

ANDRZEJ KOTOWSKI\*, BARTOSZ KAŻMIERCZAK\*, ANDRZEJ DANCEWICZ\*\*

## BEZPIECZNE WYMIAROWANIE KANALIZACJI NA PODSTAWIE LOKALNYCH MODELI OPADÓW

### SAFE SIZING OF SEWAGE SYSTEMS BASED ON THE LOCAL RAINFALL MODELS

#### Streszczenie

W artykule wykazano znaczne różnice ilościowe wysokości i intensywności opadów w różnych rejonach Wrocławia. Stwierdzono, że w rejonie stacji meteorologicznej Wrocław-Starachowice (na zachodzie miasta) występują wyższe wartości natężeń opadów o 15% w stosunku do rejonu stacji Wrocław-Swojec (na wschodzie). Wniosekowanie oparte na materiałach pochodzących z dwóch stacji może powodować jednak niedoszacowanie natężeń opadów w rejonach północnym i południowym miasta, na co wskazują wyższe wartości maksymalnych opadów dobowych na Psim Polu czy Oporowie. Badania wykazały, że obecna sieć pomiarowo-observacyjna nie spełnia zapotrzebowania na informacje niezbędne do projektowania bądź modernizacji, w tym modelowania hydrodynamicznego, systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej. Należy zatem zwiększyć liczbę stacji automatycznie rejestrujących wysokość opadów w czasie, co w efekcie przyczyni się do skuteczniejszej ochrony całej aglomeracji wrocławskiej przed lokalnymi wylewami z kanalizacji czy podtopieniami. Wykazano, że model opadów Błaszczyka, który jest jak dotychczas najczęściej stosowany do wymiarowania kanalizacji w Polsce, znacznie zaniża wyniki obliczeń miarodajnych natężeń deszczy – o około 40% dla rejonu Wrocławia-Starachowice i o 25% dla rejonu Wrocławia-Swojca. Nie powinien więc być stosowany w warunkach wrocławskich, a także szerzej – w Polsce.

*Słowa kluczowe: opad deszczu, natężenie deszczu, częstość występowania, model opadu*

#### Abstract

The paper shows substantial quantitative differences in precipitation amount and intensity in various region of Wrocław. It has been found that precipitation intensity values higher by 15% occur in the area around the metrological station Wrocław-Starachowice (the west side of the city) in relation to the area of Wrocław-Swojec station (the east side of the city). The inference based on materials from the two stations may however result in the underestimation of precipitation intensities in the north and south area of the city, which can be indicated by higher values of maximum daily precipitations in Psie Pole or Oporowo. The investigation has shown that the current measurement – observation network fails to meet information requirements, which are necessary to design and modernize sewage and combined sewage systems, including the hydrodynamic modeling. The number of metrological stations automatically recording precipitation amounts in time should be increased to provide more efficient protection of Wrocław and its suburbs against local sewage outflows and flooding. Furthermore, it has been indicated that the precipitation model of Błaszczyk, which, as for now, is the most frequently applied in sewage sizing in Poland, substantially underrates the values of representative rainfall intensities – by 40% for the area of Wrocław-Starachowice and by 25% for the area of Wrocław-Swojec. It therefore should not be used in conditions of Wrocław, and also wider in Poland.

*Keywords: rainfall, rainfall intensity, occurrence frequency, precipitation model*

\* Dr hab. inż. Andrzej Kotowski, mgr inż. Bartosz Kaźmierczak, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska.

\*\* Mgr Andrzej Dancewicz, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział we Wrocławiu.

## 1. Wstęp

Do projektowania czy modelowania hydrodynamicznego sieci odwodnieniowych w skali dużego miasta niezwykle ważna jest analiza historycznych danych o opadach, jako podstawa do opracowań technicznych dotyczących rozbudowy czy modernizacji ogólnospławnych i deszczowych systemów kanalizacyjnych. Zarówno krótkotrwałe opady nawalne o małym zasięgu, jak i długotrwałe opady o mniejszej intensywności, lecz o dużym zasięgu, mogą wywołać zniszczenia środowiskowe w miejskiej infrastrukturze. Występujące zalania czy podtopienia terenu są bowiem skutkiem braku możliwości odbioru przez system kanalizacyjny bądź odbiornik ekstremalnie dużych objętości wód opadowych. Wraz z postępującą urbanizacją – uszczelnieniem naturalnych terenów retencji wód opadowych w miastach – zjawiska te mogą się nasilać w przyszłości. Norma europejska PN-EN 752:2008 ogranicza częstość wylewów z kanalizacji do rzadkich powtarzalności ich występowania: raz na 10–50 lat. Dlatego tak ważne stają się obecnie systematyczne badania opadów do określenia statystycznej częstości ( $C$ ) występowania maksymalnych wysokości i natężeń jednostkowych deszczy. Niezbędny jest do tego odpowiednio długi materiał archiwalny z pomiarów opadów, w możliwie jak najgęstszej sieci obserwacyjnej. Natężenie deszczu nie jest bowiem stałe w czasie jego trwania, jak i w przestrzeni objętej opadem. Zjawiska te zmienne z natury są trudne do uogólnionego opisu, który jest jednak niezbędny do celów projektowych. Przedstawione w pracy wyniki badań czasoprzestrzennego zróżnicowania opadów atmosferycznych we Wrocławiu (na tle kraju) mają zwrócić uwagę na wagę problemu, jak i pomóc w prawidłowej interpretacji dostępnych danych o natężeniach (czy wysokościach) opadów do celów projektowych. Przykładowo, znajomość opadu normalnego na danym obszarze jest niezbędna do zastosowania modelu opadów Błaszczyka (z 1954 r.), który jest jak dotychczas najczęściej stosowany do wymiarowania kanalizacji [1, 2]. Model ten jednak znacznie zaniża miarodajne natężenia opadów – zmierzone m.in. we Wrocławiu [3] – powinien być zastąpiony nowymi modelami, najlepiej o zasięgu lokalnym – jak to zostanie wykazane na przykładzie aglomeracji wrocławskiej. W pracy [3] zaproponowano ujednoczenie zasad tworzenia modeli opadów, zarówno fizykalnych (dla  $C \leq 10$  lat), jak i probabilistycznych ( $C \leq 100$  lat), do zastosowania w innych aglomeracjach miejskich.

## 2. Czasoprzestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych w Polsce

Związki natężenia (intensywności czy wysokości) opadów deszczu z czasem trwania i częstością występowania opracowane dla wielu regionów geograficznych świata są zbliżone do siebie jakościowo [3, 4, 5]. Nie znaczy to wcale, że są one identyczne ilościowo, zwłaszcza w skali lokalnej. O reżimie opadowym określonego obszaru decyduje wiele uwarunkowań środowiskowych, spośród których do najważniejszych zalicza się położenie geograficzne, odległość od mórz i oceanów, ukształtowanie powierzchni i wyniesienie obszaru nad poziomem morza, pokrycie i sposób użytkowania terenu. Intensywne opady występujące w warunkach polskich (tab. 1) nie różnią się znacząco pod względem wysokości od notowanych w krajach ościennych, podobnie jak i opady we Wrocławiu (na Strachowicach) w porównaniu z Warszawą (na Bielanach) [3].

Tabela 1

Maksymalne wysokości opadów (w mm) o czasie trwania od 5 minut do 72 godzin w wybranych krajach Europy na tle Wrocławia (Strachowice) i Warszawy (Bielany)

Kraj/ Miejscowość	Czas trwania opadu											
	minuty				godziny					doby		
	5	10	15	30	1	2	3	6	12	1	2	3
<b>Polska</b>	<b>25,3</b>	<b>80</b>	<b>79,8</b>	<b>126</b>	<b>176,1</b>	<b>117,9</b>	<b>220</b>	<b>221,8</b>		<b>300</b>	<b>428</b>	<b>557</b>
Niemcy		126		40	200	239	246	112		312	379,9	458
Czechy	29,8	39,8	50,2	79,9	92,8	117	126,6	158,5	203,6	345,1	380	536,7
Węgry		64,2			120					260	288	
Słowenia			56	84	141	147	191	275	297	363	584	
Szwecja		28,5	50	49		114	185			276		
Norwegia	17,9	31,5		60	64,9			105	142,2	229,6	378,9	402,4
<b>Wrocław</b>	<b>13,1</b>	<b>18,7</b>	<b>24,7</b>	<b>32,9</b>	<b>35,3</b>	<b>57,7</b>	<b>61,9</b>	<b>63,1</b>	<b>64,2</b>	<b>80,1</b>	<b>103,9</b>	<b>116,9</b>
<b>Warszawa</b>	<b>20,6</b>	<b>21,9</b>	<b>28</b>	<b>36,6</b>	<b>40,8</b>	<b>49,5</b>	<b>50,4</b>	<b>57</b>	<b>68</b>	<b>80,1</b>	<b>109,7</b>	<b>113,3</b>

Pomiar opadu odbywa się w sposób punktowy w sieci stacji pomiarowych, co wymaga stosowania odpowiednich metod interpretacji uzyskanych wyników dla większych obszarów. W zależności od wielkości opracowywanego obszaru i zróżnicowania zakresu analizowanego zjawiska opadów (sumy roczne, dobowe czy godzinowe), w wyniku generalizacji zmienia się stopień dokładności odwzorowania ich czasoprzestrzennego rozkładu. Dla obszaru kraju czy też regionu izohiety wysokości czy natężeń opadów mają najczęściej w miarę regularny przebieg, podczas gdy w odwzorowaniach wykonanych dla niewielkich obszarów (np. aglomeracji) przebiegi izolinii stają się bardziej zawile (im wyższa jest gęstość sieci pomiarowej), silnie uzależnione od warunków środowiskowych. Stopniowo, w zależności od przyjętej skali odwzorowania/mapy, wzrasta więc dokładność i praktyczna przydatność otrzymywanych informacji o opadach do celów projektowych.

Przestrzenny rozkład natężeń opadów na obszarze kraju ujmuje model fizyczny Błaszczyka z 1954 r. [6], który jest wciąż najczęściej stosowany do wymiarowania kanalizacji w Polsce. Model ten, wzorowany na strukturze formuły Gorbaczewa, ma postać:

$$q = \frac{6,631\sqrt[3]{H^2C}}{t^{0,67}} \quad (1)$$

gdzie:

$q$  – jednostkowe („miarodajne”) natężenie deszczu [ $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ ],

$t$  – czas trwania deszczu [min],

$H$  – wysokość opadu normalnego [mm],

$C$  – częstość występowania deszczu o natężeniu  $q$  lub większym [lata].

Model Błaszczyka (1) oparty został na analizie statystycznej zbioru 79 silnych deszczy, ulew oraz deszczy nawalnych, spełniających kryterium (średniej) wysokości:  $h > t^{0,5}$  – dla  $t$  z całego okresu trwania deszczu, zarejestrowanych w Warszawie w latach 1837–1891 i 1914–1925, a podanych m.in. przez Pomianowskiego. Z łącznego okresu 67 lat obserwacji

analizie poddano jedynie opady z 37 lat – po odrzuceniu lat, w których nie odnotowano ani jednego silnego deszczu, ulewy bądź deszczu nawalnego. Zmienność opadów na obszarze kraju scharakteryzowano za pomocą opadu normalnego ( $H$ ), który jest jedynym czynnikiem różnicującym regionalny reżim opadowy w skali całej Polski.

Według dostępnych wydawnictw atlasowych i publikacji naukowych, w których do wyznaczenia wysokości opadów normalnych przyjmowane były różnorodne okresy wieloletnie i zróżnicowana liczba stacji, zamieszczane są różniące się bardziej lub mniej wartości średniego opadu rocznego na obszarze całego kraju [7, 8, 9]. Z informacji zawartych w analizowanych pracach wynika, że opad normalny dla przeważającej części Polski zawiera się w granicach od 500 do 700 mm. Dla wartości wieloletnich najwyższa średnia suma rocznych wysokości opadów sięga 1800 mm (Kasprowy Wierch), natomiast najniższa wynosi ok. 500 mm (Kujawy). W skali mapy kraju wysokość średniego rocznego opadu we Wrocławiu nieznacznie przekracza 550 mm. Przestrzenne zróżnicowanie wysokości opadów w skali makroregionu Dolnego Śląska uwarunkowane jest wyraźnie wysokością wyniesienia obszaru nad poziomem morza i rzeźbą terenu. Średnie roczne wysokości opadów podawane w wielu publikacjach [10, 11, 12] kształtują się w granicach: od nieco ponad 500 mm w dolinie Odry, do powyżej 1350 mm w Karkonoszach i Górach Izerskich. Szacowana wysokość średniego rocznego opadu w rejonie Wrocławia kształtuje się na poziomie 550–600 mm. W ujęciu regionalnym prezentacja przestrzennego zróżnicowania opadów atmosferycznych charakteryzuje się więc wzrostem dokładności odwzorowania, uwzględniającym już związek z miejscowymi warunkami środowiskowymi, tj. ukształtowaniem i rodzajem pokrycia terenu, siecią hydrograficzną, zabudową itp.

Pierwszą próbę opracowania atlasu opadów maksymalnych w skali Polski podjęto w 1987 roku pod redakcją Stachy [13], na podstawie materiałów z 10-letniego (1966–1975) okresu obserwacji opadów o ograniczonym do 2 godzin czasie trwania. Z pluwiogramów ze 121 stacji odczytywano wysokości opadów dla interwałów czasowych  $t = 5, 10, 15, 30, 60$  i 120 minut, które następnie zestawiano w ciągu nierosnące, skąd ustalano związki probabilistyczne typu:

$$h = \frac{a - b[-\ln(-\ln(1 - p))]}{t^n} \quad (2)$$

gdzie:

- $h$  – maksymalna wysokość opadu [mm],
- $a, b, n$  – współczynniki empiryczne (wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów) dla każdej stacji meteorologicznej z maksymalnych rocznych wysokości,
- $t$  – czas trwania deszczu [min],
- $p$  – prawdopodobieństwo przewyższenia:  $p \in (0; 1)$ .

Istotną wadą tego opracowania jest jednak zbyt krótki okres obserwacji opadów. Ponadto model (2) nie ma zastosowania dla prawdopodobieństwa  $p = 1$ , czyli częstości występowania opadów  $C = 1$  rok. W rezultacie w pracy [13] zamieszczono 12 map z izohietami maksymalnych wysokości opadów jedynie dla 3 prawdopodobieństw ( $p = 0,01, 0,1$  i  $0,5$ ) występowania i 4 czasów ( $t = 15, 30, 60$  i 120 minut) trwania deszczu. Należy jednak uznać ideę takiego opracowania dla Polski za cenną i wartą kontynuacji (na wzór atlasu KOSTRA).

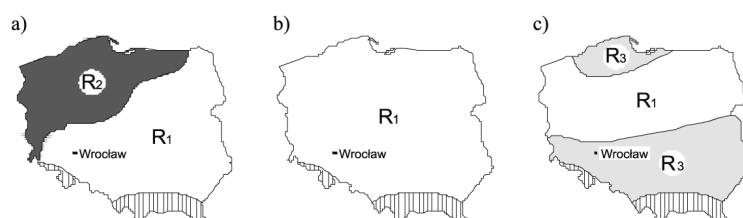
Bogdanowicz i Stachy [14] na podstawie ogólnopolskich pomiarów deszczu w latach 1960–1990 na 20 stacjach meteorologicznych IMGW opublikowali w 1998 roku tzw. charakterystyki projektowe opadów, w postaci modelu probabilistycznego maksymalnych wysokości, będącego kwantylem przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa (Weibulla EV3):

$$h = 1,42t^{0,33} + \alpha(-\ln p)^{0,584} \quad (3)$$

gdzie:

- $h$  – maksymalna wysokość opadu [mm],
- $t$  – czas trwania deszczu [min],
- $p$  – prawdopodobieństwo przewyższenia opadu:  $p \in (0;1]$ ,
- $\alpha$  – parametr (skali) zależny od regionu Polski i czasu  $t$  (rys. 1).

Do opracowania modelu (3) przyjęto za podstawę 31 maksymalnych opadów rocznych (po jednym – największym z każdego roku obserwacji) dla każdej z 20 stacji meteorologicznych, które następnie szeregowano wg nierosnących przedziałowych wartości wysokości opadów w 14 interwałach czasowych – od 5 minut do 72 godzin. Model (3) nie obejmuje obszarów górskich (zakresowane na rys. 1).



Rys. 1. Regiony opadów maksymalnych: a) dla czasów trwania deszczu  $t \in [5; 60]$  min; b) dla  $t \in [60; 720]$  min; c) dla  $t \in [720; 4320]$  min ( $R_1$  – region centralny;  $R_2$  – region północno-zachodni;  $R_3$  – regiony południowy i nadmorski)

Fig. 1. The maximum precipitation areas: a) for rainfall durations  $t \in [5; 60]$  min; b) for  $t \in [60; 720]$  min; c) for  $t \in [720; 4320]$  min ( $R_1$  – the central area;  $R_2$  – the north-west area;  $R_3$  – the south and seaside areas)

Dla prawdopodobieństw przewyższenia  $p < 1$  (czyli dla  $C > 1$ ), przykładowo w regionie centralnym ( $R_1$ ), parametr  $\alpha$  obliczany jest ze wzorów:

– dla  $t \in [5; 120]$  min

$$\alpha = 4,693 \ln(t+1) - 1,249, \quad (3a)$$

– dla  $t \in [120; 1080]$  min

$$\alpha = 2,223 \ln(t+1) + 10,639, \quad (3b)$$

– dla  $t \in [1080; 4320]$  min

$$\alpha = 3,01 \ln(t+1) + 5,173. \quad (3c)$$

Model Bogdanowicz i Stachy na maksymalną wysokość opadów jest jednak niespójny – obarczony dużym błędem co do wysokości opadów dla częstości deszczu pojawiających się raz na rok ( $C = 1$ ). Wykazano to w analizach porównawczych [1, 2] względem innych modeli opadów i udowodniono w pracy [3] – na podstawie wyników pomiarów wysokości opadów we Wrocławiu w tym samym okresie obserwacyjnym, tj. latach 1960–1990 (a także w dłuższym okresie 1960–2009). Łatwo tutaj wykazać, że z przekształcenia wzoru (3) do postaci wzoru na jednostkowe natężenie deszczu  $q$  (w  $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ ), dla  $C = 1$  otrzymamy:

$$q = 236,7 t^{-0,67}, \quad (4)$$

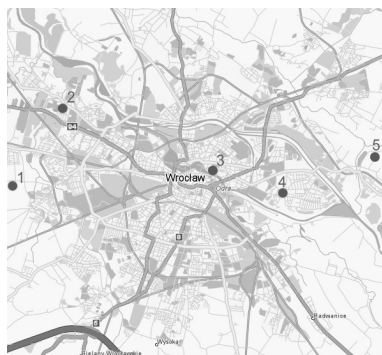
a ze wzoru Błaszczyka (1) dla  $C = 1$  rok i np.  $H = 600$  mm mamy:

$$q = 470 t^{-0,67} \quad (5)$$

– identyczne funkcje czasu  $t$ , różniące się wartością współczynnika aż dwukrotnie. Tak więc, wyniki obliczeń  $q$  ze wzoru (4) będą dwukrotnie mniejsze w stosunku do wzoru (5). Przykładowo, dla  $t = 15$  min i  $C = 1$  rok z modelu (3) Bogdanowicz-Stachy otrzymamy  $h_{15,1} = 3,5$  mm, stąd  $q_{15,1} = 38,6$  dm<sup>3</sup>/(s·ha), a z modelu (1) Błaszczyka  $q_{15,1} = 76,6$  dm<sup>3</sup>/(s·ha). Prowadzi to wprost do znacznego zaniżenia strumieni objętości ścieków deszczowych i w konsekwencji niedowymiarowania średnic kanałów i obiektów dla  $C = 1$  rok. Tak duże różnice wyników  $q$  są bezpośrednim następstwem nieodpowiednich założeń metodologicznych przyjętych w pracy [14], które doprowadziły do zaniżenia wartości dolnego ograniczenia (odpowiadającego  $C = 1$ ) przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa. Natomiast dla częstości deszczy  $C = 2, 5$  i 10 lat, z modelu Bogdanowicz i Stachy przykładowo dla regionu centralnej Polski ( $R_1$  – do którego zaliczony został Wrocław), otrzymujemy już zbliżone wartości natężenia deszczy względem zmierzonych we Wrocławiu – na stacji Strachowice [3].

### 3. Czasoprzestrzenne zróżnicowanie opadów w aglomeracji wrocławskiej

Tematyka czasoprzestrzennego zróżnicowania opadów atmosferycznych w skali aglomeracji wrocławskiej podejmowana była wielokrotnie. Zagadnienie interpretowano w szerokim zakresie, od analiz wyników pomiarów dla określonych stacji, po analizy syntetyczne dla całego obszaru miasta [3, 15–18]. W długoletniej historii pomiarów opadów atmosferycznych w rejonie miasta Wrocławia, sięgającej początków XVIII wieku (1717 r.), były one prowadzone na wielu stacjach, wśród których najdłuższe serie pomiarowe dostępne są dla 5 funkcjonujących obecnie stacji: 3 stacji IMGW (Starachowice, Stabłowice i Ogród Botaniczny) oraz stacji Uniwersytetu Wrocławskiego (Biskupin) i stacji Uniwersytetu Przyrodniczego (Swojec). Z rysunku 2 wynika, że obecne rozmieszczenie stacji opadowych na terenie Wrocławia jest nierównomierne. Stacje zlokalizowane są równoleżnikowo, w pasie środkowym. Tereny północne i południowe miasta nie są w ogóle objęte pomiarami.



Rys. 2. Rozmieszczenie stacji pomiarowych na terenie Wrocławia (1 – IMGW Wrocław–Strachowice, 2 – IMGW Wrocław–Stabłowice, 3 – IMGW Wrocław–Ogród Botaniczny, 4 – UWrocław–Biskupin, 5 – UP Wrocław–Swojec)

Fig. 2. The distribution of measurement stations in Wrocław (1 – IMGW Wrocław–Strachowice, 2 – IMGW Wrocław–Stabłowice, 3 – IMGW Wrocław–Botanical Garden, 4 – UWrocław–Biskupin, 5 – UP Wrocław–Swojec)



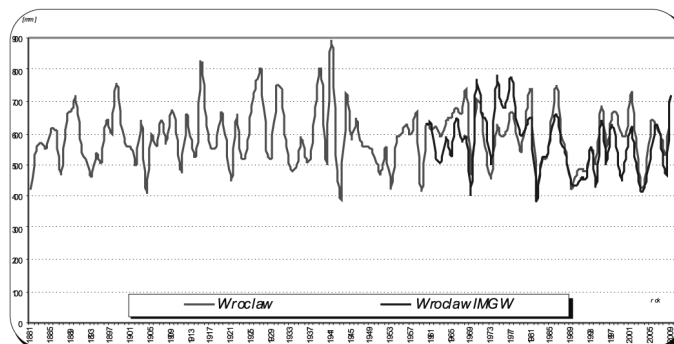
Publikowane wyniki badań średnich rocznych wysokości opadów dla Wrocławia przedstawiono w tabeli 2. Wyniki te pochodzą z różnych stacji i z różnych okresów pomiarowych. Z zestawienia wysokości opadów w jednakowym, wspólnym 10-leciu (1963–1972) wynika, że różnica średnich skrajnych sum na terenie Wrocławia wyniosła 83 mm (669 mm – Karłowice i 586 mm – Swojec), co stanowi ok. 15% średniej, 100-letniej „wrocławskiej serii opadowej” z lat 1881–1980, wynoszącej 593 mm.

Tabela 2

## Średnie roczne wysokości opadów (w mm) we Wrocławiu

Nazwa stacji	Okres analizy	Średnia roczna suma opadów	Źródło danych
Wrocławska seria opadowa	1881–1980	593	[19]
Wrocław–Krzyki	1891–1930	585	[20]
Wrocław–Psie Pole	1891–1930	572	[20]
Wrocław–Stabłowice	1891–1930	599	[20]
Wrocław–Biskupin	1961–1990	597	[21]
Wrocław–Strachowice	1961–1990	588	[21]
Wrocław–Swojec	1961–1990	573	[21]
Wrocław–Strachowice	1971–2000	569	[22]
Wrocław–Ogród Botaniczny	1971–2000	576	[22]
Wrocław–Stabłowice	1971–2000	568	[22]
Wrocław–Karłowice	1963–1972	669	[22]
Wrocław–Oporów	1963–1972	665	[22]
Wrocław–Psie Pole	1963–1972	645	[22]
Wrocław–Strachowice	1963–1972	598	[22]
Wrocław–Swojec	1963–1972	586	[23]
<b>Wrocław–Strachowice</b>	<b>1960–2009</b>	<b>568</b>	<b>[3]</b>
<b>Wrocław–Biskupin UW.</b>	<b>1960–2009</b>	<b>590</b>	<b>[3, 24]</b>
<b>Wrocławska seria opadowa</b>	<b>1881–2009</b>	<b>588</b>	<b>[3]</b>

Podane w tabeli 2 relacje i wartości opadów normalnych uległy w ostatnich dziesięcioleciach nieznacznej zmianie. Przykładowo, z własnej analizy [3] dla stacji IMGW Wrocław–Strachowice dla okresu 1960–2009 uzyskano średnią 568 mm (porównaj: 588 mm dla lat 1961–1990). W tym samym okresie (1960–2009) średnia dla stacji UW. Wrocław–Biskupin wyniosła 590 mm (porównaj: 597 mm dla lat 1961–1990). Wskazuje to na nieznaczny spadek rocznych wysokości opadów w ostatnich dziesięcioleciach dla obu porównywanych stacji. Potwierdza to tym samym główne cechy charakteryzujące opady – ich okresową i przestrzenną zmienność, co uwidacznia się na przykładzie Wrocławia. Porównywane stacje zlokalizowane są bowiem w różnych częściach Wrocławia, a wzajemna odległość pomiędzy nimi wynosi ok. 20 km (rys. 2).



Rys. 3. Roczne wysokości opadów dla wrocławskiej serii opadowej w latach 1881–2009 oraz serii Wrocław-IMGW (Starachowice) w latach 1960–2009

Fig. 3. The annual precipitation amounts for Wrocław rainfall series in years 1881–2009 and Wrocław-IMGW (Starachowice) series in years 1960–2009

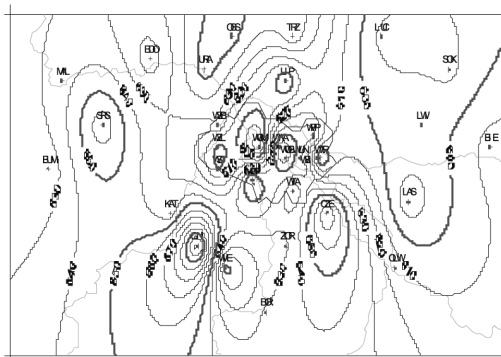
Na rysunku 3 zobrazowano przebieg opadów atmosferycznych na stacji IMGW Wrocław–Strachowice w okresie 1960–2009 na tle serii pomiarowej opadów we Wrocławiu za lata 1881–2009 [3]. Materiały dla 129-letniej „wrocławskiej serii opadowej” zawierają połączone przedwojenne wyniki pochodzące ze stacji zlokalizowanych w rejonie Uniwersytetu, Ogrodu Botanicznego, Krzyków, Gądowa Małego, a dla okresu powojennego głównie z Biskupina. Przebieg opadów w porównywanym okresie 1960–2009 jest zasadniczo zgodny, a występujące odstępstwa przypisać należy naturalnej zmienności przestrzennej opadów. Średnia dla „wrocławskiej serii opadowej” za 129-letni okres obserwacji (1881–2009) wynosi 588 mm, a równanie linii trendu przyjmuje postać:

$$H = 587,2 + 0,0061x, \quad (6)$$

przy współczynniku korelacji  $R = 0,0024$ , co świadczy praktycznie o braku trendu zmian wysokości opadów ( $H$ ) na przestrzeni 129 lat.

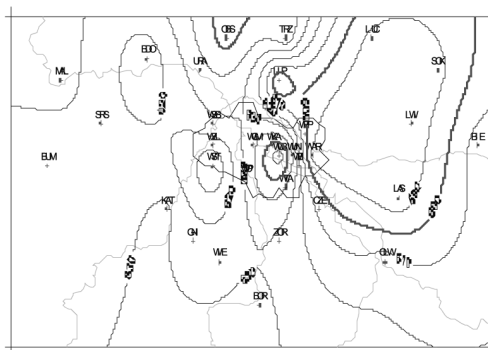
W badanym czasie 1960–2009 maksymalna dobowa suma wysokości opadów w sztywnym przedziale czasu dla stacji Wrocław–Strachowice wyniosła 74,4 mm (za ruchomy okres 24-godzinny wyniosła już 80,1 mm [3]). Analizując szerzej opady maksymalne występujące na terenie Wrocławia w latach 1960–2009, stwierdzono, że najwyższa dobowość opadów wyniosła 115 mm (17.07.1965 r.) na stacji Wrocław–Psie Pole – co przewyższa o 55% najwyższą zmierzoną dotychczas dobowość opadów na stacji Strachowice. Nieznacznie niższa suma, bo 110,4 mm, wystąpiła (10.08.1964 r.) na stacji Wrocław–Oporów. Widać zatem wyraźnie, jak duże jest zróżnicowanie czasoprzestrzenne opadów na obszarze aglomeracji wrocławskiej, co w efekcie może powodować okresowe przeciążenia sieci kanalizacyjnej w różnych rejonach miasta. Fakt ten zobowiązuje nas do stałego monitorowania zjawiska opadów na całym obszarze miasta, w znacznie gęstszej niż dotychczasowa sieci obserwacyjnej.





Rys. 4. Średnie roczne wysokości opadów (w mm) w rejonie aglomeracji wrocławskiej w latach 1963–1972 opracowane na podstawie pomiarów z 32 stacji

Fig. 4. The mean annual precipitation amounts (in mm) for Wrocław and its suburbs in years 1963–1972 developed on the basis of measurements from 32 stations



Rys. 5. Średnie roczne wysokości opadów (w mm) w rejonie aglomeracji wrocławskiej w latach 1963–1972 opracowane na podstawie pomiarów z 19 stacji

Fig. 5. The mean annual precipitation amounts (in mm) for Wrocław and its suburbs in years 1963–1972 developed on the basis of measurements from 19 stations

W badaniach nad przestrzennym zróżnicowaniem opadów w otoczeniu aglomeracji wrocławskiej, przeprowadzonych w pracy [15], wykorzystano wyniki pomiarów opadów z 32 stacji funkcjonujących w latach 1963–1972 na terenie Wrocławia i w promieniu około 40 km wokół miasta. Porównanie przeprowadzono w odniesieniu do liczby funkcjonujących obecnie 19 stacji (17 stacji IMGW oraz Swojec UP i Biskupin UWr.) – po redukcji sieci IMGW w latach 90. Uzyskane wyniki potwierdziły tezę, iż zmniejszenie liczby stacji pomiarowych powoduje znaczną utratę informacji o rzeczywistej wysokości opadów na badanym obszarze oraz zbyt dużą generalizację przebiegu izohiet (porównaj rys. 4 i 5). Wskazane jest zatem, aby dla obszarów zurbanizowanych gęstość sieci pomiarowej opadów była możliwie jak największa.

#### 4. Natężenia opadów krótkotrwałych we Wrocławiu

W przypadku prac projektowych nad rozbudową bądź modernizacją istniejącej sieci kanalizacji ogólnospławnej czy deszczowej niezwykle istotne są charakterystyki natężeń deszczy o czasie trwania poniżej 6 godzin. Informacje takie rejestrowane są na tradycyjnych (papierowych) zapisach pluwiograficznych, a od kilku lat także w formacie cyfrowym – z deszczomierzy automatycznych. Sieć zaledwie trzech stacji pomiarowych o ciągłej rejestracji opadów we Wrocławiu (Strachowice, Swojec i Biskupin) jest z pewnością za rzadka i należy dążyć do jej zagęszczenia (co najmniej podwojenia), z uwzględnieniem przy lokalizacji nowych stacji charakterystycznych lokalnych cech zurbanizowanego środowiska – szczególnie w części południowej i północnej miasta (rys. 2). Jak dotychczas, obszernych analiz obserwacji pluwiograficznych, pod kątem przydatności do celów projektowych, doczekały się materiały archiwalne pochodzące ze stacji IMGW Wrocław–Starachowice [3] oraz ze stacji Wrocław–Swojec [18]. Opracowanie materiałów zgromadzonych w archiwum Zakładu Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego mogłoby być pomocne do projektowania odwodnień terenów, w tym modelowania hydrodynamicznego kanalizacji w centralnej części miasta Wrocławia. Lokalne różnice wysokości opadów krótkotrwałych w skali aglomeracji wykazać więc można dla Wrocławia–Strachowic i Wrocławia–Swojca na podstawie porównania wyników obliczeń natężeń deszczy z modeli opracowanych dla tych rejonów miasta, na tle wyników uzyskiwanych z modeli o zasięgu ogólnopolskim, tj. modelu (1) Błaszczyka z 1954 r. (dla  $H = 590$  mm), który jest wciąż najczęściej stosowany do wymiarowania kanalizacji w Polsce, czy też z modelu (3) Bogdanowicz i Stachy z 1998 r. W pracy [3], dla danych pluwiograficznych ze stacji meteorologicznej IMGW Wrocław–Strachowice, z okresu 1960–2009, wyodrębniono 514 opadów – spełniających kryterium wysokości  $h \geq 0,75t^{0,5}$  – w 16 przedziałach czasowych ich trwania (od 5 minut do 72 godzin). Na tej podstawie opracowano dwa modele (fizyczny i probabilistyczny) na maksymalną wysokość opadów. Model fizyczny maksymalnych natężeń opadów na Strachowicach dla  $t \in [5; 4320]$  minut i  $C \in [1; 10]$  lat, ma postać:

$$q = 166,7[(6,67 + 1,677 \ln(C - 0,53))(t - 3,45)^{0,265}]t^{-1} \quad (7)$$

a model probabilistyczny, oparty na kwantylu rozkładu prawdopodobieństwa Fishera-Tippetta typ III<sub>min</sub>, dla  $t \in [5; 4320]$  minut i  $C \in [1; 100]$  lat, przyjmuje postać:

$$q = 166,7[-4,583 + 7,412t^{0,242} + (97,105t^{0,0222} - 98,675)(-\ln p)^{0,809}]t^{-1} \quad (7a)$$

gdzie:

- $q$  – jednostkowe (maksymalne) natężenie opadu [ $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ ],
- $C$  – częstość występowania deszczu o danym natężeniu (z przewyższeniem) [lata],
- $t$  – czas trwania opadu [min],
- $p$  – prawdopodobieństwo przewyższenia opadu:  $p \in [0; 1]$ .

Licznar i Łomotowski dla danych pluwiograficznych ze stacji meteorologicznej UP Wrocław–Swojec, z okresu 1975–2002, wyodrębnili 959 opadów, przyjmując kryterium wysokości  $h \geq 1,3$  mm dla czasu trwania  $t \leq 6$  godzin. Na tej podstawie wyestymowali współczynniki empiryczne różnych postaci modeli fizycznych opadów – na średnie oraz na maksymalne natężenia deszczy (te ostatnie z pośród 662 największych opadów) o  $t \leq 180$  min i  $C = 1, 2, 5$  i 10 lat. Dla opadów maksymalnych na Swojcu model Licznara-Łomotowskiego ma postać [18]:

$$q = \frac{a}{(t+b)^n} + c \quad (8)$$

gdzie:

- $q$  – jednostkowe (maksymalne) natężenie opadu [ $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ ],
- $t$  – czas trwania deszczu [min],
- $a, b, c, n$  – współczynniki regresji, zależne od prawdopodobieństwa  $p$ , wg tabeli 3.

Tabela 3

Wartości współczynników  $a, b, c, n$  do modelu (8)

Prawdopodobieństwo $p$ , %			
10% ( $C = 10$ lat)	20% ( $C = 5$ lat)	50% ( $C = 2$ lata)	100% ( $C = 1$ rok)
$a = 713,8329$	$a = 82413,63$	$a = 643645564$	$a = 1573,239$
$b = -3,88429$	$b = 19,57292$	$b = 64,88700$	$b = 4,787518$
$c = -210,067$	$c = 20,40978$	$c = 20,62691$	$c = 6,351722$
$n = 0,218073$	$n = 1,752958$	$n = 3,535880$	$n = 0,949642$

W tabeli 4 przedstawiono wyniki obliczeń maksymalnych natężeń deszczu ( $q$ ) z modeli fizycznych: Błaszczyka (1) dla  $H = 590$  mm oraz opracowanych dla Wrocławia–Strachowic (7) i Wrocławia–Swojca (8), a także z modeli probabilistycznych – dla Wrocławia–Strachowic (7a) i Bogdanowicz–Stachy (3) – dla regionu centralnej Polski ( $R_1$ ), w zakresie wybranych częstości występowania ( $C = 1$ –10 lat) i czasów trwania opadów ( $t = 15$ –180 min). Do celów porównawczych przyjęto wynik obliczeń natężenia opadów z modelu Błaszczyka (1) za 100%. Względne przewyższenia wyników obliczeń ( $q$ ) z innych modeli względem modelu Błaszczyka ( $q/q_{(1)}$ ) zaznaczono pogrubioną czcionką. Z tabeli 4 wynika, że wszystkie analizowane modele znacznie przewyższają wyniki obliczeń natężeń deszczu z modelu Błaszczyka. Przewyższenia te są ogólnie różne w różnych zakresach  $t$  i  $C$ . W skrajnych przypadkach sięgają nawet 60%. Jedynie dla  $C = 1$  rok można wskazać na znaczne, bo o ok. 50%, zniżenie wyników obliczeń  $q$  z modelu Bogdanowicz–Stachy względem modelu Błaszczyka. Lokalne różnice natężeń opadów maksymalnych we Wrocławiu są znaczne. Ogólnie w zachodnich rejonach miasta (ściślej na Strachowicach) występują wyższe wartości natężeń opadów, o ok. 15%, w stosunku do wschodnich rejonów miasta Wrocławia (ściślej Swojca). Model Błaszczyka (1), który jest wciąż najczęściej stosowany do wymiarowania kanalizacji w Polsce, znacznie zaniża wyniki obliczeń miarodajnych natężeń deszczu występujących we Wrocławiu – średnio o 44% wg modelu fizycznego (7) i o 41% wg modelu probabilistycznego (7a) – dla rejonu Strachowic oraz o 25% wg modelu fizycznego (8) Licznara–Łomotowskiego – dla rejonu Swojca (tab. 4).

Tabela 4

Porównanie wyników obliczeń maksymalnych natężeń deszczy ( $q$  w  $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ ) z modeli fizykalnych i probabilistycznych dla Wrocławia–Strachowic i Wrocławia–Swojca

Częstość występowania opadu, $C$	Czas trwania opadu, $t$	Modele fizykalne				Modele probabilistyczne					
		Model (1) Błaszczyka dla $H = 590$ mm	Model (7) dla Wrocławia–Strachowic	Model (8) dla Wrocławia–Swojca	Model (7a) dla Wrocławia–Strachowic	Model (3) Bogdanowicz–Stachy dla regionu $R_1$					
		$q_{(1)}$	$q_{(7)}$	$q_{(8)}$	$q_{(7a)}$	$q_{(3)}$					
lata	min		$q_{(7)}/q_{(1)}$	$q_{(8)}/q_{(7)}$	$q_{(7a)}/q_{(1)}$	$q_{(3)}/q_{(1)}$					
	1	15	76,0	114,8	1,51	98,8	1,30	107,7	1,42	38,6	0,51
		30	47,7	71,7	1,50	60,4	1,27	68,3	1,43	24,2	0,51
		60	30,0	43,8	1,46	36,3	1,21	42,7	1,42	15,2	0,51
		120	18,9	26,5	1,40	22,4	1,19	26,4	1,40	9,6	0,51
		180	14,4	19,7	1,37	17,4	1,21	19,9	1,38	7,3	0,51
		15	95,7	155,4	1,62	141,3	1,48	144,4	1,51	144,1	1,50
	2	30	60,2	96,9	1,61	86,3	1,43	93,3	1,55	90,9	1,51
		60	37,8	59,2	1,57	45,5	1,20	58,6	1,55	55,7	1,47
		120	23,8	35,8	1,50	26,8	1,13	36,0	1,51	33,4	1,40
		180	18,1	26,7	1,48	22,9	1,27	27,0	1,49	23,9	1,32
15		129,9	194,8	1,50	185,9	1,43	180,3	1,39	211,1	1,62	
30		81,6	121,4	1,49	108,4	1,43	117,7	1,44	133,3	1,63	
5	60	51,3	74,2	1,45	58,8	1,15	74,0	1,44	81,4	1,59	
	120	32,3	44,9	1,39	34,7	1,07	45,4	1,41	48,6	1,50	
	180	24,6	33,4	1,36	28,1	1,14	33,9	1,38	34,4	1,40	
	15	163,7	221,4	1,35	212,1	1,30	204,7	1,25	251,3	1,54	
	30	102,9	138,0	1,34	140,4	1,36	134,3	1,31	158,7	1,54	
	60	64,6	84,3	1,30	86,5	1,34	84,6	1,31	96,8	1,50	
10	120	40,6	51,1	1,26	43,0	1,06	51,8	1,28	57,6	1,42	
	180	31,0	38,0	1,23	21,1	0,68	38,6	1,25	40,7	1,31	

## 5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że na przestrzeni 129 lat (1881–2009) średnie roczne wysokości opadów we Wrocławiu nie wykazują istotnego trendu zmian. Tak więc przyczyn coraz częściej występujących wylewów z kanalizacji czy podtopień należy upatrywać głównie w niekorzystnych przyrodniczo zmianach w infrastrukturze miejskiej, gdzie w miejsce naturalnych powierzchni terenów retencjonujących wody opadowe wprowadza się w nadmiarze powierzchnie nieprzepuszczalne (beton, bruk, asfalt) i zwartą zabudowę, przez co zwiększa się objętość i prędkość spływu powierzchniowego. Skutkiem tego jest także zjawisko obniżania się poziomów wód podziemnych w miastach [25, 26].

Badania czasoprzestrzennego zróżnicowania opadów we Wrocławiu pod kątem określenia reprezentatywności stacji, wykazały, że obecna sieć pomiarowo-obszernyjna nie spełnia zapotrzebowania na oczekiwane informacje, niezbędne do projektowania bądź modernizacji systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej. Odnosi się to w szczególności do intensywnych opadów krótkotrwałych, stwarzających duże zagrożenie funkcjonowania kanalizacji (wylania). W pracy wykazano znaczne różnice natężeń opadów występujących na obszarze aglomeracji miasta Wrocławia. W szczególności wykazano, że w zachodniej części miasta – na Strachowicach występują wyższe wartości natężeń deszczy o ok. 15% w stosunku do Swojca – na wschodzie. Natężenia te mogą być jeszcze większe w innych rejonach miasta, na co wskazują wyższe wartości notowanych dobowych wysokości opadów, np. na Psim Polu (na północy) czy na Oporowie (na południu miasta). Tak więc w skali dużego miasta posługiwanie się danymi pochodzącymi tylko z jednej stacji (jak to się dotychczas robiło) może skutkować niedoszacowaniem wielkości spływu wód deszczowych, co wykazano na przykładzie aglomeracji wrocławskiej. Dążyć należy zatem do optymalnego pokrycia obszaru Wrocławia siecią stacji automatycznie rejestrujących wysokość opadu w czasie, co w lepszy sposób pozwoli projektować i modernizować miejską sieć kanalizacyjną (zwłaszcza na północy i południu). W wyniku tych działań poprawi się zabezpieczenie i ochrona terenów zurbanizowanych miasta Wrocławia przed lokalnymi wylewami z kanalizacji czy podtopieniami, wywołanymi wystąpieniem intensywnych opadów deszczu.

Model opadów Błaszczyka (z 1954r.), który jest wciąż najczęściej stosowany do wymiarowania kanalizacji w Polsce, znacznie zaniża wyniki obliczeń miarodajnych natężeń deszczy, a więc i strumieni objętości ścieków opadowych – o ok. 40% dla rejonu Wrocławia–Strachowic i o ok. 25% dla rejonu Wrocławia–Swojca. Nie powinien więc być stosowany w warunkach wrocławskich, ale także w Polsce. Wskazują na to wyniki obliczeń z modelu Bogdanowicz-Stachy (z 1998 r.) dla regionu centralnego ( $R_1$  – rys. 1), przewyższające obliczane z modelu Błaszczyka o ok. 50% dla  $C = 2, 5$  i 10 lat. Jednak dla  $C = 1$  rok model ten znacznie zaniża wyniki obliczeń miarodajnych natężeń deszczy, nawet w stosunku do modelu Błaszczyka.

Z punktu widzenia projektowania bezpiecznych w działaniu systemów kanalizacyjnych, właściwe jest tworzenie modeli na maksymalną wysokość opadów o zasięgu lokalnym, odrębnie dla każdej stacji meteorologicznej, a następnie na tej podstawie tworzenie map opadów na terenie całego kraju – na drodze interpolacji wyników pomiędzy stacjami. Próby tworzenia jednego uniwersalnego dla całej Polski modelu opadów (bądź nawet kilku – dla regionów kraju) i na tej podstawie tworzenie map opadów skazane jest na niepowodzenie, ze względu na zbyt małą dokładność takiej metody (efekt skali), a więc i małą przydatność do projektowania, co wykazano na przykładzie dwóch stacji meteorologicznych we Wrocławiu.

W celu uzyskania porównywalności tworzonych modeli opadów wyniki pomiarów wysokości opadów dla poszczególnych stacji meteorologicznych powinny być opracowywane i uogólniane jedną wspólną metodologią, którą proponuje się w pracy [3].

W dostosowaniu do wymagań normy PN-EN 752:2008 odnośnie do częstości projektowych deszczy w wymiarowaniu kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, do czasu opracowania szczegółowego atlasu opadów maksymalnych w Polsce (w oparciu o lokalne modele opadów), zaleca się [1, 3]:

- dla  $C = 1$  rok stosowanie modelu Błaszczyka (1) – jednak z niezbędną korektą częstości deszczy na  $C = 2$  lata bądź wiarygodnych modeli lokalnych, jak w przypadku Wrocławia: modelu (7) – dla zachodniej części miasta i modelu Licznara-Łomotowskiego (8) – dla wschodniej części miasta;
- dla częstości projektowych  $C = 2, 5$  i 10 lat stosowanie modelu Bogdanowicz-Stachy (3) bądź wiarygodnych modeli lokalnych, jak w przypadku Wrocławia: modeli (7) i (7a) dla zachodniej części miasta i modelu Licznara-Łomotowskiego (8) dla wschodniej części miasta;
- przy wymiarowaniu zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych, ze względu na ich wagę w zapewnieniu niezawodności działania systemów odwodnieniowych terenów, należy odpowiednio zwiększyć przyjmowane częstości opadów w stosunku do częstości projektowych wymiarowania sieci kanalizacyjnych ( $C_z > C$ ).

Projektowane systemy odwodnieniowe obejmujące zlewnie deszczowe o powierzchni  $F > 2$  km<sup>2</sup> proponuje się dodatkowo sprawdzać pod kątem ich przepustowości hydraulicznej (sieci i obiektów) opierając się na skalibrowanych modelach symulacyjnych – dla spełnienia zaleceń PN-EN 752:2008 co do akceptowalnych społecznie częstości wylewów ( $C_w \geq 10$  lat).

Badania zrealizowano ze środków finansowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przyznanych na działalność statutową Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej w 2008 i 2009 roku.

#### Literatura

- [1] Kotowski A., *Dyskusja nad zaleceniami normy PN-EN 752 odnośnie zasad wymiarowania odwodnień terenów w Polsce*, VI Zjazd Kanalizatorów Polskich POLKAN, Łódź 6–7.12.2007, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN 2007, nr 46, 27-37.
- [2] Kotowski A., Kaźmierczak B., *Ocena przydatności dotychczasowych wzorów na natężenie opadów deszczowych do projektowania odwodnień terenów w Polsce*, GWTS 2009, nr 11, 11-17.
- [3] Kotowski A., Kaźmierczak B., Danczewicz A., *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*, Wyd. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Studia z zakresu Inżynierii Sanitarnej (w druku), Warszawa 2010.
- [4] Świątecki A., *Analiza możliwości zastosowania typowych krzywych natężenia deszczów w funkcji czasu trwania opadu*, Prace i Studia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, t. 8, Warszawa 1965.
- [5] Prokop P., *Maksymalne opady oraz czas ich trwania na świecie i w Polsce*, Przegląd Geofizyczny 2006, R. LI, nr 2.



- [6] Błaszczyk W., *Spływy deszczowe w sieci kanalizacyjnej*, Wytyczne do normatywu, GWTS 1954, nr 9, 262-271.
- [7] IMGW: Atlas Klimatyczny Polski, PPWK, Warszawa 1973.
- [8] Lorec H. (red), *Atlas klimatu Polski*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005.
- [9] Kirschenstein M., Baranowski D., *Sumy opadów atmosferycznych w Polce w latach 1951–1995. Badanie Fizjograficzne nad Polską Zachodnią*, Seria A – Geografia Fizyczna 2005, t. 56, 55-72.
- [10] Praca zbiorowa: Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego. Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 1977.
- [11] Sobik M., *Klimat. Przyroda Dolnego Śląska*, PAN Oddz. Wrocław 2005, 39-57.
- [12] Bac S., Rojek M., *Warunki klimatyczne Dolnego Śląska. Rolnictwo na Dolnym Śląsku*. PWN, Warszawa 1984, 25-42.
- [13] Stachy J. (red.), *Atlas hydrologiczny Polski*, t. 1, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1987.
- [14] Bogdanowicz E., Stachy J., *Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe*, Materiały badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia, nr 23, Wyd. IMGW, Warszawa 1998.
- [15] Bac-Bronowicz J., Dancewicz A., *The density of precipitation network of urban area as a base for evaluating the interpretation of spatial differentiation of precipitation with the example of Wrocław agglomeration*, GIS Conference, By interoperability to mobility, January 23<sup>rd</sup> to 26<sup>th</sup> 2005, Ostrava-Poruba, Czech Republic.
- [16] Wołoszyn J., *Średnie natężenie, średni czas trwania i rozkład natężenia normalnych opadów we Wrocławiu*, Zeszyty Nauk. WSR we Wrocławiu, Melioracja 1961, nr 61, 23-41.
- [17] Sowiński M., *Wyznaczenie maksymalnego natężenia opadu o T-letnim okresie powtarzalności na przykładzie Wrocławia*, Wiadomości IMGW 1980, t. 6, z. 3–4, 117-126.
- [18] Licznar P., Łomotowski J., *Analiza chwilowych natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu*, Ochrona Środowiska, 2005, nr 2, 25-28.
- [19] Pyka J.L., *Temperatura i opady atmosferyczne we Wrocławiu w latach 1881–1980*, Acta Univ. Wrat., Wrocław 1991, Prace Inst. Geogr. Seria A, t. 6, 19-54.
- [20] Wiszniewski W., *Atlas opadów atmosferycznych w Polsce 1891–1930*, PIHM, Wyd. Komunikacyjne, Warszawa 1953.
- [21] Bac S., *Estimate of reliability of information on atmospheric precipitation*, Acta Univ. Wrat., Wrocław 1997, Prace Inst. Geogr. Seria C, t. 4, 163-170.
- [22] Zasoby archiwalne IMGW Oddział we Wrocławiu.
- [23] Zasoby archiwalne Uniwersytetu Przyrodniczego, IKiOŚ we Wrocławiu.
- [24] Zasoby archiwalne Uniwersytetu Wrocławskiego, ZMiK we Wrocławiu.
- [25] Worsa-Kozak M., Kotowski A., Wartalski A., *Monitoring stanów wód podziemnych w rejonie Śródmiejskiego Węzła Wodnego we Wrocławiu*, Przegląd Geolog, 2008, t. 56, nr 4, 302-307.
- [26] Schmitt T.G., *Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“*, DWA, Hennef 2000; Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.