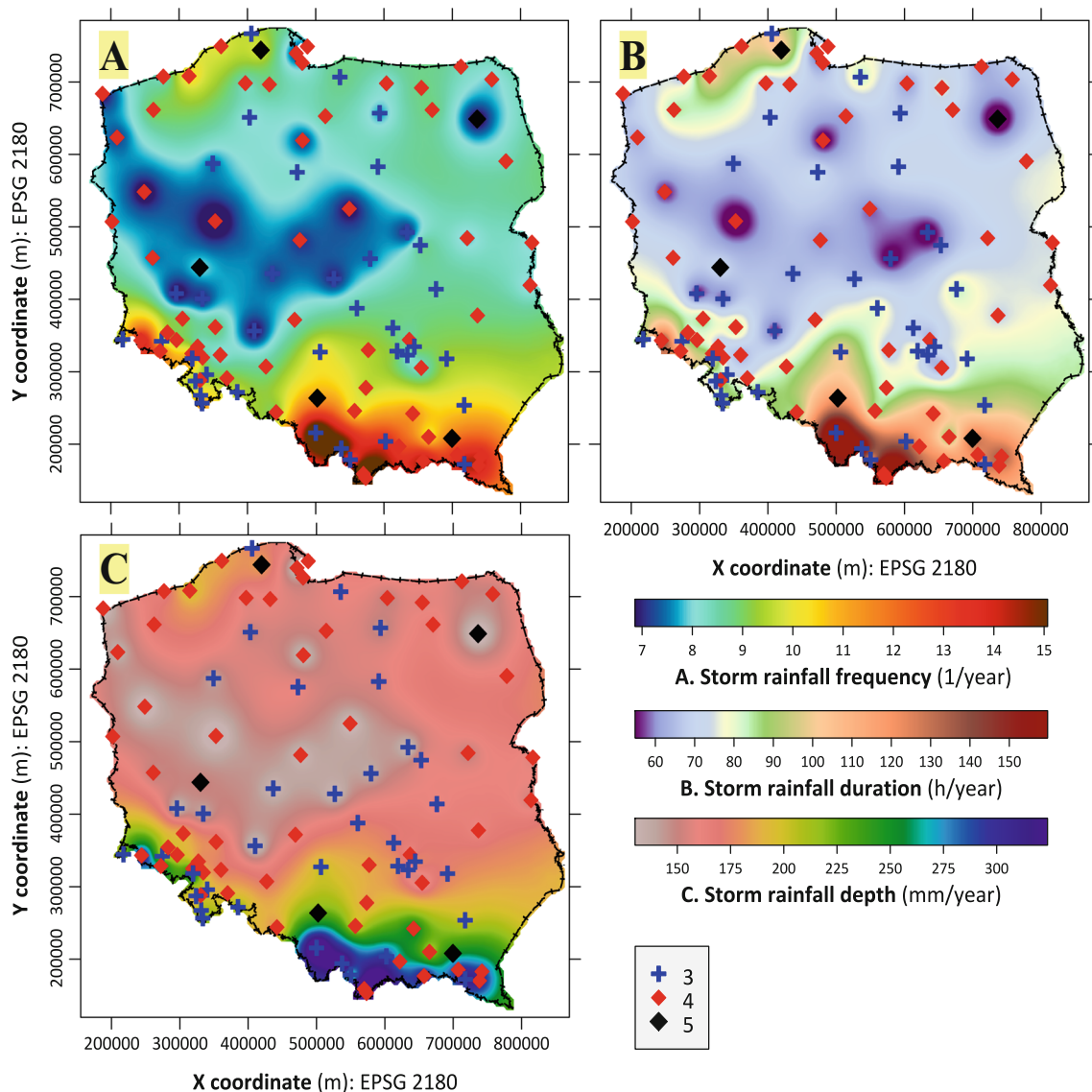


Fig. 6 Interpolated spatial distributions of average long-term characteristics of heavy precipitation in the summer half-year. Explanations: **A** frequency of occurrence of heavy rainfalls (1/year), **B** mean duration of heavy rainfalls (h/year), **C** mean depth (total) of heavy rainfalls (mm/year). For better contrast, the colour scale covers a range from 1 to 99% of the variable distribution. The maps also include markings of the locations of sites for which 3, 4, or 5 model hyetographs of heavy rainfall have been established

set of heavy rainfall and whether they could have influenced the results of the classification of their time courses (hyetograms). So far, researchers studying changes in the rainfall regime in Poland (Łupikasza 2010; Pińskwar et al. 2019; Łupikasza and Małarzewski 2021) have not had such comprehensive data on the characteristics of heavy rainfall as used in this study. Since the issue mentioned here is a side topic in this study, the analysis of time variability was carried out in the most simplified way. A more thorough assessment will be carried out in a separate study.

The simplification involved: (1) omitting local and regional variability by aggregating all data from Poland, and (2) assessing temporal variability over three decades

(1986–1995, 1996–2005, 2006–2015) and six pentads (1986–1990, 1991–1995, 1996–2000, 2001–2005, 2006–2010, 2011–2015). The first stage of the analysis utilised one-way ANOVA, followed by pairwise comparison tests when the ANOVA indicated a rejection of the null hypothesis (Block [24] in Fig. 1). The ANOVA results for the number of heavy rainfall events, their duration, depth, and intensity divided into decades showed very significant differences for all analysed parameters. The probability that they were accidental was negligible ($p < 0.00001$). The average annual number of torrential rainfall events recorded at the measuring station in the following decades was 8.0, 9.6, and 13.8, average duration: 478.3, 519.3, and 682.8 min, average

depth: 19.0, 20.3, and 20.0 mm, and average intensity: 0.072, 0.074, and 0.060 mm min⁻¹ (Fig. S18 in supplementary information). This shows that the number and duration of heavy rains increased over a decade, while their depth and intensity increased in the second decade, and either remained at the same level (depth) or decreased significantly (intensity) in the third decade. Pairwise comparison tests showed that while their decadal means differ significantly in the number of rainfall events and duration in each combination, in the case of their depth there is no significant difference between the second and third decades, and in the case of intensity—between the first and second decades. Since the numbers and variances of values in the compared groups differed significantly, Welch's F test and Kruskal–Wallis test were also calculated. The results obtained were fully consistent with those obtained from classic ANOVA.

Since the PANDa database, from which the set of heavy rains analysed in this study was selected, was created by combining registrations from classic analogue pluviographs and automatic tipping bucket rain gauges, it is possible that the observed differences in the rainfall regime in different periods are apparent and are in fact the result of a change in methodology. Until 1998, all measurement stations carried out measurements with analogue pluviographs, and after 2009—only with electronic ones. However, in most locations, the change of recorders took place between 2001 and 2005. If the replacement of measuring devices influenced the statistics of heavy rainfall parameters, the analysis of variance carried out for the pentad periods should show a significant difference between the first three pentads (1986–1990; 1991–1995 and 1996–2000), and the last two (2006–2010 and 2010–2015) with the pentad of 2001–2005 as a transitional one.

An ANOVA performed on the data divided into pentad subsets also showed very significant differences ($p < 0.00001$). The temporal relations, however, are more complicated than before (Fig. S19 in supplementary information). The average annual number of heavy rain events remained at a similar level in the first four pentads (8.5, 7.2, 9.0, and 8.8) and then increased dramatically (13.1 and 14.0). Their average duration in the first two pentads was almost identical (476.2 and 480.9 min). Later, there is a statistically significant, although small, increase: in 1996–2000 and 2001–2005 it was 514.7 and 524.1 min, respectively. In the last two pentads, the duration of heavy rainfall is also similar and significantly longer than before: 691.2 and 674.8 min. The average rainfall depth increases in the first three pentads (18.6, 19.5 and 20.3 mm), then remains at a similar level (20.1 and 20.2 mm) and finally decreases slightly (19.8 mm). The intensity of rain increases slightly at the beginning (0.070 and 0.074 mm min⁻¹), then remains at a similar level (0.073 and 0.075 mm min⁻¹), and finally decreases very significantly (0.060 and 0.060 mm min⁻¹). Pairwise

comparison tests showed significant differences between pentads 1–4 and 5 and 6 for the average number of cases. There are no significant differences within these two groups. With regard to the duration of rainfall, the situation is slightly more complex. Statistically significant differences were found, as before, between pentads 1–4 and 5 and 6, and pentad 2 differs from pentads 3 and 4. The rainfall depth recorded in pentad 1 shows very statistically significant differences in relation to all later periods. The difference between pentads 2 and 3 is borderline significant ($p = 0.03$). Other comparisons for this parameter did not show significant differences. The analysis of changes in rainfall intensity showed a previously existing pattern, namely significant differences between pentads in two periods: 1–4 and 5 and 6, with no significant differences within them. In the light of the results of pairwise comparison tests discussed above and the graph in Fig. S19 in supplementary information, we can basically reject the hypothesis that the change of recorders is the reason for the observed trends in the heavy rainfall regime. Pentad 4 (2001–2005), when changes were made to the instrumentation at most measurement stations, is not of a “transitional” nature at all. It is either very similar to the earlier period (number of cases, duration, and intensity) or the later period (depth).

The Chi-square test was used to assess whether the frequency of occurrence of the distinguished types of heavy rainfall time courses changed significantly during the analysed 30-year period (Block [19] in Fig. 1). As before, the entire dataset was divided into decades and pentads. The test was performed on the basis of a summary table, the columns of which represented periods (the entire dataset and decades or pentads), and the rows represented hyetograph types (3, 4, or 5 depending on the cluster). The frequencies of their occurrence in subsequent periods are recorded in individual cells of this table. The obtained results do not indicate the possibility of temporal changes in the frequency of the distinguished types of rainfall time courses. Only in one out of six tests significant differences were obtained ($p < 0.0001$). This was the case when the division into decades was analysed in a cluster of sites with three reference hyetographs. The analysis of the test components showed that the result was caused by a large overrepresentation of type three in the decade 2006–2015, with a simultaneous deficit in the years 1996–2005. This case should be considered random in the context of the remaining results.

DISCUSSION

Despite being conducted in Poland, a relatively compact area (322 575 km²) with a moderate Central European climate, the study found significant spatial variations in the frequency and characteristics of heavy rainfall events.

Using a dataset spanning 30 years from a network of 100 rain gauges, the study identified 31 646 heavy rainfall events, mostly (28 457 events) during the summer half-year. On average, there were 10.5 events per year, though excluding extreme values such as those at high mountain stations like Hala Gąsienicowa (22.5 events per year), local frequencies ranged widely from approximately 7 to 15 events annually. Similarly, average durations of heavy rainfall varied widely, from under 60 to around 160 h per year, as did annual depths, from under 150 to over 300 mm per year. Maps developed from this data depict clear patterns akin to longstanding knowledge of precipitation regimes in Poland, influenced by northwest circulation from the Atlantic, North Sea, and Baltic Sea. Annual sums of heavy rainfall generally correlate with total precipitation sums, contributing approximately 30% of annual precipitation at most stations. Comparable studies in Europe, such as those by Madsen et al. (2014), have also noted diverse durations and depths of extreme rainfalls, linked to regional climate patterns and geographic factors.

The analysis found that rainfall depths, durations, and mean intensities at stations could be modelled using the 2-parametric exponential distribution, gamma distribution, and generalised extreme value (GEV) distribution, respectively. Due to spatial variations in the parameters of heavy rainfall events, significant variability was observed in local distributions of rainfall depths, durations, and mean intensities. For instance, parameters for the 2-parametric exponential distribution of rainfall depth across 31 646 heavy rainfalls in Poland were $\lambda = 9.819$ and $\gamma = 10.00$, with λ ranging from 7 to 13. Similar variability was noted for gamma distributions of rainfall durations, ranging from below 1.4 to close to 2.0 for parameters a, and from slightly above 200 to around 500 for parameters b, after excluding outliers. Overall, these variations in parameters translated into wide ranges for local parameters of mean rainfall intensities (μ , σ , and k), which ranged from slightly above 0.02 to just under 0.04, from 0.016 to 0.025, and from slightly below 0.5 to above 0.8, respectively. For comparison, parameters for mean rainfall intensities across the dataset were $\mu = 0.0295$, $\sigma = 0.0209$, and $k = 0.6101$. These findings underscore the importance of considering local characteristics when analysing extreme hydrological events. Future studies will explore whether parameters exhibit spatial autocorrelation among the 100 stations, potentially enabling spatial estimation for Poland as a whole.

The analysis of heavy rainfall events using high-temporal-resolution data from 1986 to 2015 did not find precipitation maxima exceeding previously established probable maximum precipitation (PMP) values for Poland by Banasik (2005, 2009), based on a limited dataset from major floods in 1997–2002. PMP values from this formula are

approximately 3.5 times lower than those from the globally proposed PMP relationship by Paulhus (1965), reflecting Central Europe's precipitation realities under a moderate climate dominated by lowlands. Relative values of maximum precipitation normalised by annual normal precipitation (P_D/P_y) required a 20% correction based on rainfall durations (formulas (8) and (7)), due to broader database analysis and improved temporal resolution. The relationship between PMP and (P_D/P_y) from the 31 646 identified heavy rainfall events was lower than relationships from 100 stations analysed under the PANDa project, which focussed on peak maxima. This difference highlights varying rainfall intensities over time during heavy rainfall events.

The literature underscores the importance of capturing rainfall dynamics, specifically momentary intensity variability during events, when studying extreme hydrological phenomena, especially in modelling urban catchments prone to flooding or stormwater retention reservoirs. A significant part of the research focussed on identifying standard hyetographs across 100 locations and regionalizing results to correlate hyetograph types with rainfall event genesis. These are among the first comprehensive studies of this scale in Central Europe, employing modern cluster analysis and geostatistical methods to analyse data from a network of rain gauges, akin to methods used by Castanho et al. (2019) for classifying rainfall events globally.

Based on analysis of parameters like the wss parameter and CHIndex index, optimal hyetograph clusters were determined: $k = 3$, $k = 4$, and $k = 5$ for 37, 58, and 5 rain gauges analysed, respectively. There were no clear correlations found between Poland's climatic diversity and the distribution of classified sites due to varied hyetograph models within individual clusters. The only consistency was stations with five hyetograph classes located at the borders of primary climatic regions. The spatial distribution of clusters with 3, 4, and 5 standard hyetographs did not exhibit clear geographic patterns (Figs. 5, 6), contrary to established knowledge of precipitation patterns (Fig. 6) in Poland. This discrepancy likely stems from the normalisation of genetically different rainfall types with similar temporal patterns in Central European conditions.

Future studies should consider reversing the approach by first dividing geographically or statistically, then classifying normalised hyetographs within those groups. Preliminary cluster analysis of frequency, duration, and depth of precipitation from 100 locations identified three or four distinct groups. Additionally, a two-dimensional frequency histogram for duration and intensity showed that about 90% of rainfall analysed lasted up to 1400 min with intensities up to 40 mm, forming a distinct peak in the dataset.

In-depth spatial analysis of the variability of the number of standard hyetographs using Indicator Kriging suggests

that four model hyetographs are the most typical for Poland, and this division should be considered the default in practical applications. Generally, heavy rainfalls with hyetographs most similar to precipitation with uniform intensity were usually recorded for all stations. Heavy rainfalls with hyetographs exhibiting more variable instantaneous rainfall intensity values were recorded approximately 50% less frequently than hyetographs with temporally smoothed intensities. For most frequent stations with a cluster number $k = 4$, heavy rainfalls with hyetographs ascribed to clusters 3 and 2 accounted for an average of 37% and 31%, respectively, of the total rainfall sets. For the same stations, heavy rainfalls with hyetographs classified to models in clusters 1 and 4, with more variable rainfall intensities, were observed considerably less frequently (accounting for an average of 15% and 17%, respectively, of the total rainfall sets). The obtained standard hyetograph patterns at stations divided into four patterns exhibit a clear similarity to the results of earlier studies by Huff (1990) from the USA area. In this regard, the model hyetographs of cluster 1 constitute a specific analogy towards first-quartile heavy hyetographs, postulated by Huff (1990) in designing and modelling drainage systems for time scales of approximately 6 h and shorter. According to the results, events classified into cluster 1 in Central European conditions had significantly shorter durations, usually from 30 to 100 min, and higher average intensities compared to events classified into other clusters.

In the Anthropocene era and amidst climate change, it is obvious that heavy rainfall events and their characteristics cannot be treated as stationary variables. In this context, the results obtained cannot be compared with previous reference statistics since, to the authors' best knowledge, similar analyses on this spatial and temporal scale and using high-resolution rainfall data have not been conducted for Poland and Central Europe. From this perspective, the present study is intended to serve as a reference for future analyses conducted on newly collected datasets of analogous temporal and spatial resolution of rainfall, both in terms of obtained statistics and the potential application of processing methods for registration datasets. The potential of such an approach is evidenced by the results of sectional, simplified analyses of trends in basic characteristics of heavy rainfall events over decades and pentads in the analysed 30-year period from 1986 to 2015. Their main conclusion is the clear and statistically significant changes, manifested especially by the increase in the number and duration of heavy rains in successive decades. However, these clear trends do not align with trends regarding the depths and mean intensities of heavy rainfall events. It is evident that the depth and intensity increased in the second decade, and either remained at the same level (depth) or decreased significantly (intensity) in the third decade. It

must be emphasised, however, that these results have very limited reliability, influenced by the too short period of available high-resolution rainfall data and somewhat resulting from their simplified methodology. It can also be presumed that the observed trends, in the form of reductions in the heights and intensities of heavy rainfall events, may be the result of the non-homogeneity of the dataset itself. It should be remembered that around and after the year 2000, the process of conversion from pluviographs to trough automatic rain gauges began, the inherent and confirmed feature of which in many studies is a tendency to underestimate the intensity of rainfall, especially those classified as heavy. Regardless, the obtained results demonstrate the need for systematic, albeit cyclical, monitoring of basic characteristics of heavy rainfall events. It can be assumed that with the increase in new datasets, such comparisons will also be possible regarding changes in developed sets of standard hyetographs for the first time.

CONCLUSION

It is essential to emphasise the practical, applicative aspect of the conducted research. In engineering issues such as hydrodynamic modelling of drainage systems and when seeking future rainfall scenarios, computer models should use local information about the heights of heavy rainfall combined with equally precise local knowledge of potential distributions of this rainfall over the assumed duration of its occurrence. Information about the heights of heavy rainfall is already readily available for engineers for many areas in the form of rainfall atlases such as NOAA Atlas 14 in the USA,² KOSTRA in Germany,³ or PANDa in Poland.⁴ Reference and global assistance can also be provided to engineers by dependencies such as *Py/Pd* or PMP. In the specific case of Poland, statistical distributions of heights and durations of heavy rainfall can also be developed in research. In a broader context, such data are also possible to obtain from global climate model simulations for future climate change scenarios, albeit with the obvious limitations of their resolution and the possibility of further downscaling. Access to information about maximum rainfall heights can be considered common practice, and the practice of using heights resulting from local statistical models is firmly established in engineers' awareness. The need to operate with truly local and potentially possible scenarios of the distribution of maximum rainfall heights appears much less pronounced in engineering

² <https://hdsc.nws.noaa.gov/pfds/>.

³ https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html.

⁴ <https://atlaspanda.pl>.

consciousness. This lack results from the frequent absence, in many areas of the world, of access to analyses of standard hyetographs, postulated by Huff (1967). In this perspective, the set of standard hyetographs obtained eliminates these gaps for Poland and presumably neighbouring areas of Central Europe. The compiled results indicate the necessity of operating with complete sets of hyetographs as alternative scenarios of rainfall occurrence and variation in engineering solutions based on this, including perhaps considering the frequency of occurrence of individual rainfall scenarios. Operating with a set of 3, 4, or even 5 hyetographs with known occurrence frequencies in the local dataset of heavy rainfall events is a pragmatic approach, not requiring engineers to perform a series of time-consuming simulations but leaving at least a partial margin for probabilistic interpretation of the obtained results. Therefore, the methodology practically tested on a large dataset of 30-year registrations from 100 rain gauges should be applied in other areas where analyses of standard hyetographs in high temporal resolution have not yet been conducted.

Acknowledgements This work was carried out as part of the fourth edition of the programme implementation doctorate conducted by the Ministry of Science and Higher Education, Republic of Poland, and within the project entitled “WaterFolder Connect—an integrated platform for design and modelling of drainage systems—POIR.01.01.01-00-0119/21”; Sub-measure: Industrial research and development conducted by enterprises.

Author contributions We declare that all authors contributed to this paper’s conception and design. The methodology, data collection, and analyses were performed by Karol Mikołajewski, Alfred Stach and Zbigniew W. Kundzewicz. Karol Mikołajewski and Alfred Stach were responsible for writing the manuscript. Marek Ruman and Klaudia Kosek were responsible for preparing the final edition of the manuscript. Paweł Licznar was responsible for the co-ordination of research and the scientific concept of the manuscript. Finally, each author read and approved the final paper.

Funding This work was supported by the National Centre for Research and Development under the Smart Growth Operational Programme 2014–2020, Priority axis: Support for R&D in enterprises; Measure: R&D projects in enterprises.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no conflict of interest. The funding institution had no role in the design of the study, in the samples collection, analyses, interpretation of data, in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not

included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

REFERENCES

- Alexander, L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.C. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research* 111: D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>.
- Asadieh, B., and N.Y. Krakauer. 2015. Global trends in extreme precipitation: Climate models versus observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 877–891. <https://doi.org/10.5194/hess-19-877-2015>.
- Banasik, K., ed. 2005. *Wydatek i charakterystyka rumowiska unoszonego w wezbraniach opadowychz obszarów rolniczych [Suspended sediment yield in flash floods from agricultural areas]*. Research report. Warsaw, Poland: Warsaw Agricultural University (in Polish).
- Banasik, K., ed. 2009. *Modelowanie katastrofalnych wezbrań opadowych w małych zlewniach rzecznych [Modelling of the catastrophic pluvial floods in small river basins]*. Research report. Warsaw, Poland: Warsaw University of Life Sciences – SGGW (in Polish).
- Banasik, K., and J. Ostrowski. 2010. Estimation of extreme flood flows in a small Carpathian river. In *Cultural landscapes of river valleys*, ed. A. Radecki-Pawlik and J. Hernik, 221–227. Krakowie: Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego.
- Burszta-Adamiak, E., P. Licznar, and J. Zaleski. 2019. Criteria for identifying maximum rainfalls determined by the peaks-over-threshold (POT) method under the Polish Atlas of Rainfalls Intensities (PANDa) project. *Meteorology, Hydrology and Water Management* 7: 3–13. <https://doi.org/10.26491/mhwm/93595>.
- Castanho, R.A., J.M.N. Gómez, and J. Kurowska-Pysz. 2019. Assessing land use changes in Polish territories: Patterns, directions and socioeconomic impacts on territorial management. *Sustainability* 11: 1354. <https://doi.org/10.3390/su11051354>.
- Deidda, R. 2000. Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2000WR900038>.
- Forster, P.M., C.J. Smith, T. Walsh, W.F. Lamb, R. Lamboll, M. Hauser, A. Ribes, D. Rosen, et al. 2023. Indicators of Global Climate Change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data* 15: 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.
- Gargula, K., P. Gibas, M. Janiszek, A. Majorek, K. Rysz, and W. Zajac. 2020. *Analysis of changes and forecast of residential development growth in Poland until 2020: Collective work, 63rd edition of studies and works in geography Piotr Gibas (economy)*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe. Bogucki Scientific Publisher, 2017.
- Gires, A., C. Onof, C. Maksimovic, D. Schertzer, I. Tchiguirinskaia, and N. Simoes. 2012. Quantifying the impact of small-scale unmeasured rainfall variability on urban hydrology through multifractal downscaling: A case study. *Journal of Hydrology* 442–443: 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.005>.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*, 483. New York: Oxford University Press.
- Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, et al. 2021. Changing state of

- the climate system. In *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, ed. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, 287–422. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>.
- Huff, F.A. 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research* 3: 1007–1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>.
- Huff, F.A., 1990. Time distributions of heavy rainstorms in Illinois; circular. Illinois State Water Survey 173: Champaign, IL. <http://hdl.handle.net/2142/94492>.
- Kirschenstein, M., and D. Baranowski. 2005. Precipitation totals in Poland for the 1951–1995 period. *Physiographic Research on Western Poland Series A - Physical Geography* 56: 55–72.
- Kundzewicz, Z.W., and P. Licznar. 2021. Climate change adjustments in engineering design standards: European perspective. *Water Policy* 23: 85–105. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.330>.
- Kundzewicz, Z.W., and I. Pińskwar. 2022. Are pluvial and fluvial floods on the rise? *Water* 14: 2612. <https://doi.org/10.3390/w14172612>.
- Licznar, P., E. Burszta-Adamiak, J. Łomotowski, and J. Stańczyk. 2017. Modern proposal of methodology for retrieval of characteristic synthetic rainfall hyetographs. *E3S Web of Conferences* 22: 00104. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200104>.
- Licznar, P., J. Łomotowski, and D.E. Rupp. 2011. Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. *Atmospheric Research* 99: 563–578. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.014>.
- Licznar, P., and K. Mikołajewski. 2021. Rozszerzona metodyka analizy skupień do identyfikacji hietogramów wzorcowych opadów. Demonstracja opracowanej metodyki w skali dużego miejskiego pola opadowego. [Extended methodology of cluster analysis for identifying standard precipitation hyetographs. Demonstration of the developed methodology on the scale of a large urban rainfall field]. Internal report No. 01/2021, Retencjapl (in Polish).
- Licznar, P., K. Siekanowicz, A. Stach, and J. Zaleski. 2020. Precipitation atlases. In *Methodology for the development of the Polish Atlas of Rainfall Intensities (PANDa)*, ed. P. Licznar and J. Zaleski, 99–137. Warsaw: Warsaw Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute.
- Licznar, P., and B. Szlag. 2014. Temporal variability analysis of atmospheric precipitation in Warsaw (Poland). *Ochrona Środowiska* 36: 23–28.
- Lorenc, H., ed. 2005. *Climate atlas of Poland*, 1–116. Warsaw: Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute.
- Lupikasza, E. 2010. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951–2006. *International Journal of Climatology* 30: 991–1007. <https://doi.org/10.1002/joc.1950>.
- Łupikasza, E., and Ł. Małarzewski. 2021. Precipitation change. In *Climate change in Poland*, ed. M. Falarz, 349–373. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8_13.
- Madsen, H., D. Lawrence, M. Lang, M. Martinkova, and T.R. Kjeldsen. 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology* 519: 3634–3650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>.
- Markiewicz, I. 2021. Depth–duration–frequency relationship model of extreme precipitation in flood risk assessment in the Upper Vistula Basin. *Water* 13: 3439. <https://doi.org/10.3390/w13233439>.
- Mikołajewski, K., M. Ruman, K. Kosek, M. Glixelli, P. Dżimińska, P. Ziętara, and P. Licznar. 2022. Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale. *Science of the Total Environment* 829: 154588. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154588>.
- Olechnowicz-Bobrowska, B. 1970. *Frequency of rainy days in Poland*. Institute of Geography, Polish Academy of Sciences, Geographical Studies no. 86, Scientific Publisher, Warszawa, pp. 1–71.
- Ozga-Zielińska, M., and B. Ozga-Zieliński. 2003. Flood potential of rivers as a measure of the threat to hydrotechnical objects and the determination of flood protection zones. *Water Management* 1: 10–17.
- Pall, P., T. Aina, D.A. Stone, P.A. Stott, T. Nozawa, A.G.J. Hilberts, D. Lohmann, and M.R. Allen. 2011. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature* 470 (7334): 382–385. <https://doi.org/10.1038/nature09762>.
- Papalexioiu, S.M., A. AghaKouchak, K.E. Trenberth, and E. Foufoula-Georgiou. 2018. Global, regional, and megacity trends in the highest temperature of the year: Diagnostics and evidence for accelerating trends. *Earth's Future*. <https://doi.org/10.1002/2017EF000709>.
- Paszyński, J., and T. Niedźwiedź. 1999. Klimat. In *Geography of Poland*, ed. L. Starkel, 288–343. Warsaw: Natural Environment, PWN Scientific Publisher.
- Paulhus, J.L.H. 1965. Indian Ocean and Taiwan rainfalls set new records. *Monthly Weather Review* 93 (May): 331.
- Pińskwar, I. 2022. Complex changes of extreme precipitation in the warming climate of Poland. *International Journal of Climatology* 42 (2): 817–833. <https://doi.org/10.1002/joc.7274>.
- Pińskwar, I., A. Choryński, D. Graczyk, and Z. Kundzewicz. 2019. Observed changes in extreme precipitation in Poland: 1991–2015 versus 1961–1990. *Theoretical and Applied Climatology* 135: 773–787. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2372-1>.
- Remy, N., A. Boucher, and J. Wu. 2009. *Applied geostatistics with SGeMS. A user's guide*, 264. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rice, J.A. 2006. *Mathematical statistics and data analysis*, 3rd ed. Boston: Cengage Learning.
- Romer, E. 1949. Climatic regions of Poland. Works of the Wrocław Scientific Society. Series B; No. 16, p. 26.
- Ross, S.M. 2014. *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*, 5th ed. Amsterdam: Elsevier.
- Schmitt, T.G. 2000. *Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*. Hennef: DWA.
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, et al. 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate. In *Climate change. The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, ed. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press.
- SOER. 2020. *Knowledge for transition to a sustainable Europe*. Chapter 05: Land and Soil. SOER 2020/Land and soil, 115–131. <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020/#page=113>.
- Stach, A. 2009. Analysis of the spatial and spatiotemporal structure of maximum daily rainfall in Poland during the years 1956–1980. Adam Mickiewicz University Press, Seria Geografia nr 85, pp. 1–323.

- Tanaś, J., and M. Trojaneck. 2014. Changes in land use structure in suburban zones in Poland after the 90. *Journal International Studies* 7: 81–89. <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2014/7-3/7>.
- Wasserman, L. 2004. *All of statistics: A concise course in statistical inference*. New York: Springer.
- Wenzel, J.H.G., and M.L. Voorhees. 1981. Evaluation of the urban design storm concept. Final report to the Office of Water Research and Technology, Department of the Interior, Washington, D.C., Research Report No. 164, Water Resources Center, University of Illinois.
- Wilson, E.M. 1990. *Engineering Hydrology*. London, UK: Macmillan Press.
- Wilk, P., S. Wereski, K. Mikołajewski, and P. Licznar. 2020. Digital database of precipitation series. In *Methodology for the development of the Polish Atlas of Rainfall Intensities (PANDa)*. *Institute of Meteorology and Water Management*, ed. Paweł Licznar and Janusz Zaleski, 37–55. Warsaw: National Research Institute.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

AUTHOR BIOGRAPHIES

Karol Mikołajewski is a Ph.D. student at the Faculty of Natural Sciences at the University of Silesia in Katowice. Professionally, he is involved in the design and installation of hydrological and meteorological measurement systems, with a strong focus on local flood warning systems for extreme events.

Address: RETENCJAPL Sp. Z o.o., Marynarki Polskiej 163, 80-868 Gdańsk, Poland.

Address: Faculty of Natural Sciences, University of Silesia in Katowice, Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec, Poland.

e-mail: karol.mikolajewski@us.edu.pl

Alfred Stach is the Head of the Geoinformation Department of the Adam Mickiewicz University in Poznań. In recent years, he has specialised in modelling natural systems using Geographic Information Systems tools, classical and spatial statistics methods, also including machine learning and extensive use of remote sensing data.

Address: Department of Geoinformation, Faculty of Geographical and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University in Poznań, B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań, Poland.

e-mail: alfred.stach@amu.edu.pl

Marek Ruman (✉) is a Professor and the Leader of the HYDRO-CHEM research team at the Institute of Earth Sciences at the University of Silesia in Katowice. His research interests focus on the identification and analysis of the variability and interaction of processes shaping changes in surface water quality in geographically and anthropogenically diverse areas.

Address: Faculty of Natural Sciences, University of Silesia in Katowice, Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec, Poland.

e-mail: marek.ruman@us.edu.pl

Klaudia Kosek (✉) is a Ph.D. Eng. at the Institute of Oceanology of the Polish Academy of Sciences in Sopot. Her research primarily involves utilising data mining techniques to evaluate the influence of algae on the chemical properties of seawater. Additionally, her scientific interests encompass the analysis of the chemical composition of stormwater.

Address: Marine Chemistry and Biochemistry Department, Institute of Oceanology, Polish Academy of Sciences, Powstańców Warszawy 55, 81-712 Sopot, Poland.

e-mail: kkosek@iopan.pl

Zbigniew W. Kundzewicz is a Professor at Poznan University of Life Sciences, a corresponding member of Polish Academy of Sciences and a member of European Academy. His research interests include climate change and its impacts, mitigation and adaptation, as well as hydrometeorological extremes and intense precipitation and floods in particular.

Address: Faculty of Environmental Engineering and Mechanical Engineering, Poznan University of Life Sciences, Piątkowska 94b, 60-649 Poznań, Poland.

e-mail: kundzewicz@yahoo.com

Paweł Licznar is a Professor at the Hydro-Engineering and Hydraulics Department of the Warsaw University of Technology (WUT). His research interests include atmospheric precipitation processes and their modelling and stormwater conveyance modelling and design.

Address: Faculty of Building Services, Hydro and Environmental Engineering, Warsaw University of Technology, Nowowiejska 20, 00-653 Warsaw, Poland.

e-mail: pawel.licznar@pw.edu.pl

Ambio

Supplementary Information

This supplementary information has not been peer reviewed.

Title: **Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs**

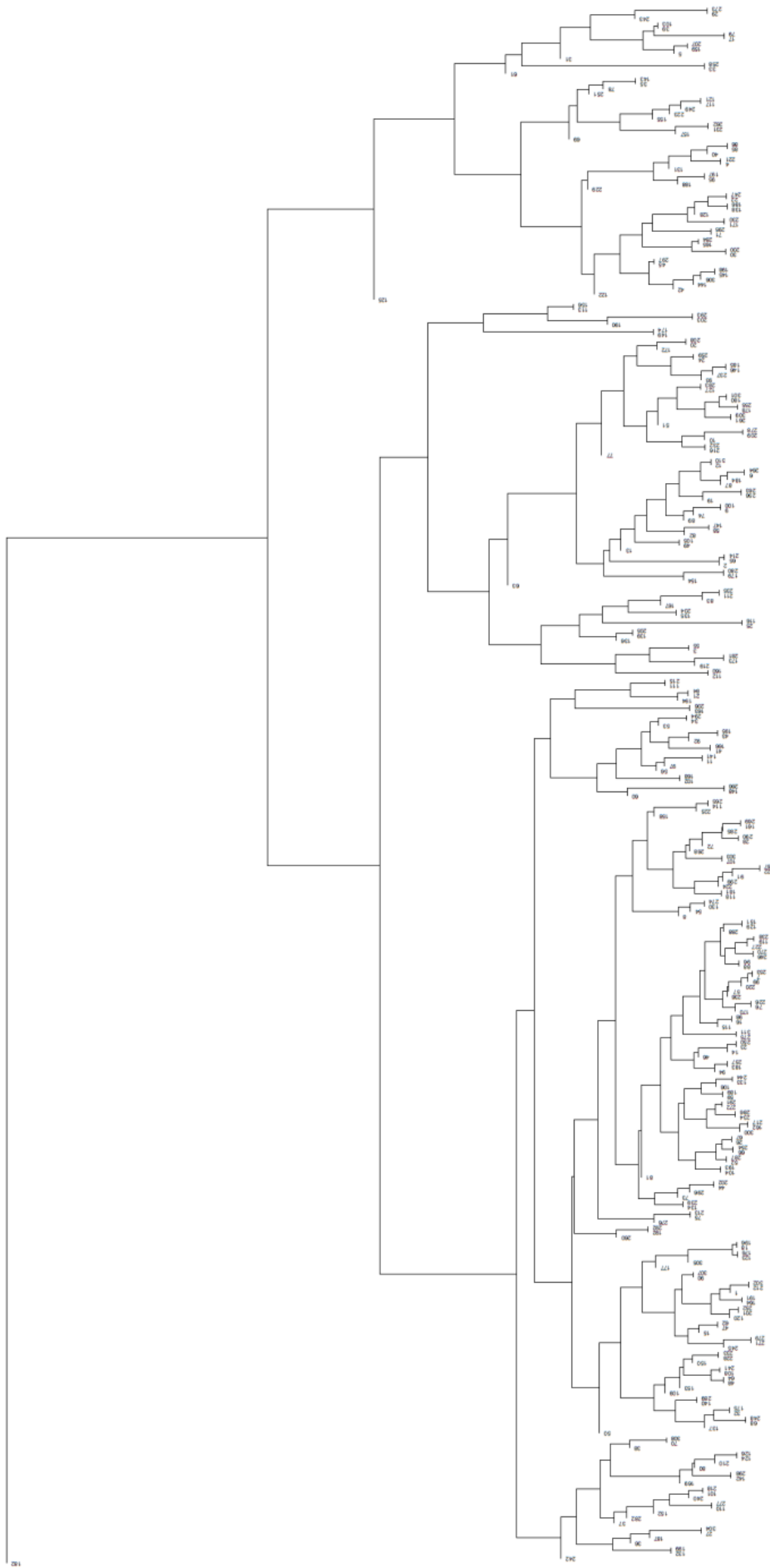


Fig. S1 Dendrogram presenting an example of specific precipitation No. 182 - the top-left branch of the chart, which is dissimilar to any other analysed precipitations in the given location. Such precipitations were excluded during the expert analysis.

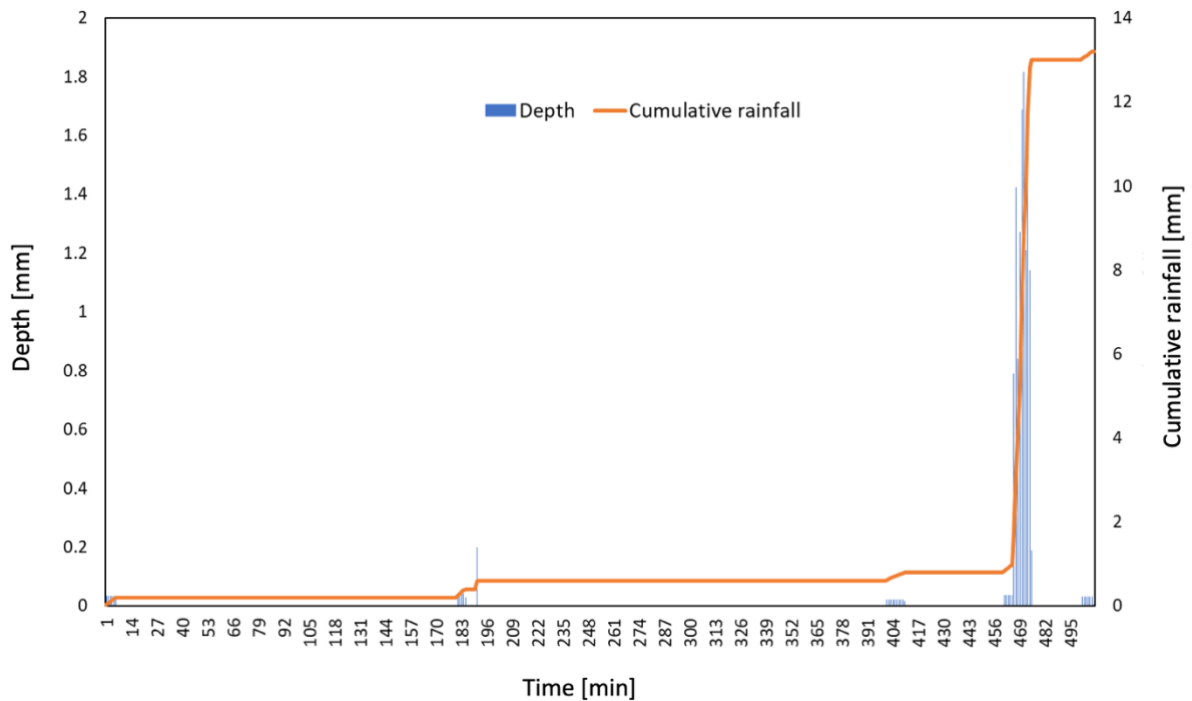


Fig. S2 The chart represents incorrectly recorded precipitation No-182 (same as specific one in Fig. S1). Such a hyetograph is characteristic of a blocked rain gauge funnel.

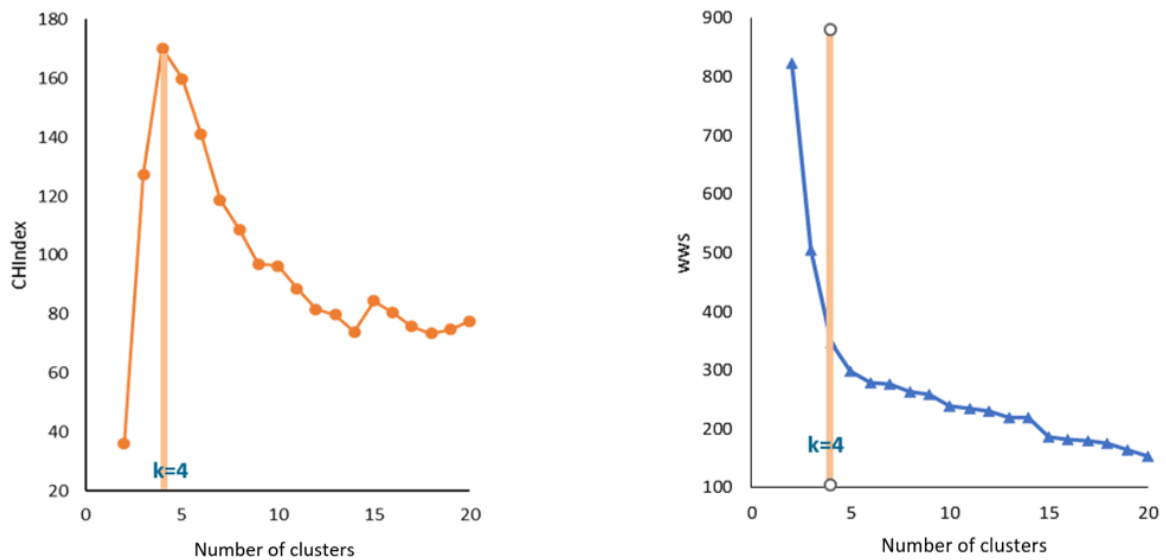


Fig. S3 Charts presenting the example of CHIndex and wss parameters functions, used to assess the optimal number of clusters. In the above example, the maximum of the CHIndex function and the inflection of the wss function were the criteria for separating 4 clusters.

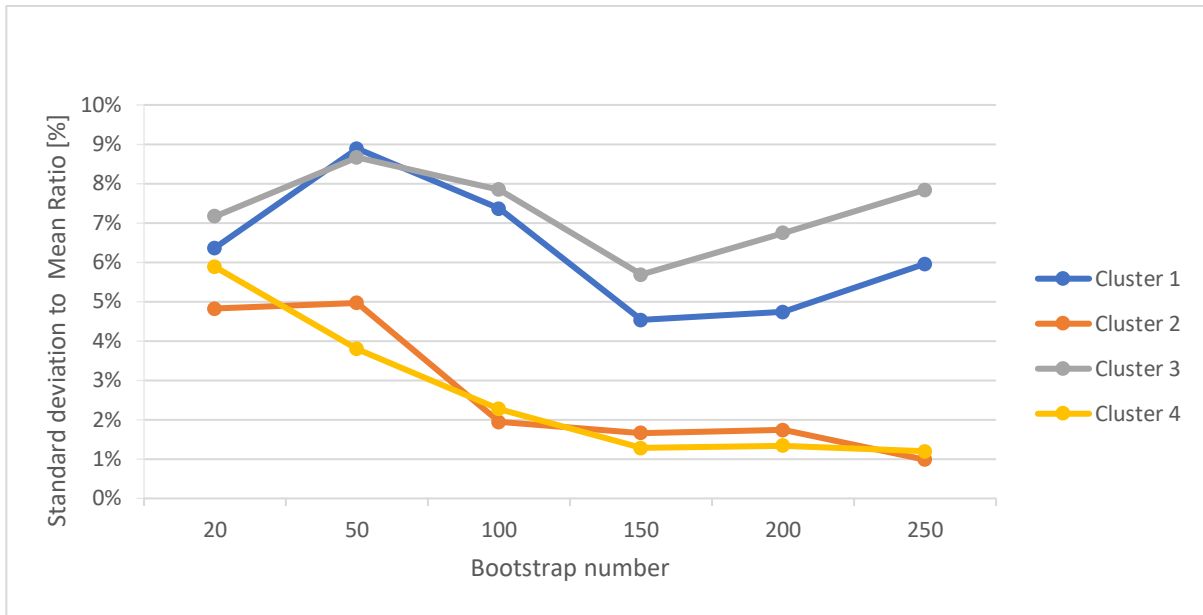


Fig. S4 The chart illustrates the ratio of standard deviation to the mean for the bootmean values calculated for each of the four clusters determined in successive simulations with a bootstrap number of 20, 50, 100, 150, 200, and 250 for a randomly chosen location. The value of 150 resulted in the lowest values of this index, not exceeding 6% for all clusters.

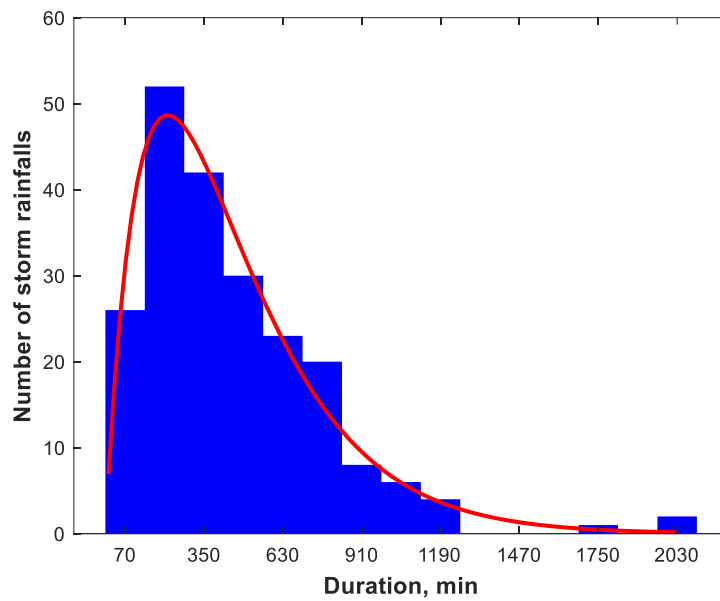


Fig. S5 Histogram of rainfall durations for a set of 214 heavy rainfalls from Warsaw, the capital of Poland, with fitted gamma distribution ($a= 1,8819$, $b= 239.91$).

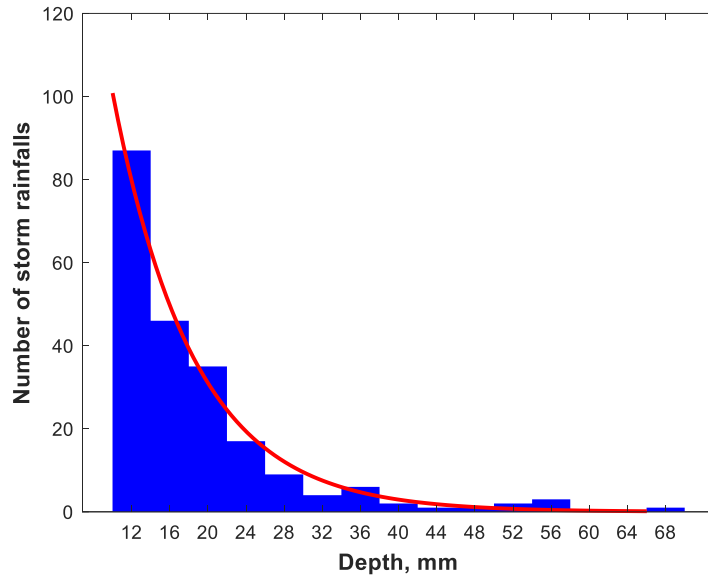


Fig. S6 Histogram of rainfall depth for a set of 214 heavy rainfalls from Warsaw, the capital of Poland, with fitted 2-parameter exponential distribution ($\lambda=0.11794$, $\gamma=10,00$).

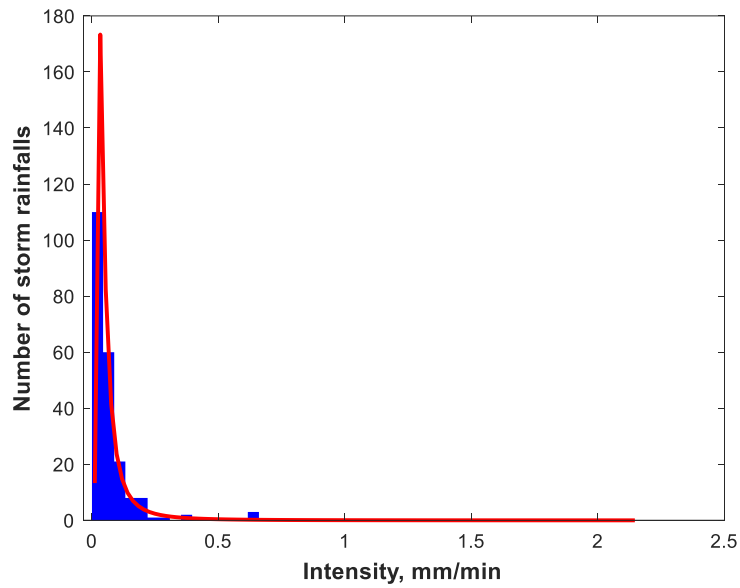


Fig. S7 Histogram of mean rainfall intensities for a set of 214 heavy rainfalls from Warsaw, the capital of Poland, with fitted generalised extreme value distribution ($\mu=0.03548$, $\sigma=0.02297$, $k=0.49621$).

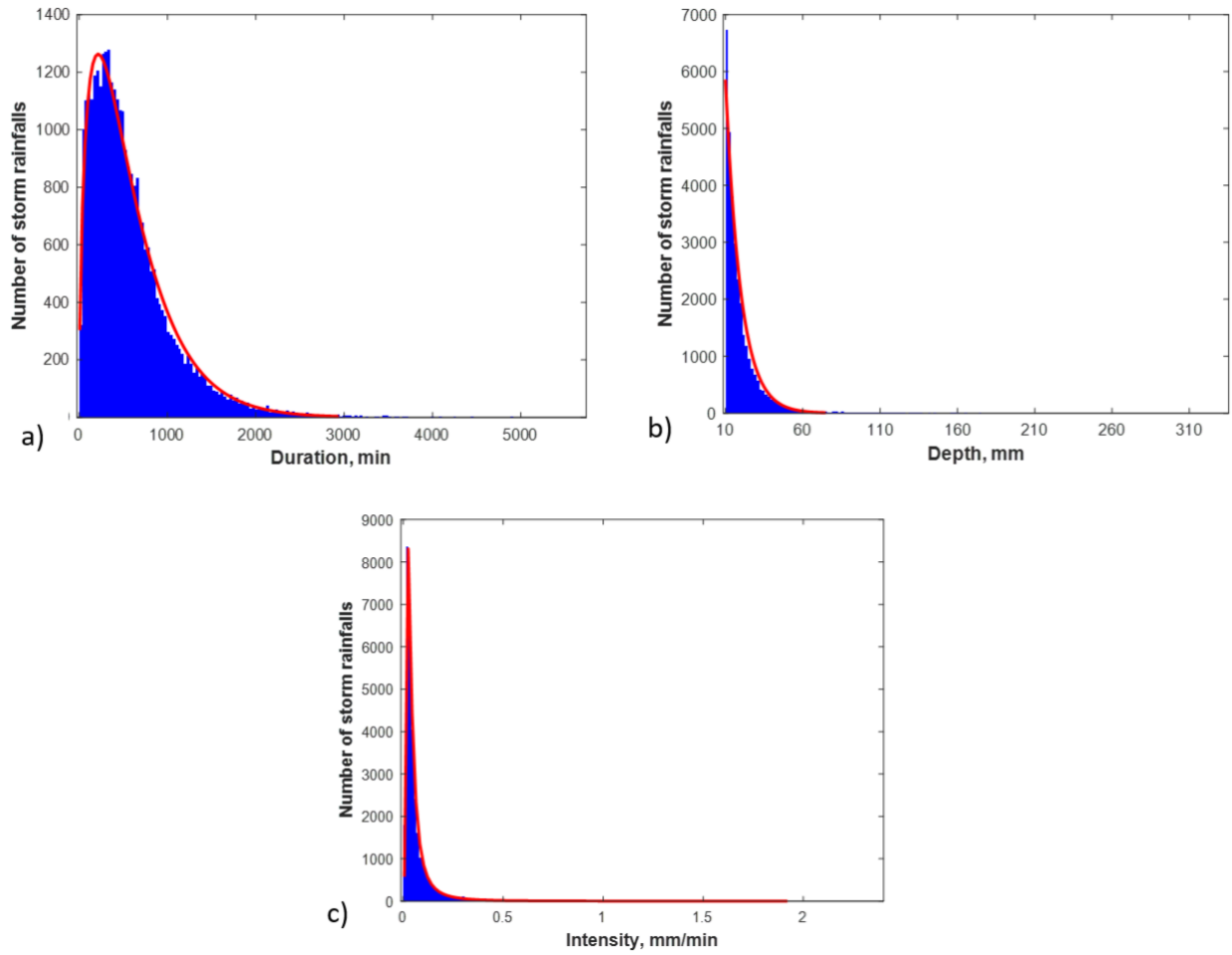


Fig. S8 These diagrams (a, b, c) show rainfall patterns in Poland based on a combined dataset of 31,646 storm rainfalls. Diagram a) displays the histogram of rainfall durations (gamma distribution: $a=1,584$, $b=367.3$). Diagram b) shows the histogram of rainfall depths (exponential distribution: $\lambda=9,819$, $\gamma=10,00$). Diagram c) presents the histogram of mean rainfall intensities (generalized extreme value distribution: $\mu=0,0295$, $\sigma=0,0209$, $k=0,6101$).

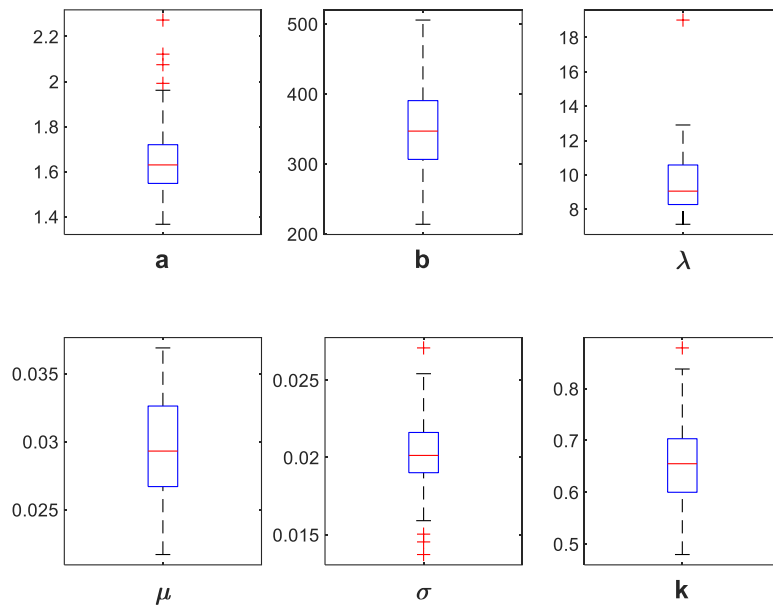


Fig. S9 Box plots showing the variability of fitted distribution parameters among 100 analysed gauges in Poland, respectively for shape a and scale b parameters of gamma distributions, λ parameters of 2-parameter exponential distributions, location μ , scale σ , and shape k parameters of generalized extreme value distributions. The red lines in the middle of each box are samples medians, whereas the bottoms and tops of each box are the 25th and 75th percentiles of the samples, respectively. The whiskers extend to the most extreme data points not considered outliers. Outliers are assumed to be values higher than 1.5 times the interquartile range away from the bottoms or tops of the boxes, plotted individually using the '+' marker symbols.

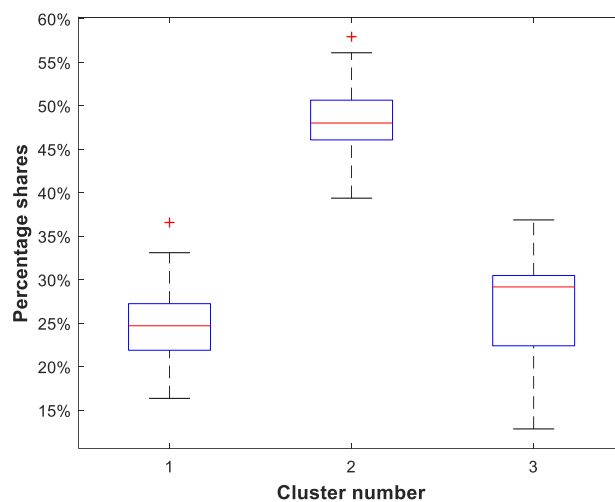


Fig. S10 Box plots showing the variability of percentage shares of rainfalls classified to clusters 1, 2, and 3 among a 37-gauge subset out of 100 analysed gauges in Poland, where the optimum cluster number was equal to 3. Box plots convention is similar to Fig. S9.

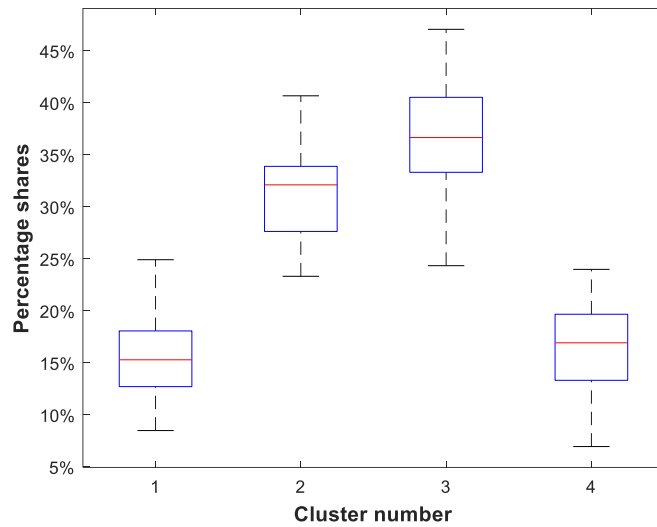


Fig. S11 Box plots showing the variability of percentage shares of rainfalls classified to clusters 1, 2, 3, and 4 among a 58-gauge subset out of 100 analysed gauges in Poland, where the optimum cluster number was equal to 4. Box plots convention is similar to Fig. S9.

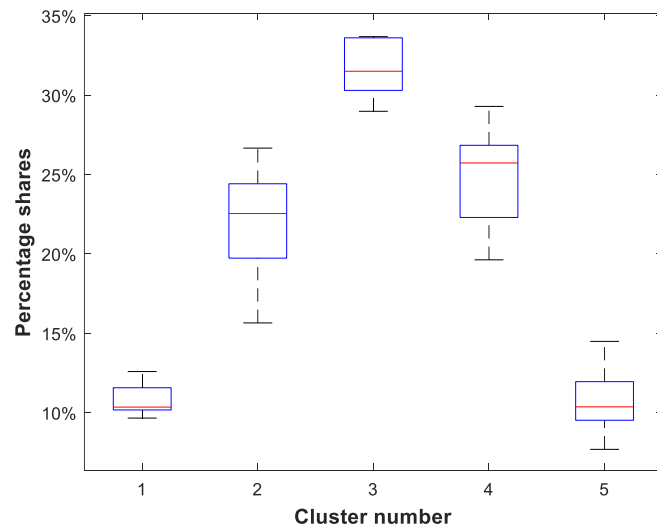


Fig. S12 Box plots showing the variability of percentage shares of rainfalls classified to clusters 1, 2, 3, 4, and 5 among a 5-gauge subset out of 100 analysed gauges in Poland, where the optimum cluster number was equal to 5. Box plots convention is similar to Fig. S9.

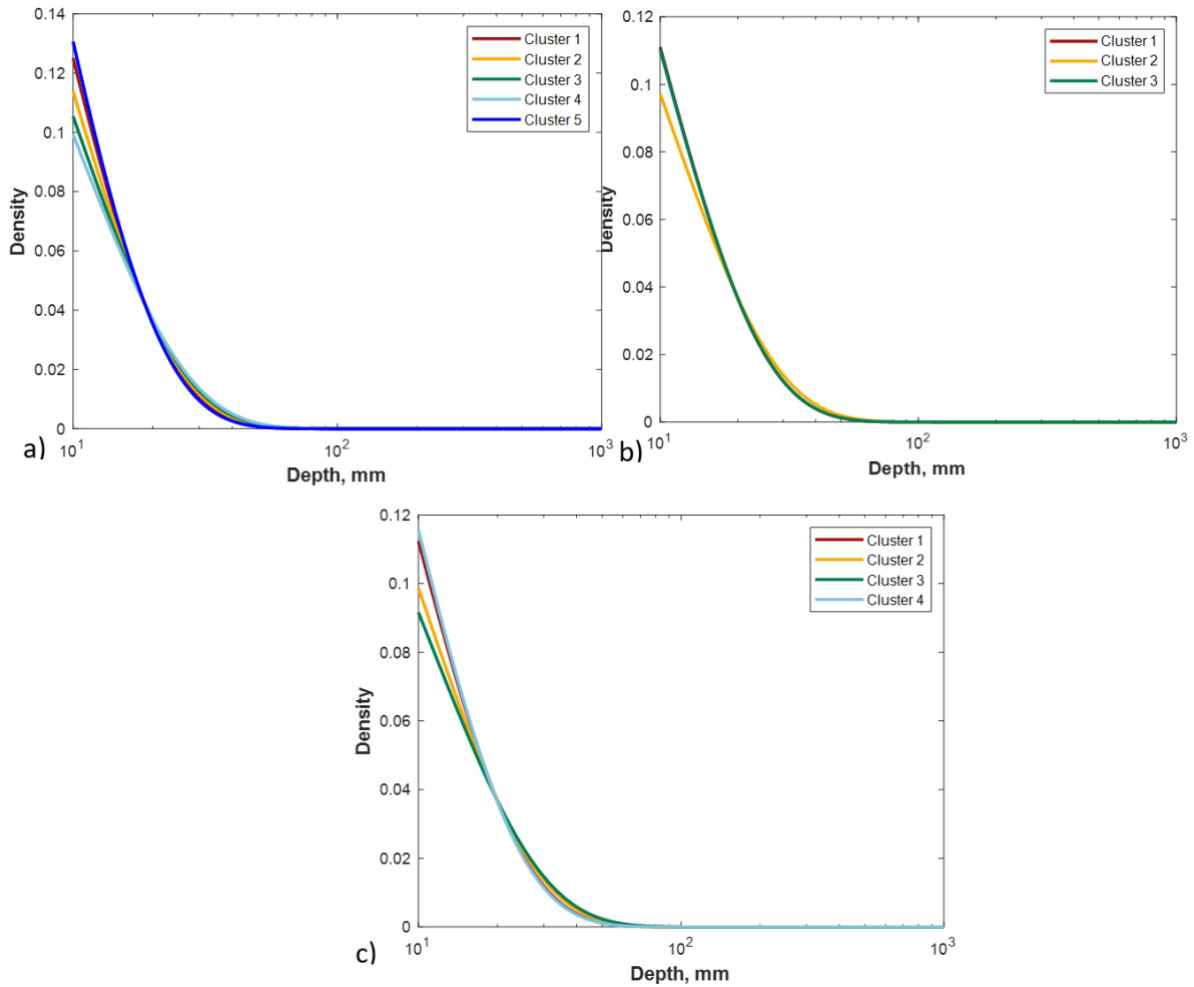


Fig. S13 Diagram a) displays gamma distributions fitted to rainfall depths assigned to clusters 1 to 5 using 5 gauges (optimum cluster number: 5) Diagram b) showcases gamma distributions fitted to rainfall depths assigned to clusters 1 to 4 using 58 gauges (optimum cluster number: 4). Diagram c) presents gamma distributions fitted to rainfall depths assigned to clusters 1 to 3 using 37 gauges (optimum cluster number: 3). All of these distributions are plotted at a log scale for better discrimination and provide insights into the distribution patterns of rainfall depths across different clusters.

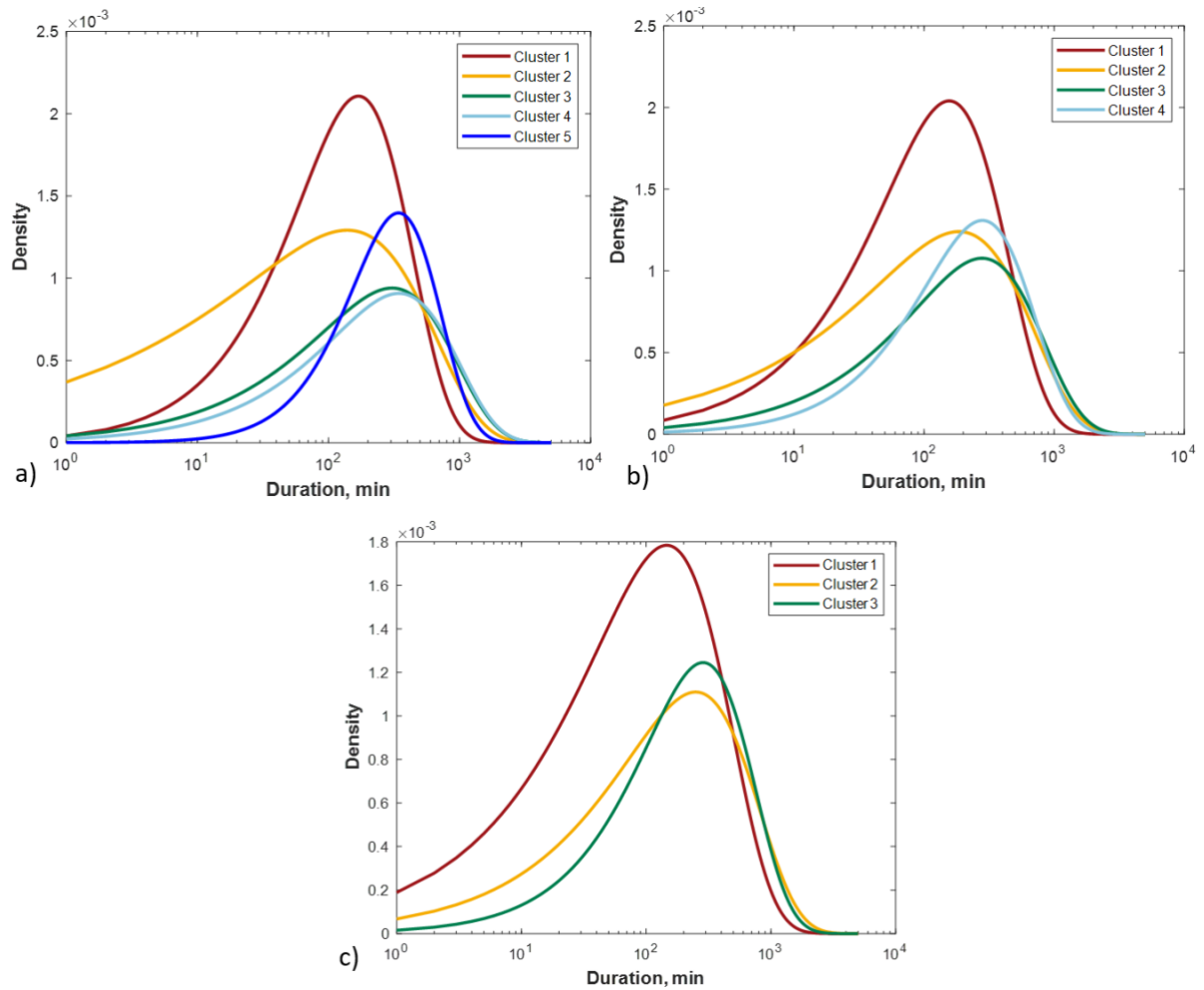


Fig. S14 Diagram a) showcases 2-parameter exponential distributions fitted to rainfall durations assigned to clusters 1-5 using 5 gauges (optimum cluster number: 5). The distributions are plotted on a log scale for improved discrimination. Diagram b) presents the same analysis for clusters 1-4 using 58 gauges (optimum cluster number: 4), also plotted on a log scale. Diagram c) displays the distributions for clusters 1-3 using 37 gauges (optimum cluster number: 3), with a log scale used for better visualization. These figures provide valuable insights into the distribution patterns of rainfall durations across different clusters, visualized using a log scale.

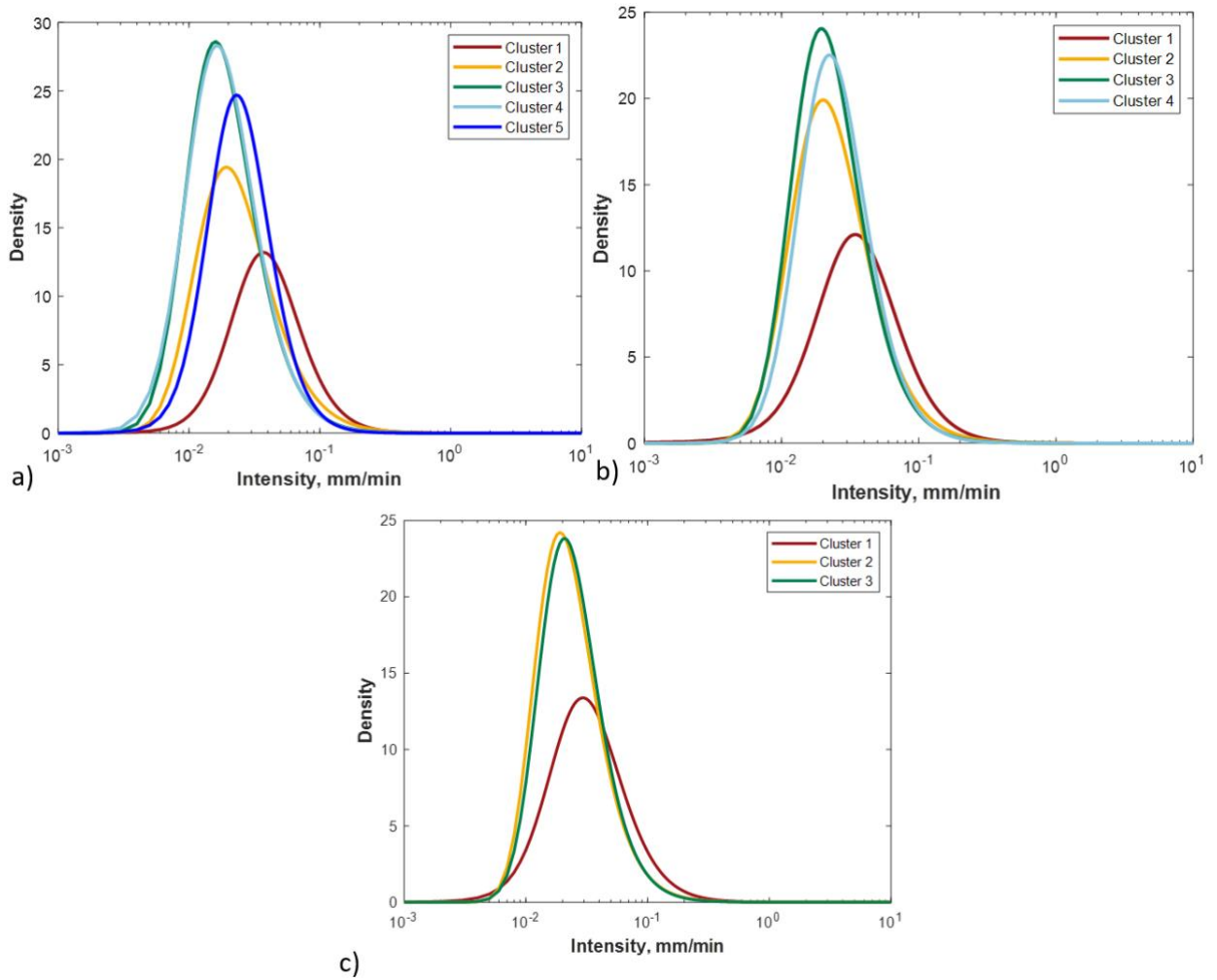


Fig. S15 Diagram a) showcases generalized extreme value distributions fitted to mean intensities of rainfalls assigned to clusters 1-5 using 5 gauges (optimum cluster number: 5). Similarly, diagram b) presents the fitted distributions for clusters 1-4 using 58 gauges (optimum cluster number: 4), while diagram c) displays the fitted distributions for clusters 1-3 using 37 gauges (optimum cluster number: 3). The distributions at all diagrams are plotted with a log scale aiding in enhanced visualization. These diagrams provide insights into the distribution patterns of mean rainfall intensities across different clusters.

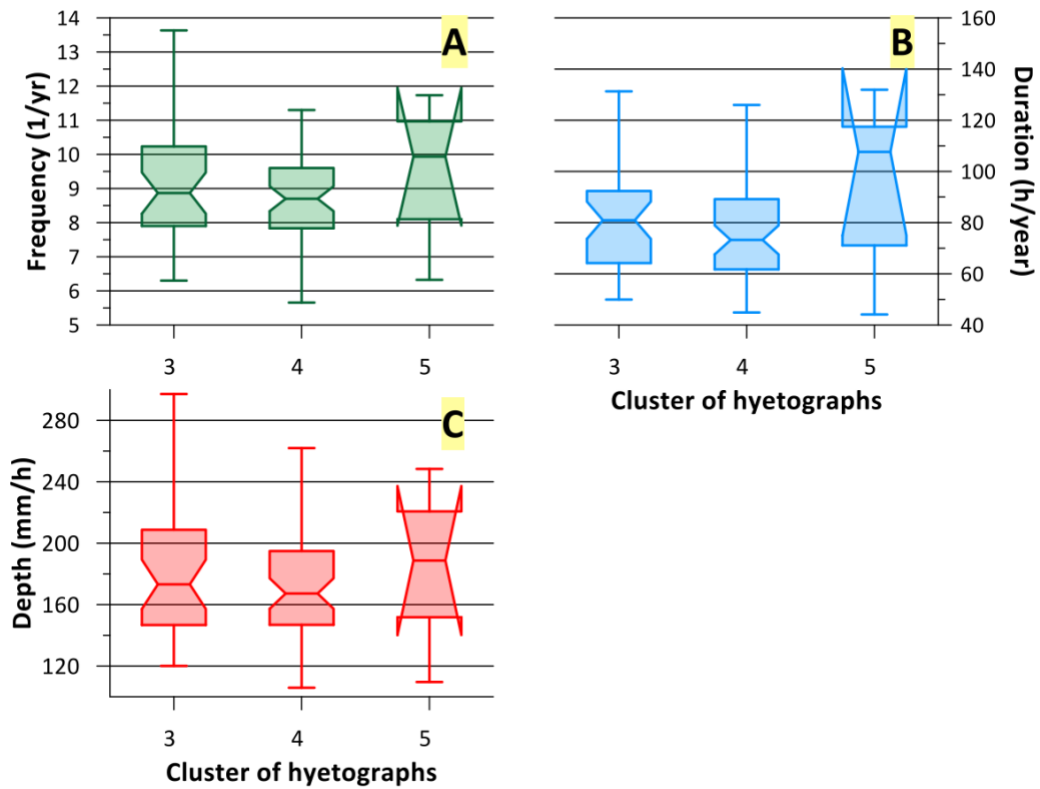


Fig. S16 Boxplots of average multi-year characteristics of storm rainfall in locations of sites for which 3, 4 or 5 model hyetographs of storm rainfall have been established. Explanations: A – frequency of occurrence of storm rainfalls (1/year), B – mean duration of storm rainfalls (h/year), C – mean depth (total) of storm rainfalls (mm/year). The principle of chart construction is similar to Fig. S9, with the exception of taking into account outliers. Box notches represent the 95% confidence interval for the median.

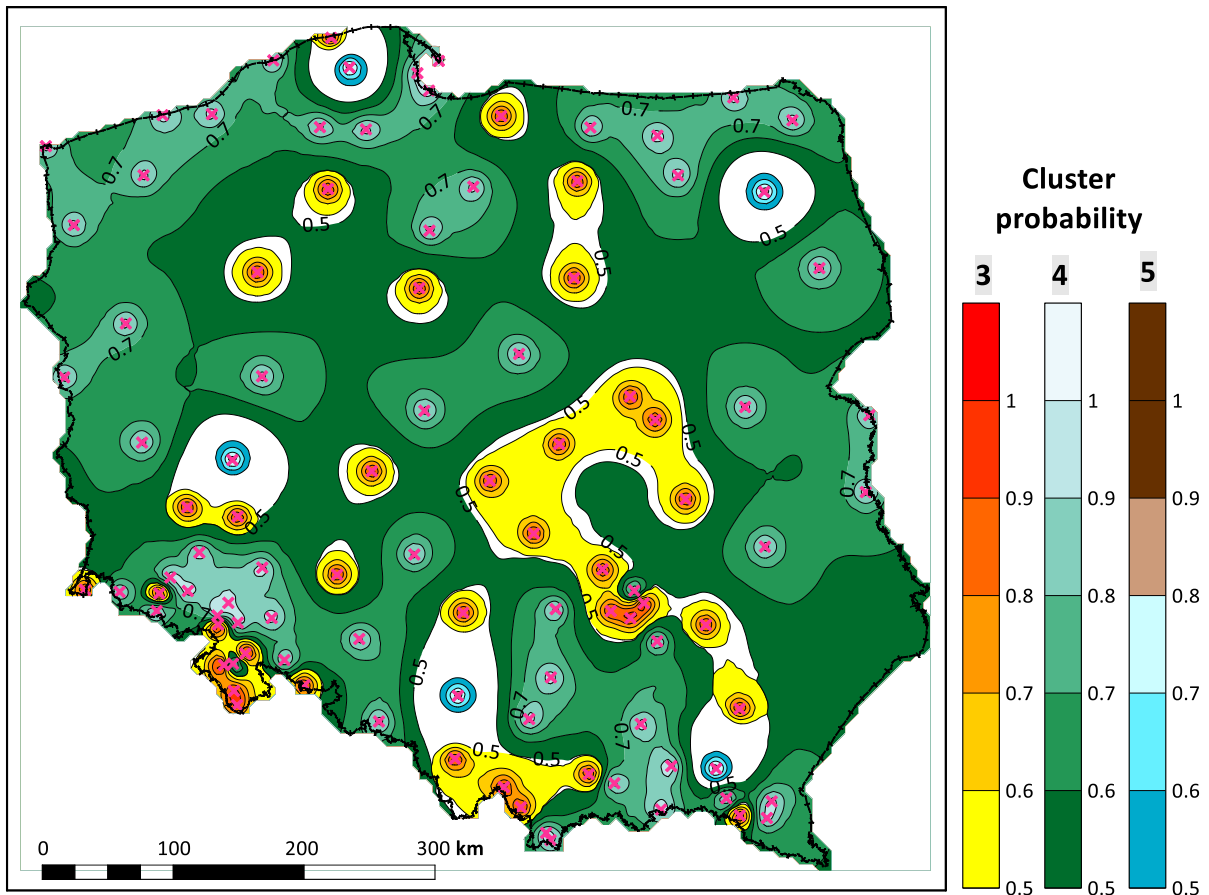


Fig. S17 Probability of membership of land in clusters with three, four, and five model hyetographs determined by means of Indicator Kriging. Colours denote probability of membership in a given cluster, if it is higher than 0.5. White (empty) spaces denote areas with the highest uncertainty, i.e. the probability of membership in any cluster is not higher than 0.5.

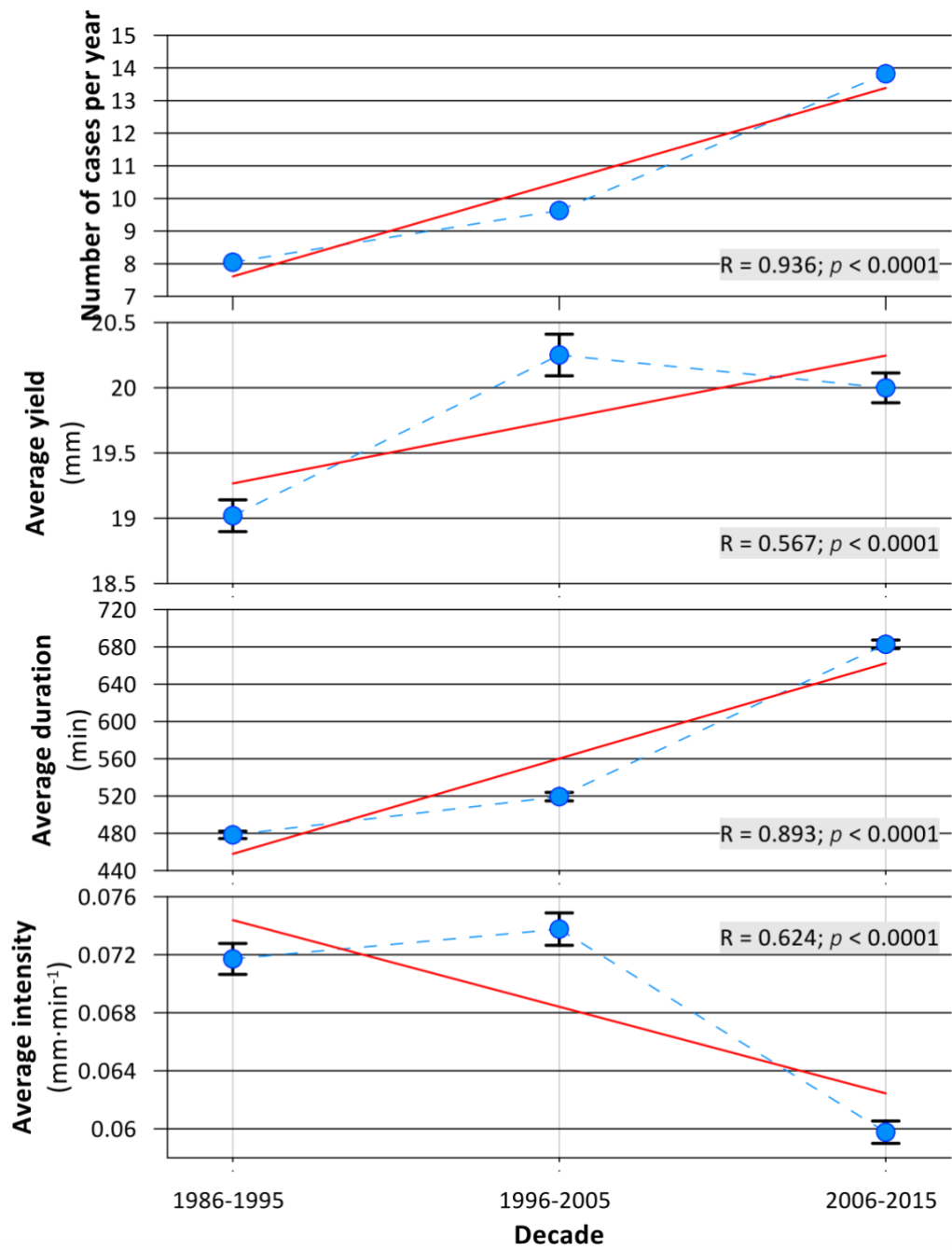


Fig. S18 Average number of cases, depth, duration and intensity of heavy rainfall in three decades from 1986 to 2015 and their standard errors. Earlier years were included in the first decade, and later years were included in the third decade. The best-fitting trend line is marked on the charts and its coefficient of determination and significance level are given.

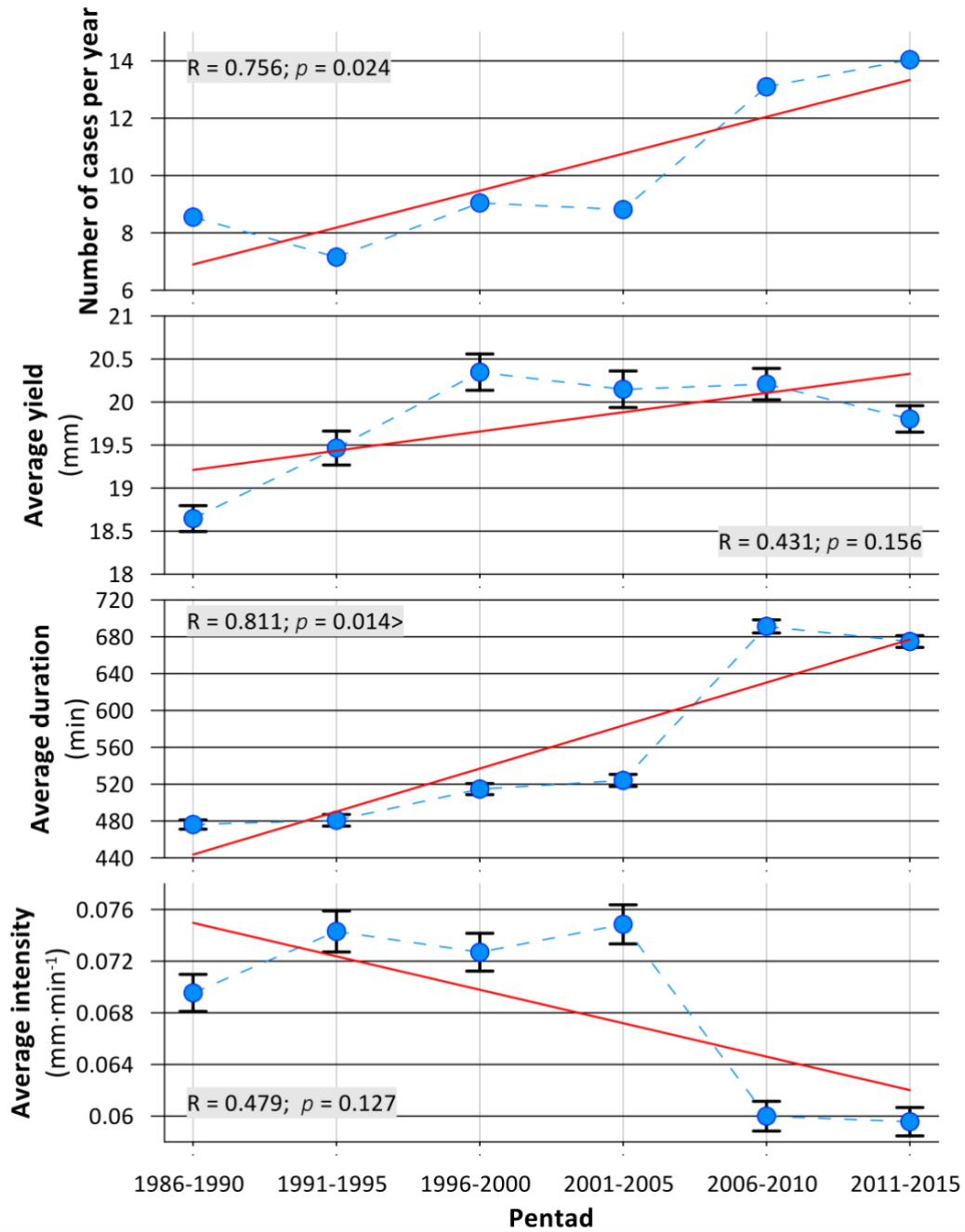


Fig. S19 Average number of cases, depth, duration and intensity of heavy rainfall in six pentads of the multiannual period 1986-2015 and their standard errors. Earlier years were added to the first pentad, and later years to the last one. The best-fitting trend line is marked on the charts and its coefficient of determination and significance level are given.

Table S1 The PANDa project stations with their location information, and statistics of the designated groups of storm rainfalls and identified clusters of model hyetographs.

No.	Name of station	Latitude	Longitude	Altitude, m a.s.l.	Number of storm rainfalls (except the removed ones)	Number of removed storm rainfalls	Number of clusters k	Minimum bootmean value
1	Baligród Mchawa	49°21'14"	22°17'01"	430	472	0	4	0.64
2	Bardo	50°30'33"	16°44'39"	320	288	0	3	0.83
3	Białystok	53°06'26"	23°09'44"	148	283	1	4	0.74
4	Biebrza	53°39'02"	22°34'42"	115	207	0	5	0.62
5	Biecz-Grudna	49°44'07"	21°17'44"	285	309	0	4	0.64
6	Bielsko-Biała	49°48'29"	19°00'04"	390	588	0	3	0.84
7	Bodzentyn	50°56'49"	20°57'05"	270	270	0	4	0.70
8	Bogatynia	50°53'59"	14°58'50"	295	308	0	3	0.87
9	Bolków	50°55'30"	16°05'55"	310	292	0	4	0.75
10	Chojnice	53°42'55"	17°31'57"	164	287	0	3	0.84
11	Chwałkowice	51°26'54"	16°36'47"	180	224	0	3	0.84
12	Cisów	50°45'31"	20°54'10"	326	252	0	3	0.86
13	Częstochowa	50°48'43"	19°05'30"	294	349	0	3	0.94
14	Długopole	50°14'59"	16°38'00"	365	330	0	3	0.94
15	Dobrogoszcz	50°45'31"	17°01'02"	175	259	0	4	0.72
16	Dzierżoniów	50°43'11"	16°39'10"	260	285	0	4	0.68
17	Elbląg	54°13'24"	19°32'37"	189	312	0	3	0.82
18	Gdańsk - Port Północny	54°23'59"	18°41'52"	2	252	0	4	0.86
19	Gdynia	54°31'08"	18°33'34"	2	217	0	4	0.70
20	Głucholazy	50°18'08"	17°23'14"	350	325	0	3	0.83
21	Gołdap	54°18'31"	22°16'14"	160	271	0	4	0.71
22	Gorzów	52°44'28"	15°16'38"	71	226	0	4	0.78
23	Grudziądz	53°26'15"	18°42'34"	25	220	0	4	0.79
24	Hala Gąsienicowa	49°14'38"	20°00'21"	1523	726	0	4	0.69
25	Hel	54°36'13"	18°48'43"	1	271	1	4	0.61
26	Jabłonka	49°28'20"	19°41'45"	614	389	1	3	0.90
27	Jelenia Góra	50°54'01"	15°47'20"	342	309	2	3	0.92
28	Kalisz	51°46'52"	18°04'51"	137	239	0	3	0.85
29	Karpacz	50°46'44"	15°46'10"	575	398	3	4	0.74

30	Katowice	50°14'26"	19°01'58"	278	377	0	5	0.65
31	Kętrzyn	54°04'02"	21°22'00"	106	292	0	4	0.66
32	Kielce	50°48'38"	20°41'32"	260	309	0	3	0.62
33	Kłodzko	50°26'13"	16°36'51"	356	315	0	4	0.87
34	Koło	52°11'59"	18°39'37"	115	238	0	4	0.66
35	Kołobrzeg	54°10'57"	15°34'47"	3	256	0	4	0.67
36	Koszalin	54°12'16"	16°09'19"	33	381	0	4	0.65
37	Kościerzyna	54°07'43"	17°57'43"	190	286	0	4	0.71
38	Kozenice	51°33'53"	21°32'37"	123	298	0	3	0.84
39	Kraków - Bielany	50°04'40"	19°47'42"	237	320	0	4	0.66
40	Krosno	49°42'24"	21°46'09"	329	396	0	5	0.61
41	Legnica	51°11'33"	16°12'28"	122	294	0	4	0.68
42	Lesko	49°27'59"	22°20'30"	420	480	0	4	0.87
43	Leszno	51°50'08"	16°32'05"	91	270	0	5	0.64
44	Lębork	54°33'11"	17°45'25"	39	365	0	5	0.62
45	Lidzbark Warmiński	54°08'09"	20°35'10"	90	274	4	4	0.73
46	Limanowa	49°41'37"	20°25'06"	515	437	0	3	0.68
47	Lubachów	50°45'50"	16°25'43"	310	349	4	4	0.60
48	Lublin	51°13'00"	22°23'35"	238	286	3	4	0.66
49	Łeba	54°45'13"	17°32'05"	2	328	0	3	0.80
50	Łódź	51°43'06"	19°23'14"	175	243	0	3	0.78
51	Miechów	50°21'46"	20°01'58"	299	300	0	4	0.63
52	Międzyzylesie	50°09'12"	16°40'15"	450	395	0	3	0.88
53	Mikołajki	53°47'21"	21°35'23"	127	293	0	4	0.68
54	Mława	53°06'15"	20°21'40"	147	291	0	3	0.85
55	Namysłów	51°03'59"	17°43'00"	150	200	0	3	0.65
56	Niezabyszewo	54°08'18"	17°25'24"	160	278	0	4	0.70
57	Nowy Sącz	49°37'38"	20°41'19"	292	406	0	4	0.74
58	Olsztyn	53°46'07"	20°25'17"	133	279	2	3	0.92
59	Opole	50°37'37"	17°58'08"	163	286	0	4	0.85
60	Otmuchów	50°28'20"	17°09'59"	210	307	0	4	0.71
61	Piła	53°07'50"	16°44'50"	72	251	0	3	0.79
62	Płock	52°35'18"	19°43'33"	106	222	0	4	0.69

63	Polanica Zdrój	50°25'31"	16°31'06"	390	296	0	3	0.64
64	Polkowice	51°30'02"	16°03'22"	160	207	0	3	0.87
65	Poznań	52°25'00"	16°50'05"	88	201	0	4	0.59
66	Prabuty	53°44'22"	19°12'54"	100	269	0	4	0.63
67	Pszenno	50°51'14"	16°32'35"	225	270	0	4	0.61
68	Racibórz	50°03'40"	18°11'27"	206	281	0	4	0.64
69	Resko	53°45'49"	15°23'36"	52	326	6	4	0.77
70	Rzeszów - Jasionka	50°06'39"	22°02'32"	206	339	0	3	0.84
71	Sandomierz	50°41'48"	21°42'57"	217	304	0	3	0.88
72	Siedlce	52°10'52"	22°14'41"	152	273	0	4	0.73
73	Skierniewice	51°57'55"	20°09'37"	128	257	0	3	0.79
74	Słubice	52°20'55"	14°37'11"	53	277	0	4	0.60
75	Staszów	50°35'42"	21°11'06"	219	254	0	4	0.65
76	Sulejów	51°21'12"	19°51'59"	188	303	0	3	0.91
77	Suwałki	54°07'51"	22°56'56"	184	268	0	4	0.75
78	Szczecin	53°23'43"	14°37'22"	1	248	0	4	0.70
79	Świder	52°06'57"	21°14'15"	94	275	0	3	0.80
80	Świeradów Zdrój	50°53'54"	15°21'31"	500	536	0	4	0.87
81	Świerzawa	51°00'46"	15°54'10"	300	295	0	4	0.60
82	Święty Krzyż	50°51'34"	21°03'05"	575	316	0	3	0.85
83	Świnoujście	53°55'24"	14°14'32"	5	236	0	4	0.61
84	Tarnów	50°01'48"	20°59'02"	209	375	0	4	0.81
85	Terespol	52°04'43"	23°37'19"	133	263	0	4	0.81
86	Toruń	53°02'31"	18°35'44"	69	277	0	3	0.93
87	Ustka	54°35'18"	16°51'15"	3	340	2	4	0.73
88	Walim	50°42'10"	16°26'21"	490	372	0	3	0.88
89	Warszawa Bielany	52°16'53"	20°57'48"	98	214	0	3	0.86
90	Wieluń	51°12'40"	18°33'28"	200	280	0	4	0.70
91	Wisłoczek	49°30'03"	21°51'56"	520	460	0	4	0.75
92	Wisłok Wielki	49°22'43"	21°59'57"	540	473	0	3	0.87
93	Włochów	51°05'56"	20°36'44"	345	299	0	3	0.86
94	Włodawa	51°33'12"	23°31'46"	177	254	0	4	0.63
95	Wrocław	51°06'12"	16°54'00"	120	296	0	4	0.68

96	Wymysłów	50°49'53"	20°05'38"	250	299	0	4	0.73
97	Wysowa	49°26'17"	21°10'21"	519	473	0	4	0.7
98	Zakopane	49°17'38"	19°57'37"	855	642	0	4	0.82
99	Zawoja	49°36'43"	19°31'07"	697	580	0	3	0.84
100	Zielona Góra	51°55'48"	15°31'29"	192	258	0	4	0.75

Table S2 The PANDa project stations' statistics of the designated set of storm rainfalls of the summer half-year.

No.	Name of station	Number of observation years	Number of storm rainfalls of the summer half - year	Frequency of occurrence of storm rainfalls of the summer half - year per 1 year	Means duration of storm rainfalls of the summer half - year in a year, h	Mean depth of storm rainfalls of the summer half - year in a year, mm
1	Baligród Mchawa	30	432	14.4	126.0	308.2
2	Bardo	30	274	9.1	74.8	194.0
3	Białystok	30	250	8.3	74.1	161.6
4	Biebrza	31	196	6.3	44.1	109.6
5	Biecz-Grudna	30	288	9.6	82.4	197.8
6	Bielsko-Biała	30	532	17.7	197.9	401.2
7	Bodzentyn	30	250	8.3	60.9	157.8
8	Bogatynia	30	284	9.5	80.9	208.7
9	Bolków	30	269	9.0	79.4	193.4
10	Chojnice	30	237	7.9	71.4	146.7
11	Chwałkowice	32	219	6.8	56.0	135.0
12	Cisów	30	238	7.9	60.3	149.8
13	Częstochowa	30	307	10.2	102.,5	203.5
14	Długopole	30	315	10.5	84.4	210.7
15	Dobrogoszcz	30	239	8.0	61.4	169.1
16	Dzierżoniów	30	265	8.8	74.7	193.7
17	Elbląg	30	266	8.9	85.3	160.1
18	Gdańsk - Port Północny	30	232	7.7	59.3	145.2
19	Gdynia	30	205	6.8	53.1	119.6
20	Głucholazy	30	288	9.6	92.4	217.0
21	Goldap	30	249	8.3	61.2	147.6
22	Gorzów	30	189	6.3	53.3	113.0

23	Grudziądz	30	211	7.0	49.6	124.3
24	Hala Gąsienicowa	30	675	22.5	260.2	667.2
25	Hel	30	226	7.5	71.8	146.8
26	Jabłonka	30	356	11.9	108.1	233.5
27	Jelenia Góra	30	291	9.7	91.0	198.5
28	Kalisz	30	213	7.1	63.5	126.2
29	Karpacz	30	369	12.3	115.1	274.5
30	Katowice	30	329	11.0	117.5	220.7
31	Kętrzyn	30	264	8.8	78.0	155.1
32	Kielce	30	273	9.1	84.4	183.4
33	Kłodzko	30	284	9.5	98.1	198.7
34	Koło	30	209	7.0	59.5	126.3
35	Kołobrzeg	30	245	8.2	69.5	160.7
36	Koszalin	30	315	10.5	104.6	203.4
37	Kościerzyna	30	262	8.7	70.5	159.8
38	Kozienice	30	256	8.5	84.4	156.8
39	Kraków - Bielany	30	290	9.7	80.9	190.7
40	Krosno	30	352	11.7	131.9	248.4
41	Legnica	30	274	9.1	89.4	192.1
42	Lesko	30	423	14.1	137.2	291.5
43	Leszno	30	243	8.1	71.1	151.8
44	Lębork	30	298	9.9	107.6	188.7
45	Lidzbark Warmiński	30	241	8.0	59.1	145.9
46	Limanowa	30	409	13.6	131.3	297.2
47	Lubachów	30	323	10.8	89.2	238.9
48	Lublin	30	260	8.7	72.4	158.5
49	Łeba	30	284	9.5	101.9	173.2
50	Łódź	30	203	6.8	64.2	125.3
51	Miechów	30	283	9.4	77.4	182.1
52	Międzyzylesie	30	342	11.4	94.9	224.8
53	Mikołajki	30	266	8.9	69.0	166.6
54	Mława	30	252	8.4	73.1	153.1
55	Namysłów	30	192	6.4	52.7	120.1

56	Niezabyszewo	30	245	8.2	66.5	152.2
57	Nowy Sącz	30	373	12.4	119.6	258.0
58	Olsztyn	30	227	7.6	66.2	142.5
59	Opole	30	258	8.6	82.6	167.9
60	Otmuchów	30	276	9.2	72.8	189.0
61	Piła	30	223	7.4	62.2	138.2
62	Płock	30	195	6.5	57.1	121.3
63	Polanica Zdrój	30	266	8.9	66.9	178.5
64	Polkowice	30	189	6.3	51.9	127.3
65	Poznań	32	181	5.7	44.9	105.9
66	Prabuty	30	257	8.6	61.2	154.6
67	Pszemno	30	248	8.3	66.8	177.3
68	Racibórz	30	264	8.8	83.6	172.1
69	Resko	30	274	9.1	86.2	168.0
70	Rzeszów - Jasionka	30	309	10.3	91.7	198.1
71	Sandomierz	30	280	9.3	81.6	172.1
72	Siedlce	30	232	7.7	67.5	146.0
73	Skierniewice	30	225	7.5	50.7	136.3
74	Słubice	30	233	7.8	70.5	152.2
75	Staszów	30	239	8.0	59.5	145.3
76	Sulejów	30	260	8.7	82.2	173.6
77	Suwałki	30	235	7.8	65.6	145.6
78	Szczecin	30	211	7.0	61.7	130.5
79	Świder	30	265	8.8	59.1	160.4
80	Świeradów Zdrój	30	451	15.0	148.3	327.0
81	Świerzawa	30	275	9.2	78.7	194.9
82	Święty Krzyż	30	278	9.3	74.4	179.4
83	Świnoujście	30	196	6.5	60.1	118.7
84	Tarnów	30	339	11.3	116.3	261.9
85	Terespol	30	235	7.8	73.8	154.0
86	Toruń	30	245	8.2	71.8	160.9
87	Ustka	30	297	9.9	102.7	187.1
88	Walim	30	350	11.7	104.1	266.8

89	Warszawa Bielany	30	204	6.8	49.9	125.9
90	Wieluń	30	247	8.2	72.5	155.9
91	Wisłoczek	30	403	13.4	120.1	299.8
92	Wisłok Wielki	30	436	14.5	125.4	315.7
93	Włochów	30	264	8.8	66.2	169.7
94	Włodawa	30	233	7.8	73.4	148.2
95	Wrocław	30	271	9.0	87.7	177.4
96	Wymysłów	30	282	9.4	68.2	186.0
97	Wysowa	30	456	15.2	123.8	315.3
98	Zakopane	30	568	18.9	238.5	449.4
99	Zawoja	30	501	16.7	167.2	359.8
100	Zielona Góra	30	224	7.5	73.1	146.3

Sosnowiec 25.09.2024
miejsowość, data

Karol Mikołajewski

imię i nazwisko kandydata

44-105 Gliwice, ul Śniadeckich 8H
adres do korespondencji

602 529 300
nr telefonu

karol.mikolajewski@us.edu.pl
adres e-mail

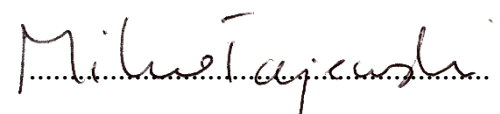
Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk o Ziemi, Będzińska 60, Sosnowiec
afiliacja

OŚWIADCZENIE OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

Mój udział polegał na opracowaniu metodologii oraz koncepcji artykułu. Przygotowałem bazę danych do badań, prowadziłem badania i analiz, zinterpretowałem i opisałem otrzymane wyniki, przygotowałem we współpracy z innymi autorami tekstu artykułu, rysunki oraz wykresy. Odpowiedzialny byłem również za przygotowanie zestawu danych potrzebnych do wdrożenia wyników badań w aplikacji.


pdpis

Karol Mikołajewski

imię i nazwisko kandydata

44-105 Gliwice, ul Śniadeckich 8H

adres do korespondencji

602 529 300

nr telefonu

karol.mikolajewski@us.edu.pl

adres e-mail

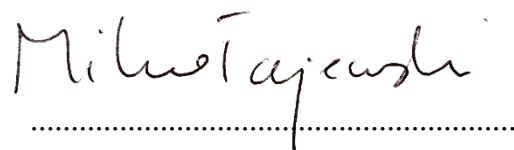
University of Silesia, Faculty of Natural Sciences, Institute of Earth Sciences, Będzińska 60, Sosnowiec
Affiliation

STATEMENT OF THE APPLICANT REGARDING THEIR OWN CONTRIBUTION TO THE CREATION OF THE WORK

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

My contribution involved developing the methodology and concept for the article. I prepared the research database, conducted research and analysis, interpreted and described the obtained results, and collaborated with other authors to prepare the article's text, figures, and charts. I was also responsible for preparing the dataset needed to implement the research results in the application.



Signature of the author of the publication

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Poznań, 25.09.2024

Alfred Stach

imię i nazwisko współautora publikacji

**Uniwersytet Adama Mickiewicza, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, ul. B. Krygowskiego 10,
Poznań**

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

(autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo lub wydawca, tom, strony)

Mój udział polegał na wsparciu przy opracowywaniu metodyki badania deszczy nawalnych w obszarze analizy przestrzennej i czasowej. Uzyskane wyniki opisałem we fragmencie artykułu dotyczącym tego zagadnienia. Brałem udział w redagowaniu i przygotowaniu do publikacji całego artykułu.



Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Poznań, 25.09.2024

Alfred Stach

First and last name of co-author of the publication

**Adam Mickiewicz University, Faculty of Natural Sciences, Institute of Geoecology and Geoinformation, ul. B. Krygowskiego 10,
Poznań**

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My involvement included supporting the development of methodology for studying intense rainfall in the area of spatial and temporal analysis. I described the obtained results in a section of the article related to this issue. I participated in editing and preparing the entire article for publication



.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Sosnowiec, 25.09.2024

Marek Ruman

Imię i nazwisko współautora publikacji

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk o Ziemi, Będzińska 60, Sosnowiec

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hietographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

Mój udział polegał na koordynacji tworzenia manuskryptu, pomocy w interpretacji wyników i redagowaniu finalnej wersji artykułu.



.....
Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Sosnowiec, 25.09.2024

Marek Ruman

First and last name of co-author of the publication

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk o Ziemi, Będzińska 60, Sosnowiec

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My involvement included coordinating the creation of the manuscript, helping to interpret the results, and editing the final version of the article.



.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Sopot, 25.09.2024

Klaudia Kosek

Imię i nazwisko współautora publikacji

Institut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, Zakład Chemii i Biochemii Morza, ul. Powstańców Warszawy 55, Sopot
Afilacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hietographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

Mój udział polegał na zbieraniu materiałów, tłumaczeniu tekstu, sprawdzaniu i redagowaniu ostatecznej wersji artykułu.

Klaudia Kosek

.....
Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Sopot, 25.09.2024

Klaudia Kosek

First and last name of co-author of the publication

Institute of Oceanology, Polish Academy of Sciences, Marine Chemistry and Biochemistry Department, Powstańców Warszawy 55, Sopot

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

My involvement consisted of gathering materials, translating the text, reviewing, and editing the final version of the article.

Klaudia Kosek

.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Poznań, 25.09.2024

Zbigniew W. Kundzewicz

Imię i nazwisko współautora publikacji

**Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej
Katedra Budownictwa i Geoinżynierii, ul. Piątkowska 94, Poznań**

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZJAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

(autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo lub wydawca, tom, strony)

Mój udział polegał na pomocy w opracowaniu metodyki związanej z analizą danych opadowych w perspektywie zmiany klimatycznych, analizą i dyskusją wyników oraz przygotowaniem fragmentu tekstu opisującego te zagadnienia.



.....
Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Poznań, 25.09.2024

Zbigniew W. Kundzewicz

First and last name of co-author of the publication

**Poznań University of Life Sciences, Faculty of Environmental and Mechanical Engineering,
Department of Construction and Geoengineering, ul. Piątkowska 94, Poznań**

Affiliation

STATEMENT

I declare that for the following work:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

(authors, year of publication, title, journal or publisher, volume, pages)

My participation involved helping to develop the methods related to the analysis of rainfall data in the context of climate change, analyzing and discussing the results, and preparing a section of text describing these issues.



.....

Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Warszawa, 25.09.2024

Paweł Licznar

Imię i nazwisko współautora publikacji

Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, ul. Nowowiejska 20, Warszawa

Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

Mój udział polegał na koordynacji badań, konsultacji i interpretacji wyników. Byłem też odpowiedzialny za naukową koncepcję artykułu, oraz akceptowałem jego końcową wersję przed przekazaniem do publikacji



Podpis współautora publikacji

A STATEMENT OF THE APPLICANT'S CO-AUTHOR OF THEIR CONTRIBUTION TO THE WORK

Warszawa, 25.09.2024

Paweł Licznar

First and last name of co-author of the publication

**Warsaw University of Technology, Faculty of Building Services, Hydroengineering, and Environmental Engineering
Department of Hydraulic Engineering and Hydraulic, ul. Nowowiejska 20, Warszawa**

Affiliation

STATEMENT

MIKOŁAJEWSKI, Karol, STACH, Alfred, RUMAN, Marek, KOSEK, Klaudia, KUNDZIEWICZ, Zbigniew and LICZNAR, Paweł, 2024, Heavy rainfalls in Poland and their hyetographs, AMBIO, <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02069-6>

My contribution involved coordinating the research, consulting, and interpreting the results. I was also responsible for the scientific concept of the article and approved its final version before submission for publication.



.....
Signature of the co-author of the publication

* applies to co-authors