

# Ekstremalne opady atmosferyczne w warunkach miejskich – analiza podtopień we Wrocławiu z dnia 2 sierpnia 2024 r.

Extreme precipitation in urban conditions – analysis of the rainfall event in Wrocław on August 2, 2024

MACIEJ BĘLCIK, MONIKA NOWAKOWSKA, MARCIN WDOWIKOWSKI

DOI 10.36119/15.2025.7-8.9

W artykule przeanalizowano przypadek ekstremalnych opadów atmosferycznych, które wystąpiły 2 sierpnia 2024 roku we Wrocławiu. Zjawisko to doprowadziło do licznych podtopień, zakłóceń komunikacyjnych oraz interwencji służb ratunkowych. Celem badania było określenie przestrzennego rozkładu intensywności opadów, ich wpływu na infrastrukturę miejską oraz identyfikacja obszarów szczególnie narażonych na powodzie błyskawiczne. Do analizy wykorzystano dane z 37 stacji opadowych, w tym 36 prywatnych (PWS) oraz państwowej stacji IMGW-PIB. Zastosowano interpolację metodą kriginu, tworząc mapę rozkładu wysokości opadów. Najwyższe wartości – powyżej 100 mm – odnotowano w północno-zachodnich dzielnicach miasta. Dane o 36 interwencjach Państwowej Straży Pożarnej zostały skorelowane z wynikami interpolacji opadów. Przy użyciu narzędzia Scalgo Live, przeprowadzono analizę hydrologiczną, określając objętość odpływu powierzchniowego, infiltracji i retencji. W ponad połowie lokalizacji infiltracja nie przekroczyła 15%, co wskazuje na silne uszczelnienie nawierzchni. Potwierdzono potrzebę modernizacji systemu kanalizacji deszczowej oraz wdrażania błękitno-zielonej infrastruktury we Wrocławiu. Wykazano również przydatność prywatnych stacji meteorologicznych w skutecznym monitoringu zagrożeń pogodowych i planowaniu adaptacyjnym w miastach.

*Słowa kluczowe: opady ekstremalne, powódź błyskawiczna, hydrologia miejska, kriging, Prywatne Stacje Meteorologiczne*

The article analyzes the case of extreme precipitation that occurred on August 2, 2024, in Wrocław. This phenomenon led to numerous floods, transport disruptions, and emergency service interventions. The aim of the study was to determine the spatial distribution of rainfall intensity, its impact on urban infrastructure, and to identify areas particularly prone to flash floods. The analysis utilized data from 37 rain gauge stations, including 36 private stations (PWS) and a state station operated by IMGW-PIB. Kriging interpolation was applied to create a map of rainfall distribution. The highest values – exceeding 100 mm – were recorded in the northwestern districts of the city. Data on 36 interventions by the State Fire Service were correlated with the rainfall interpolation results. Using the Scalgo Live tool, a hydrological analysis was conducted to estimate the volume of surface runoff, infiltration, and retention. In more than half of the locations, infiltration did not exceed 15%, indicating a high degree of surface sealing. The need to modernize the stormwater drainage system and to implement blue-green infrastructure in Wrocław was confirmed. The study also demonstrated the usefulness of private meteorological stations in effectively monitoring weather-related hazards and supporting adaptive planning in cities.

*Keywords: extreme precipitation, flash flood, urban hydrology, kriging, Personal Weather Stations*

## Wstęp

Postępujące w ostatnich latach zmiany klimatyczne skutkują coraz większą intensywnością i częstotliwością opadów nawalnych, których występowanie w środowisku miejskim prowadzi do gwałtowne-

go wzrostu odpływu powierzchniowego i ryzyka wystąpienia powodzi błyskawicznych (tzw. flash floods). Tego typu zjawiska są szczególnie niebezpieczne w silnie zurbanizowanych obszarach, gdzie wysoki stopień uszczelnienia powierzchni ogranicza infiltrację i przeciąża

system kanalizacji deszczowej [1, 3, 14]. Ich skutki obejmują m.in.: podtopienia budynków, zalania ulic, wiaduktów i infrastruktury technicznej – często na tyle poważne, że wymagają natychmiastowej interwencji służb miejskich oraz ratunkowych.

dr inż. Maciej Bęlcik <https://orcid.org/0000-0001-7652-6031>; [maciej.belcik@pwr.edu.pl](mailto:maciej.belcik@pwr.edu.pl),

dr inż. Monika Nowakowska <https://orcid.org/0000-0002-6406-4447>,

dr inż. Marcin Wdowikowski <https://orcid.org/0000-0003-2693-0946>; [marcin.wdowikowski@pwr.edu.pl](mailto:marcin.wdowikowski@pwr.edu.pl) – Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska.

Adres do korespondencji / Corresponding author: [monika.nowakowska@pwr.edu.pl](mailto:monika.nowakowska@pwr.edu.pl)

W przypadku ekstremalnych opadów, to właśnie Państwowa Straż Pożarna (PSP) najczęściej podejmuje działania związane z zabezpieczaniem zalanych obiektów, wypompowywaniem wody, udrażnianiem przepustów i ewakuacją osób z zagrożonych terenów. Każdorazowo w przypadku wystąpienia nawalnych opadów atmosferycznych pojawiają się doniesienia o setkach interwencji strażaków, którzy na objętym zagrożeniem terenie ratują mienie, zabezpieczają budynki oraz przywracają drożność komunikacyjną ulic [7, 20]. Skala i częstotliwość tego typu zdarzeń wskazują, że powódzie błyskawiczne stają się systemowym wyzwaniem nie tylko hydrologicznym, ale również organizacyjnym i logistycznym dla zarządzania kryzysowego miast.

W odpowiedzi na te zagrożenia, coraz większe znaczenie zyskuje błękitno-zielona infrastruktura (ang. Blue-Green Infrastructure – BGI), która łączy rozwiązania oparte na przyrodzie z systemami technicznymi, umożliwiając spowolnienie odpływu, retencję wód opadowych i ograniczenie przeciążeń systemów kanalizacyjnych [4, 10-11]. Kluczową rolę odgrywają również tereny „rozszczelnione” – takie jak nawierzchnie przepuszczalne, zieleń miejska, ogrody deszczowe czy systemy infiltracyjne – które poprawiają bilans wodny i zwiększają odporność terenów zurbanizowanych na nagłe zdarzenia opadowe [21].

Niezwykle ważnym narzędziem w zarządzaniu ryzykiem powodzi błyskawicznych są wysokiej rozdzielczości dane meteorologiczne. Obok oficjalnych danych IMGW-PIB, coraz szersze zastosowanie znajdują sieci prywatnych stacji meteorologicznych (ang. Personal Weather Stations – PWS), których dane są agregowane przez platformy takie jak: Weather Underground [24], Weatherlink [25] czy Netatmo [23]. Tego rodzaju informacje – rejestrowane z dużą częstotliwością i dostępne niemal w czasie rzeczywistym – pozwalają na dokładniejszą lokalizację i analizę ekstremalnych zjawisk opadowych, szczególnie w gęsto zabudowanych obszarach miejskich [2, 16, 26].

## Kontekst meteorologiczny

Przechodząca nad Polską w pierwszych dniach sierpnia 2024 roku strefa ulewnych opadów deszczu spowodowała, że IMGW-PIB aż w trzech województwach wydał pomarańczowe ostrzeżenia przed silnym deszczem z burzami. Dla Wrocławia i większej części Dolnego Śląska obowiązywały ostrzeżenia I i II stop-

nia zagrożenia przed nawalnymi opadami i burzami [19].

Prognozy pogody na 2 sierpnia 2024 r. informowały, że południową i zachodnią Polskę zdominuje płytki niż, który będzie się zbliżał z południa Niemiec. Nasz kraj był również w zasięgu strefy zanikającego ciepłego frontu, południowe krańce ciepłego sektora były zasobne w wilgoć, jednak większość energii, a przez to chmur i opadów, pojawił się wokół centrum niżu. Nadal mocno uwodniony front (bo po przejściu burz i silnych opadów nad południowymi Niemcami i Alpami), a do tego powolny, przez co obfity w deszczę długotrwały, wraz ze stopniowym napływem ciepłego powietrza z południa i południowego wschodu oznaczał wolną wędrówkę wzdłuż linii Sudetów. Na znacznym obszarze kraju spodziewano się około 30-60 mm wody deszczowej, a lokalnie niewykluczone opady powyżej 70 mm w ciągu doby. Część prognoz sugerowała opad całkowity w okolicach 100 mm, jednak ten wariant uznawano za mało prawdopodobny. Poza deszczem, możli-

Wrocławia, takie jak: Zarząd Dróg i Utrzymania Miasta (ZDIUM), Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne (MPK) i Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji (MPWiK). Wsparcie kryzysowe potrzebne było w różnych miejscach Wrocławia w celu usunięcia wody nie tylko z piwnic domostw i garaży podziemnych, ale też do udrażniania zatłoczonych studzienek sieci kanalizacji deszczowej, gdzie nawalna woda naniosiła piasek i zanieczyszczenia, które wpłynęły znacząco na przepustowość urządzeń [9, 12, 19]. Duże utrudnienia stanowiły zalane przejazdy pod wiaduktami kolejowymi, które tworzą obszary infrastruktury krytycznej o bardzo wysokim wpływie, gdzie wg normy PN-EN 752 [5] dopuszczalna częstość wylewów na powierzchnię terenu wynosi 1 raz na 50 lat. Zgodnie z danymi IMGW-PIB opublikowanymi dzień później, tj. 3 sierpnia 2024 r. [8], wysokość opadu na stacji meteorologicznej zlokalizowanej na lotnisku Wrocław-Strachowice wynosiła 77,1 mm (rysunek 1). Dotychczasowy maksymalny opad dobowy wynosił 74 mm.

Rys. 1. Wysokości opadu w dniach 2-3.08.2024 r. wg danych IMGW-PIB (Wrocław 77,1 mm) [8]  
Fig. 1: Rainfall totals on August 2-3, 2024, according to IMWM-NRI data (Wrocław: 77.1 mm) [8]



we miały być także lokalne burze, w większości wbudowane w strefę opadów i zachmurzenia frontowego [18-19, 22].

W następstwie intensywnych opadów deszczu we Wrocławiu, jakie pojawiły się w piątek 2 sierpnia 2024 roku, doszło do paraliżu komunikacyjnego miasta. Z powodu wody na ulicach trzeba było wprowadzić zmiany w kursowaniu komunikacji miejskiej, a kierowcy mieli problemy z przejazdem. Odnotowano wielokrotne interwencje ekip PSP oraz jednostek zarządzanych przez Miejskie Centrum Zarządzania

## Metodyka badań

Wyboru epizodu opadowego dokonano w oparciu o wysoką intensywność opadu atmosferycznego, który wystąpił w okresie od ok. godziny 14:00 dnia 2 sierpnia do około 1:00 w dniu 3 sierpnia 2024 roku. Opad ten został poprzedzony wydanym przez IMGW-PIB ostrzeżeniem II stopnia przed silnymi opadami deszczu oraz burzami. Skutkiem opadu był paraliż komunikacyjny Wrocławia, który był wynikiem wezbrań i wylań z miejskiej sieci

kanalizacji deszczowej. W efekcie zanotowano liczne interwencje jednostek PSP na terenie miasta i w jego bezpośredniej okolicy.

Materiał do badań stanowiły dane opadowe zarejestrowane przez deszczomierze rozmieszczone na terenie miasta Wrocławia oraz w jego okolicy. Pod uwagę wzięto wysokość deszczu zarejestrowaną w godzinach między 6:00 UTC dnia 2 sierpnia 2024 roku, a 6:00 UTC dnia 3 sierpnia 2024 roku, zgodnie z danymi ze stacji meteorologicznej Wrocław-Strachowice IMGW-PIB. Wśród punktów pomiarowych, wykorzystano 36 deszczomierzy PWS (prywatne stacje meteorologiczne), podłączonych do sieci Wunderground.com [24], co dało wraz ze stacją IMGW-PIB w sumie 37 deszczomierzy zlokalizowanych na terenie miasta oraz w okolicy. Zasadność i wiarygodność danych pozyskanych z prywatnych stacji meteorologicznych na terenie Wrocławia wykazano w artykule Nowakowska i inni [16]. Rozmieszczenie deszczomierzy przedstawiono na rysunku 2, a reprezentacyjne wartości danych zestawiono w tabeli 1.

Symulacji przestrzennej danych opadowych dokonano przy wykorzystaniu programu Golden Software SURFER v.13 [6, 17], z modułem interpolacji metodą krigingu. Wiarygodność zastosowanej metody została potwierdzona w badaniach wykonanych przez Nowakowską [15, 16], nawet na małej liczbie punktów pomiarowych. Metoda krigingu pozwala na utworzenie mapy na podstawie nieregularnie rozłożonych danych pomiarowych (o parametrach X,Y,Z) [13]. Utworzenie mapy wymaga istnienia regularnej

**Tabela 1. Stacje PWS na obszarze badań (opracowanie własne na podstawie [24])**  
**Table 1. PWS stations in the study area (own elaboration based on source [24])**

Numer stacji	ID Stacji	Miejscowość	Ulica	Latitude	Longitude
1	ISMOLE18	Smolec	Cynamonowa	51.069N	16.890E
2	IWROCA52	Wrocław	Osiniecka	51.121N	16.894E
3	IWROCAW66	Wrocław	Piekarska	51.176N	16.911E
4	IWROCA67	Wrocław	Postępowa / Rakietowa	51.098N	16.938E
5	IWROCA96	Wrocław	M. Wolfkego	51.159N	16.873E
6	IWYSOK6	Wysoka	Jaworowa	51.050N	16.996E
7	IWROCAW54	Wrocław	Szałwiowa 15	51.176N	17.000E
8	IWROCAW62	Wrocław	Jaskółcza 27	51.136N	17.087E
9	IWROCA47	Wrocław	A. Oppmana 3	51.142N	17.049E
10	IWROCA37	Wrocław	A. Vivaldiego 44	51.052N	17.062E
11	IWROCA64	Wrocław	Marcepanowa 2 / Czekoladowa	51.062N	16.976E
12	IWROCA46	Wrocław	Cukrowa 18	51.062N	16.981E
13	IDSOLTAS9	Wrocław	Oboźna	51.058N	17.039E
14	IWROCA100	Wrocław	Oboźna	51.057N	17.037E
15	IERNIK1	Żerniki Wrocławskie	Miodowa 2	51.030N	17.062E
16	IWROCA27	Wrocław	Pieszycza 15	51.076N	17.047E
17	IWROCA50	Wrocław	Inowrocławska	51.114N	17.014E
18	IWROCA99	Wrocław	Jerzego Bajana	51.128N	16.963E
19	IWROCA89	Wrocław	Wojrowicka	51.114N	16.958E
20	ISMOLE7	Smolec	Jarzębinowa	51.080N	16.901E
21	IWROCA104	Wrocław	Mrożna	51.135N	17.137E
22	IWROCA91	Wrocław	Ludwika Kubali	51.157N	17.037E
23	IWROCA124	Wrocław	Nasienna	51.148N	16.943E
24	ISMOLE23	Smolec	Kresowa	51.071N	16.891E
25	ILZA2	Bielany Wrocławskie	Rycerska	51.033N	16.995E
26	IWROCA126	Wrocław	Godfryda Linkego	51.063N	17.063E
27	IWROCA127	Wrocław	Januszowicka	51.082N	17.013E
28	IWROCA109	Wrocław	Tczewska	51.132N	17.104E
29	IWILCZ11	Wilczyce	Stormy	51.129N	17.158E
30	IWROCA141	Wrocław	Kukurydziana	51.176N	16.918E
31	IWROCA144	Wrocław	Kaparowa	51.179N	17.001E
32	IWROCA153	Wrocław	Czapla	51.135N	17.093E
33	IWROCA95	Wrocław	Kącka	51.141N	16.870E
34	IWROCA38	Wrocław	Władysława Zarembowicza	51.108N	16.889E
35	IRADWA4	Radwanice	Szeroka	51.053N	17.107E
36	ISIECH3	Siechnice	Stanisława Staszica	51.024N	17.158E
37	IMGW-PIB	Wrocław-Strachowice	Lotnisko	51.105N	16.900E



**Rys. 2. Rozmieszczenie deszczomierzy na mapie Wrocławia: punkty czerwone – 36 stacji PWS, punkt niebieski – stacja IMGW-PIB**  
**Fig. 2. Distribution of rain gauges on the map of Wrocław: red points – 36 stations PWS, blue point – station IMGW-PIB**

siatki wartości dla prezentowanej powierzchni, a proces przetworzenia nieregularnie położonych punktów na regularną siatkę wartości nazywany jest gridingiem. Proces ten polega na interpolacji wartości funkcji w węzłach regularnej siatki na podstawie wartości funkcji w węzłach wejściowych. Do wygenerowania mapy

opadu zastosowano metodę odwrotnych odległości do potęgi (ang. Inverse Distance to a Power – IDP), która pozwala na ważoną interpolację uśredniającą wartości intensywności opadów zwłaszcza przy małej liczbie punktów wejściowych. Opisana metoda bywa także nazywana metodą wagową [13]. Metoda IDP pozwala na

interpolowanie wartości, a nie na ich ekstrapolację, co oznacza, że otrzymane wyniki nie będą większe od najwyższej zmierzonej, ani niższe od najmniejszej zmierzonej, co nie pozwala na przewidywanie badanego zjawiska.

Zestawienie danych dotyczących interwencji PSP we Wrocławiu i okolicach, w związku z wystąpieniem zalań i podtopień, pozyskano z Komendy Wojewódzkiej Państwowej Straży Pożarnej we Wrocławiu w dniu 19 sierpnia 2024 roku w ramach dostępu do danych publicznych. Wśród otrzymanej listy interwencji zweryfikowano łącznie 36 zdarzeń, których bezpośrednim skutkiem było wystąpienie intensywnych opadów deszczu. Spośród zweryfikowanych zdarzeń 23 miały miejsce na terenie Wrocławia, a kolejne 13 poza granicami administracyjnymi miasta, ale w jego bezpośredniej okolicy. Miejsca te przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3.**  
Zestawienie graficzne miejsc interwencji PSP w dn. 2-3.08.2024

**Fig. 3: Graphical summary of the State Fire Service intervention locations on August 2-3, 2024**

- obszary o wysokiej przepuszczalności (dla wartości wskaźnika powyżej 45%);
- obszary o średniej przepuszczalności (dla wartości w zakresie od 15 do 45%);
- oraz obszary o niskiej przepuszczalności (dla wartości wskaźnika poniżej 15%).

### Analiza wyników

Na podstawie danych pozyskanych z PWS wykonano symulacje kriggingowe dla epizodu opadowego z dnia 2 sierpnia 2024 roku. Symulację wykonano dla obszaru całego miasta Wrocławia oraz jego bezpośredniej okolicy w zakresie współrzędnych od 50.97N do 51.22N oraz od 16.80E do 17.25E. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 4-7. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że najwyższe opady atmosferyczne wystąpiły w północno zachodniej części badanego obszaru, gdzie uzyskane

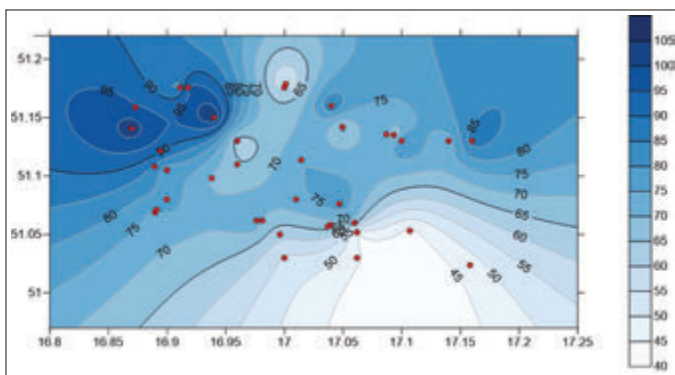
Dla każdej z pozycji określono współrzędne wystąpienia i naniesiono na mapę uzyskaną metodą krigingu, w celu skorelowania wysokości opadu z miejscami występowania zalań i podtopień. Dla każdej z interwencji straży pożarnej odczytano wartość wysokości opadu dla miejsca wystąpienia, a następnie przeanalizowano objętość opadu atmosferycznego dla danego obszaru.

Analizy objętości opadu dokonano przy użyciu oprogramowania Scalgo Live, czyli zaawansowanej platformy internetowej umożliwiającej interaktywną analizę danych przestrzennych z wykorzystaniem cyfrowych modeli terenu o wysokiej rozdzielczości. Oprogramowanie pozwala na przygotowanie analiz hydrologicznych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z ruchem wód powierzchniowych i zagrożeniem powodziowym. Scalgo Live wykorzystuje algorytmy analizy topograficznej oparte na danych rastrowych i sieciach przepływu w celu identyfikacji kierunków spływu, obszarów zlewni, strumieni wód opadowych oraz potencjalnych miejsc retencji wody. W programie zidentyfikowano zróżnicowanie powierzchni terenu przypisując im odpowiednie uśrednione współczynniki spływu ( $\Psi$ ). Powierzchniom przepuszczalnym, takim jak np. trawniki, pola, sady i lasy przypisano współczynnik  $\Psi = 0,1$ , natomiast powierzchniom nieprzepuszczalnym typu dachy, drogi asfaltowe oraz chodniki i parkingi z kostki betonowej –  $\Psi = 0,9$ . Dla każdego z analizowanych obszarów objętych numerycznym modelem terenu oraz odczytanej z krigingu wysokości opadu, wyznaczono powierzchnię zlewni oraz trzech wartości objętości wód opadowych dla danej zlewni podlegających: spływowi powierzchniowemu (1), infiltracji lub odprowadzeniu (2), retencji w naturalnych bądź sztucznych zagłębieniach terenu (3). Na podstawie analizy objętości wody wyznaczono wskaźnik ilości wody infiltrowanej do gruntu na podstawie przeliczenia przedstawionego poniżej:

$$\text{wskaźnik wody infiltrowanej do gruntu} = \frac{\text{infiltracja do terenów przepuszczalnych [m}^3]}{\text{objętość wód opadowych [m}^3]} \cdot 100, [\%]$$

Na podstawie uzyskanych wartości dla poszczególnych obszarów zaproponowano podział ich na 3 kategorie:

**Rys. 4.**  
Symulacja czasowo-przestrzenna wysokości opadu z dnia 2 sierpnia 2024 na podstawie 37 punktów pomiarowych – SURFER



**Rys. 5.**  
Wyniki symulacji czasowo-przestrzennej wysokości opadu z dnia 2 sierpnia 2024 nałożone na mapę Wrocławia – QGIS



**Rys. 6.**  
Miejsca interwencji Państwowej Straży Pożarnej w dniach 2-3 sierpnia 2024 roku związane z wylaniami wód opadowych





Rys. 7. Połączenie kriginu opadów z interwencjami PSP na mapie – QGIS  
Fig. 7: Integration of kriging results with State Fire Service interventions on the map – QGIS

w symulacji wysokości opadu przekroczyły 90 mm, sięgając nawet powyżej 100 mm. Wysokie wartości wystąpiły także w północno-wschodniej części badanego obszaru, gdzie wysokości opadu osiągnęły wartość 85 mm. W centralnej części obszaru, tj. w centrum Wrocławia, wysokość opadu uzyskanego podczas symulacji wy-

niosła od 60 do 75 mm. Najniższe wysokości opadów wystąpiły w południowej i południowo-wschodniej części obszaru badawczego, kształtowały się na poziomie od 45 do 65 mm.

Na tak wykonaną symulację kriginu opadów atmosferycznych naniesiono punkty zidentyfikowane jako miejsca inter-

wencji straży pożarnych związanych z wylaniami z kanałów oraz niemożliwością odprowadzenia wód opadowych przez system kanalizacyjny. Mapę przedstawiającą punkty interwencji straży pożarnej przedstawiono na rysunku 6. Dla każdego z punktów odczytano wysokość opadu, który wystąpił w tym miejscu. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 2.

Miejsca interwencji PSP pokrywają się z wynikami symulacji czasowo-przestrzennej wysokości opadów, znajdując się w obszarach, w których wykryto najwyższe ich wartości i skupiając się w północnej, centralnej i zachodniej części badanego obszaru. Wysokości opadu uzyskane w ramach symulacji w tych miejscach wahają się od ok. 65 mm w centralnej i północnej części, przez 75-85 mm w północno-wschodniej i zachodniej części, aż po 90-100 mm w północno-zachodniej części badanego obszaru.

Na podstawie odczytanych wysokości dokonano analizy hydrologicznej przy użyciu oprogramowania Scalgo Live. Przy pomocy modułu analizy powodzi błyskawicznych dla punktów interwencji straży pożarnej oraz odczytanej z symulacji wysokości opadu wyznaczono: powierzchnię zlewni, objętość wody spływającej po powierzchniach uszczelnionych (spływ powierzchniowy), objętość wody infiltrowanej do terenów przepuszczalnych, objętość wody retencjonowanej w naturalnych i sztucznych zagłębieniach terenu oraz całkowitą objętość wód opadowych na obszarze zlewni. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wskaźnik wody infiltrowanej do gruntu. Wyniki analiz zestawiono w tabeli 3.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że najwyższe procentowe wartości infiltracji wód opadowych do gruntu (przekraczające 45%) uzyskano jedynie dla 4 lokalizacji (co stanowi 11% badanych punktów). Uzyskane wartości wahały się od 47,24% do 90%, przy czym wartość 90% uzyskano dla terenów bunkrów przy ulicy Radarowej w Pietrzykowicach. W przypadku dwóch z tych punktów (ul. Nowogródzka 62 i Ignuta 63) wysoka wartość uzyskana podczas analizy wynikała z niezaktualizowanej mapy rastrowej terenu, na której powstały nowe osiedla, z tego względu obszar ten był podczas analizy traktowany jako przepuszczalny mimo, że takim nie był. Dla zdecydowanej większości, bo 19 z 36 lokalizacji (53% badanych punktów), wartość procentowa objętości wody infiltrowanej nie przekroczyła 15%, co świadczy o bardzo wysokim stopniu uszczelnienia terenu, w wyniku którego woda opadowa musiała być

Tabela 2. Wysokość opadu atmosferycznego w miejscu interwencji jednostek straży pożarnej odczytana na podstawie symulacji czasowo-przestrzennej

Table 2: Precipitation height at the locations of fire service interventions, based on spatiotemporal simulation data

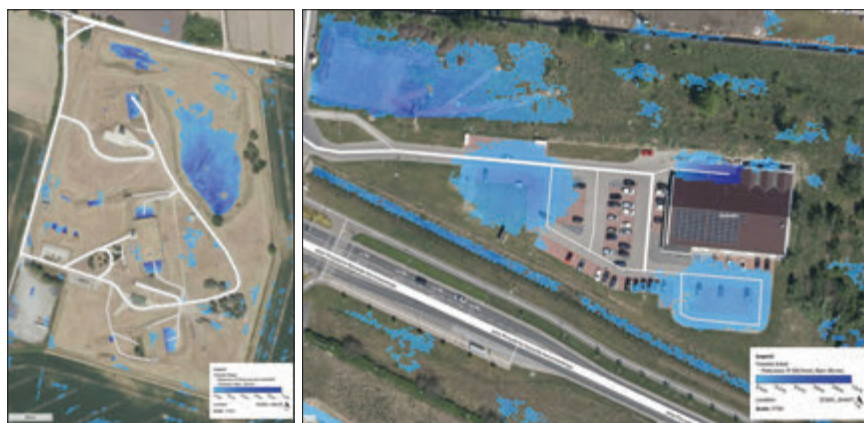
Nr punktu	Długość geogr.	Szerokość geogr.	Wysokość opadu [mm]	Adres
1	16,822657	51,077515	85,08	Małkowice ul. Wąska 8
2	16,826704	51,078202	85,02	Małkowice ul. Szkolna 26A
3	16,866867	51,054990	75,93	Pietrzykowice ul. Radarowa 15 (BUNKRY)
4	16,894279	51,079652	78,53	Smolec ul. Chłopska 39
5	16,896951	51,080187	78,58	Smolec ul. Łąkowa 3 i 20
6	16,900006	51,084539	78,51	Smolec ul. Orzechowa 57
7	16,911001	51,085990	75,72	Smolec ul. Marmurowa 6-7
8	16,909397	51,086983	76,10	Smolec ul. Wrzosa 1a
9	16,859771	51,189986	92,05	Wilkszyn ul. Pogodna 4
10	16,883239	51,145766	97,90	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Żółta 14
11	16,902076	51,154706	93,98	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Arbusowa 3
12	16,928098	51,152790	100,61	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Suwalska 2b
13	16,954598	51,129961	68,37	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Stargardzka 1
14	16,965116	51,138746	68,84	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Dokerska 2-5
15	16,965361	51,140384	69,96	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Dokerska 7c
16	17,033050	51,117391	72,84	Wrocław (Wrocław-Śródmieście) ul. Stanisława Dubois 7
17	17,034282	51,121526	71,90	Wrocław (Wrocław-Śródmieście) ul. Kazimierza Jagiellończyka 11a
18	17,158782	51,128841	86,27	Wilczyce ul. Spokojna 7A
19	17,197183	51,197810	84,09	Długoleka ul. Wrocławska 6d
20	17,200367	51,179577	84,02	Długoleka ul. Robotnicza 68
21	17,124010	51,10984	71,49	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. Chałupnicza 65
22	17,115360	51,12666	76,20	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. Kowalska 143
23	17,138460	51,14001	76,05	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. Nowogródzka 62
24	16,920270	51,16643	96,36	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Łukowska 8b
25	16,921660	51,16586	97,05	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Łukowska 18
26	16,882330	51,12702	95,71	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Piotłonowa 17
27	16,869860	51,14647	100,84	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Walska 2
28	16,956530	51,00696	59,93	Domasław ul. Kwiatowa 75
29	16,968300	51,14291	70,31	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Piotra Ignuta 63
30	16,967900	51,14423	71,26	Wrocław (Wrocław-Fabryczna) ul. Piotra Ignuta 30
31	16,998600	51,17562	58,36	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. Cynamonowa 14a
32	16,999720	51,18165	54,29	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. Waniliowa 35
33	17,058300	51,14039	68,03	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. gen. Józefa Wybickiego 25
34	17,063840	51,13558	69,88	Wrocław (Wrocław-Psie Pole) ul. Jana Długosza 48
35	17,083560	51,08035	64,71	Wrocław (Wrocław-Krzyki) ul. Wadowicka 10
36	16,995600	51,09904	71,63	Wrocław ul. Grabiszynska 167

**Tabela 3. Wyniki analiz wykonanych przy użyciu Scalgo Live**  
**Table 3: Results of analyses performed using Scalgo Live**

Nr punktu	Wysokość opadu [mm]	Powierzchnia zlewni [ha]	Spyw powierzchniowy [m <sup>3</sup> ]	Infiltracja do terenów przepuszczalnych [m <sup>3</sup> ]	Retencja wody w zagłębieniach terenu [m <sup>3</sup> ]	Objętość wód opadowych [m <sup>3</sup> ]	Wskaźnik wody infiltrowanej do gruntu
1	85,08	1,1900	468,77	283,85	258,62	1 011,24	28,07%
2	85,02	0,1271	85,46	10,80	11,77	108,03	10,00%
3	75,93	3,4700	211,79	2 373,27	51,91	2 636,97	90,00%
4	78,53	0,7714	469,69	107,78	28,08	605,55	17,80%
5	78,58	0,8748	205,65	213,19	268,75	687,59	31,01%
6	78,51	0,1916	121,59	15,04	13,77	150,40	10,00%
7	75,72	0,5606	339,17	55,64	29,56	424,37	13,11%
8	76,10	0,2936	131,17	22,34	69,92	223,43	10,00%
9	92,05	0,7596	484,75	125,81	89,03	699,59	17,98%
10	97,90	0,2089	163,89	27,11	14,51	205,51	13,19%
11	93,98	0,4131	218,78	38,83	130,70	388,31	10,00%
12	100,61	0,2925	27,01	29,43	237,82	294,26	10,00%
13	68,37	3,8900	1 922,00	279,91	458,17	2 660,08	10,52%
14	68,84	0,1750	100,27	12,76	7,38	120,41	10,60%
15	69,96	0,1937	0,00	13,56	122,03	135,59	10,00%
16	72,84	0,9022	509,57	65,68	81,55	656,80	10,00%
17	71,90	2,4800	1 260,63	332,54	192,97	1 786,14	18,62%
18	86,27	0,8574	581,29	74,48	84,17	739,94	10,07%
19	84,09	1,9300	1 073,57	356,28	197,15	1 627,00	21,90%
20	84,02	0,8984	478,38	195,99	81,19	755,56	25,94%
21	71,49	0,7699	481,71	64,43	4,34	550,48	11,70%
22	76,20	12,0000	4 937,76	2 009,13	2 369,71	9 316,60	21,57%
23	76,05	0,5934	0,00	352,48	99,10	451,58	78,05%
24	96,36	2,0300	1 343,44	195,38	413,47	1 952,29	10,01%
25	97,05	0,1511	0,00	14,67	132,05	146,72	10,00%
26	95,71	0,4448	59,60	217,43	112,65	389,68	55,80%
27	100,84	0,4975	439,63	56,28	5,58	501,49	11,22%
28	59,93	1,1500	60,77	223,04	402,10	685,91	32,52%
29	70,31	0,2103	0,00	69,84	78,00	147,84	47,24%
30	71,26	2,7100	904,79	397,62	628,90	1 931,31	20,59%
31	58,36	1,4500	517,58	145,78	180,58	843,94	17,27%
32	54,29	0,4784	125,71	25,98	108,08	259,77	10,00%
33	68,03	2,4600	666,00	167,14	838,23	1 671,37	10,00%
34	69,88	5,4400	1 726,35	704,35	1 372,21	3 802,91	18,52%
35	64,71	0,4975	194,04	32,19	95,65	321,88	10,00%
36	71,63	2,8000	642,09	505,23	854,26	2 001,58	25,24%

odbierana przez system kanalizacji miejskiej. W 13 lokalizacjach (36% badanych punktów) uzyskano wartości pomiędzy 15

a 40% objętości wody infiltrowanej, co sprawiło, że system kanalizacji miejskiej został częściowo odciążony poprzez wy-



**Rysunek 8:**

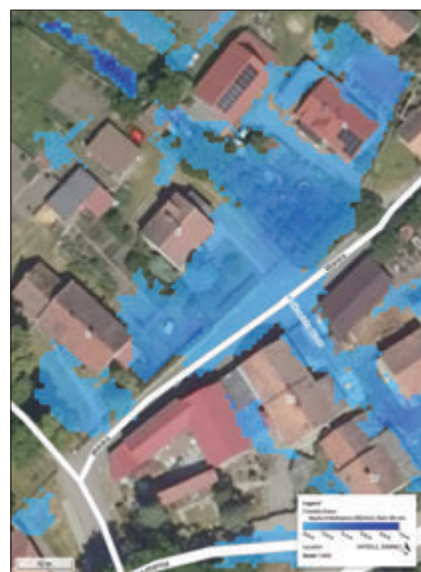
Wyniki analizy Scalgo Live; przykłady lokalizacji o wysokim poziomie przepuszczalności wód opadowych. Po lewej, lokalizacja nr 3, po prawej, lokalizacja nr 26 z tabeli 2  
**Fig. 8: Results of the Scalgo Live analysis; examples of locations with a high level of stormwater infiltration. On the left, location no. 3, on the right, location no. 26 from Table 2**

stępujące na tych terenach powierzchnie „rozszczelnione”, które były w stanie przyjąć część wody opadowej.

Dla wybranych lokalizacji w programie Scalgo Live wygenerowano grafiki przedstawiające obszary i głębokości zalań oraz miejsca gromadzenia się wody opadowej. Do analizy wybrano po 2 przypadki każdej z założonych sytuacji:

- lokalizacja o wysokiej przepuszczalności (> 45%);
- lokalizacja o średniej przepuszczalności (15-45%);
- lokalizacja o niskiej przepuszczalności (< 15%).

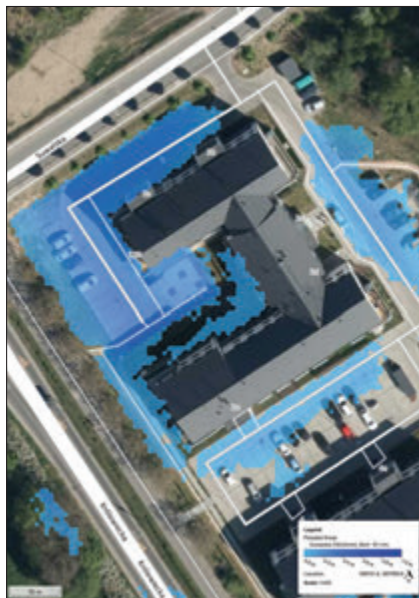
Wyniki przeprowadzonej analizy dla przykładowych lokalizacji należących do



**Rysunek 9:**

Wyniki analizy Scalgo Live; przykłady lokalizacji o średnim poziomie przepuszczalności wód opadowych. U góry, lokalizacja nr 1, na dole lokalizacja nr 36 z tabeli 2

**Fig. 9: Results of the Scalgo Live analysis; examples of locations with a medium level of stormwater infiltration. At the top, location no. 1, at the bottom, location no. 36 from Table 2.**



**Rysunek 10:** Wyniki analizy Scalgo Live; przykłady lokalizacji o niskim poziomie przepuszczalności wód opadowych. U góry lokalizacja nr 12, na dole lokalizacja nr 7 z tabeli 2  
**Fig. 10:** Results of the Scalgo Live analysis; examples of locations with a low level of stormwater infiltration. At the top, location no. 12, at the bottom, location no. 7 from Table 2.

każdej z grup przedstawiono na rysunkach 8-10.

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania dotyczące opadu z dnia 2 sierpnia 2024 r. zarejestrowanego na terenie Wrocławia wskazały obszary, w których w większości przypadków, bo aż 19 z 36, charakteryzują się niskim poziomem infiltracji – wynoszącym około 15% lub mniej. Można stwierdzić, że są to tereny nieprzepuszczalne, czyli obszary silnie zurbanizowane lub zabetonowane. Woda opadowa w tych rejonach niemal całkowicie spływa

powierzchniowo, a tylko niewielka jej część wnika w grunt. Do tej grupy należą lokalizacje nr: 2, 6-8, 10-16, 18, 21, 24, 25, 27, 32, 33 oraz 35.

Tereny częściowo przepuszczalne to obszary, na których infiltracja mieści się w zakresie od około 15% do 45% (13 punktów). Występuje tu zarówno spływ powierzchniowy, jak i częściowa zdolność gruntu do przyjmowania wody. Rejony te mogą obejmować miejskie tereny zielone, obszary użytkowane rolniczo lub inne o zróżnicowanym zagospodarowaniu. Do tej kategorii można zaliczyć lokalizacje o numerach: 1, 4, 5, 9, 17, 19, 20, 22, 28, 30, 31, 34 oraz 36.

Obszary zidentyfikowane na podstawie numerycznego modelu terenu i przy pomocy oprogramowania do modelowania hydrodynamicznego – SCALGO Live, mogą stanowić podstawę do opracowania mapy obszarów zagrożonych błyskawicznymi powodziąmi miejskimi. Tak opracowane mapy pozwolą na identyfikację obszarów o dużym ryzyku podtopień jak i miejsc lokalizacji elementów błękitno-zielonej infrastruktury, które w konsekwencji mogą przyczynić się do zmniejszenia zjawiska powodzi błyskawicznej. Aby zniwelować to zagrożenie należałoby dążyć do zwiększenia powierzchni terenów zielonych. Takie działania może być realizowane w szczególności poprzez: zadrzewienia, zmniejszenie udziału terenów o nieprzepuszczalnej nawierzchni, lokalizacja suchych lub mokrych zbiorników retencyjnych powierzchniowych lub podziemnych. Innymi rozwiązaniami mogą być też: budowa lokalnych studni chłonnych i dodatkowych systemów o dużej wydajności.

Powyższy podział pozwala na określenie dominujących procesów odpływu w analizowanych zlewniach i może służyć do dalszego planowania zagospodarowania przestrzennego lub działań retencyjnych.

Ekstremalny opad z dnia 2 sierpnia 2024 r., miejscami przekraczający 100 mm dobowej sumy, unaoczniał słabość miejskiej infrastruktury i systemu reagowania kryzysowego we Wrocławiu. Skoncentrowany w zachodnich i północnych dzielnicach deszcz doprowadził do licznych podtopień, zwłaszcza w przejazdach pod wiaduktami kolejowymi, dezorganizując transport publiczny i wydłużając czas dotarcia służb ratunkowych. Niedydolność kanalizacji deszczowej, potęgowana przez uszczelnione powierzchnie, spowodowała spiętrzenia i cofki, a PSP musiała interweniować aż 36 razy (w tym 23 w granicach miasta). Analiza Scalgo

Live potwierdziła, że w ponad połowie badanych lokalizacji infiltracja nie przekraczała 15%, co zwiększyło i przyspieszało spływ powierzchniowy i dodatkowo obciążało sieć odwadniającą.

Zaistniałe zagrożenia wskazują na pilną potrzebę kompleksowej modernizacji infrastruktury miejskiej Wrocławia jak i reformy zarządzania kryzysowego. Kluczowa jest aktualizacja miejskich planów reagowania, uwzględniająca scenariusze opadów ekstremalnych, wtórny paraliż komunikacyjny oraz awarie sieci kanalizacyjnej. Konieczne jest też zagęszczenie sieci pomiarowych opadów (w tym np. MPWiK, PWS) i wprowadzenie zintegrowanych, dynamicznych platform ostrzegania łączących dane meteorologiczne z modelami hydrologicznymi wykorzystującymi nowoczesne narzędzia informatyczne i systemy GIS, co umożliwi wcześniejsze zamknięcie newralgicznych odcinków dróg, powiadomienie mieszkańców i ochronę mienia.

Zgodnie z normą PN-EN 752 [5] projektowanie systemów odwadniających związane jest z założoną dopuszczalną częstotścią wystąpienia wylania na powierzchnię terenu, zatem podczas ekstremalnych opadów trudno jest uniknąć przeciążenia kanalizacji. Rozwiązaniem pozwalającym na zmniejszenie skutków i kosztów ponoszonych w wyniku ich występowania jest modernizacja istniejących systemów kanalizacji deszczowej, zwiększająca jej przepustowość, a co najważniejsze, stosowanie rozwiązań retencyjnych wody opadowe oraz konsekwentne rozwijanie elementów błękitno-zielonej infrastruktury (BZI). Ogrody deszczowe, zielone dachy, nawierzchnie wodoprzepuszczalne czy przyuliczne zbiorniki buforowe, które zwiększą lokalną infiltrację, pozwolą na gromadzenie wody opadowej lub jej przetrzymanie i opóźnienie odpływu, a tym samym na zmniejszenie obciążenia systemu kanalizacji.

Podsumowując, ekstremalne zjawiska pogodowe przestają być incydentalne i powinny być traktowane jako stały element planowania miejskiego. Tylko zintegrowane podejście łączące modernizację istniejącej infrastruktury oraz nowe inwestycje w BZI pozwolą ograniczyć ryzyko strat i zwiększyć odporność Wrocławia oraz innych aglomeracji miejskich na coraz częściej występujące zjawiska ekstremalne.

## LITERATURA

- [1] Agonafir, C., Lakhankar, T., Khanbilvardi, R., Krakauer, N., Radell, D., & Devineni, N.; A review of recent advances in urban flood research; Water Security; 2023; 19; 100141; DOI: 10.1016/j.wasec.2023.100141

- [2] Chen, A. B., Behl, M., & Goodall, J. L.; Assessing the trustworthiness of crowdsourced rainfall networks: A reputation system approach; *Water Resources Research*; 2021; 57; e2021WR029721; DOI: 10.1029/2021WR029721
- [3] Drożdżoń, R.; Powódź błyskawiczna – żywioł, który nie zna litości; *Obserwator. IMGW-PIB*; <https://obserwator.imgw.pl/2022/07/25/powodz-blyskawiczna-zywiol-ktory-nie-zna-litosci/>; Opublikowano 25 lipca 2022; Dostęp: 18.06.2025
- [4] Esraz-Ul-Zannat, M., Dedekorkut-Howes, A., & Morgan, E. A.; A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation; *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*; 2024; 15(5); e889; DOI: 10.1002/wcc.889
- [5] European Committee for Standardization (CEN); PN-EN 752:2008; Drain and sewer systems outside buildings; Brussels, Belgium: CEN; 2008
- [6] Galon Z.; Surfer. Podręcznik użytkownika; Gambit Centrum Oprogramowania i Szkoleń Sp. z o.o., Kraków 2014
- [7] Gawrysiak, L., Baran-Zgłobicka, B., & Zgłobicki, W.; Flash Floods Hazard to the Settlement Network versus Land Use Planning (Lublin Upland, East Poland); *Applied Sciences*; 2024; 14(18); 8425; DOI: 10.3390/app14188425
- [8] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB); *IMGW.pl*; <https://www.imgw.pl/>; Dostęp 15 października 2024.
- [9] Jakubczak J., Kwiatek K.; Ulewa i paraliż komunikacyjny we Wrocławiu. Zalane wiadukty i ulice. IMGW wydał ostrzeżenia II stopnia przed burzami; *Gazeta Wrocławska*; <https://gazetawroclawska.pl/ulewa-i-paraliz-komunikacyjny-we-wroclawiu-zalane-wiadukty-i-ulice-imgw-wydal-ostrzezenia-ii-stopnia-przed-burzami/ar/c1-18714617/>; Opublikowano 2 sierpnia 2024; Dostęp 18 lutego 2025.
- [10] Janik, L.; Polskie miasta na drodze adaptacji do zmian klimatu-przykłady Wrocławia i Radomia; *Problemy Rozwoju Miast*; 2021; 71; 69-77; DOI 10.51733/udi.2021.71.07
- [11] Januchta-Szostak, A.; Błękitno-zielona infrastruktura jako narzędzie adaptacji miast do zmian klimatu i zagospodarowania wód opadowych; *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Architektura, Urbanistyka, Architektura Wnętrz*; 2020; 3; 37-74; DOI: 10.21008/j.2658-2619.2020.3.3
- [12] Kwiatek K, Mielcarz J.; Ulewnie deszcze we Wrocławiu. Zalanych jest wiele miejsc; *Nasze-miasto.pl*; <https://wroclaw.nasze-miasto.pl/ulewnie-deszcze-we-wroclawiu-zalanych-jest-wiele-miejsc/ar/c1-9766415/>; Opublikowano 2 sierpnia 2024; Dostęp 18 lutego 2025.
- [13] Magnuszewska A.; GIS w geografii fizycznej; *Wydawnictwo Naukowe PWN*; Warszawa 1999.
- [14] Miller, J. D., & Hutchins, M.; The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom; *Journal of Hydrology: Regional Studies*; 2017; 12; 345-362; DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.06.006
- [15] Nowakowska M., Kaźmierczak B., Kotowski A.; Metodyka analizy przestrzennej zmienności opadów na przykładzie Wrocławia; *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska T. 3* (red. T. M. Traczewska); *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*; Wrocław 2013; s. 465–472.
- [16] Nowakowska, M. W., Bęlcik, M. K., Jawor, M. A., Wdowikowski, M. A.; Ocena możliwości zastosowania danych opadowych z prywatnych stacji meteorologicznych dla wybranych epizodów deszczowych na terenie Wrocławia; *Instal*; 2024; nr 11; s. 38-44; DOI: 10.36119/15.2024.11.4
- [17] Nowakowska M.W., Kotowski A.; Metodyka i zasady modelowania odwodnień terenów zurbanizowanych; *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*; Wrocław; 2017; 120.
- [18] Otwarte dane meteorologiczne i hydrologiczne; Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy; <https://danepubliczne.imgw.pl/>; Dostęp: 12 grudnia 2024.
- [19] Pasiewicz M, Szczyrba M.; Ulewa we Wrocławiu. Zalane ulice. IMGW wydał ostrzeżenia; *Wroclaw.pl*; <https://www.wroclaw.pl/dla-mieszkanca/ulewa-we-wroclawiu-zalane-ulice-imgw-wydal-ostrzezenie-2-stopnia-2-sierpnia>; Opublikowano 2 sierpnia 2024; Dostęp 18 lutego 2025.
- [20] Pińskwar, I., Choryński, A., Graczyk, D.; Risk of Flash Floods in Urban and Rural Municipalities Triggered by Intense Precipitation in Wielkopolska of Poland; *Int J Disaster Risk Sci*; 2023; 14, 440–457; DOI: 10.1007/s13753-023-00493-y
- [21] Przestrzelska, K., Wartalska, K., Rosińska, W., Jurasz, J., Kaźmierczak, B.; Climate resilient cities: a review of blue-green solutions worldwide; *Water Resources Management*; 2024; 38(15); 5885-5910; DOI: 10.1007/s11269-024-03950-5
- [22] Sieć Obserwatorów Burz; Prognoza burzowa na 2.08.2024 i noc z 2/3.08.2024; *Obserwatorzy.info*; <https://obserwatorzy.info/prognoza-burzowa-na-2-08-2024-i-noc-z-2-3-08-2024/>; Opublikowano 1 sierpnia 2024; Dostęp 18 lutego 2025.
- [23] Weather Map Netatmo; <https://weathermap.netatmo.com/>; Dostęp: 8.07.2025
- [24] Weather Underground. The Weather Company; <https://www.wunderground.com/>; Dostęp 10 września 2024.
- [25] Weatherlink; <https://www.weatherlink.com/>; Dostęp: 8.07.2025
- [26] de Vos, L., Leijnse, H., Overeem, A., Uijlenhoet, R.; The potential of urban rainfall monitoring with crowdsourced automatic weather stations in Amsterdam; *Hydrol. Earth Syst. Sci.*; 2017; 21; 765–777; DOI: 10.5194/hess-21-765-2017