

Modele opadowe w weryfikacji istniejącej koncepcji miejskiego systemu odprowadzania wód opadowych i roztopowych – studium przypadku

Rainfall models in the verification of the existing concept of urban rainwater and snowmelt drainage system – case study

PIOTR HŁADKI, KATARZYNA MISZTA-KRUK

DOI 10.36119/15.2025.10.9

Właściwe zaprojektowanie systemu kanalizacji deszczowej z uwagi na nieregularny i losowy charakter opadów, ciągle zmiany w strukturze zlewni, a w konsekwencji charakter odpływu jest trudnym zadaniem. Krótkotrwałe i ulewne deszcze coraz częściej przyczyniają się do przeciążenia systemów kanalizacyjnych w miastach, prowadząc do awarii, a nawet powodzi miejskich. Istniejące w wielu miastach koncepcje odwadniania tworzone w oparciu o historycznie rekomendowane wytyczne oraz dotychczas stosowane metody projektowania, a sprawdzane w oparciu o najnowsze dane opadowe, mogą nie wytrzymać próby czasu i nie sprostać wyzwaniom stawianym nowoczesnym systemom odprowadzania wód opadowych i roztopowych.

W artykule podjęto próbę oceny fragmentu sieci kanalizacji deszczowej jednego z miast w Polsce, która jest sukcesywnie realizowana w oparciu o istniejącą koncepcję powstałą w 2014 r., czyli przeszło 10 lat temu. Funkcjonowanie sieci przeanalizowano w modelu utworzonym w programie SWMM (Storm Water Management Model) obciążając go czterema scenariuszami opadowymi o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 20\%$ (częstotliwość występowania $C = 5$ lat, dla terenów miejskich wg PN-EN 752:2017-06) opracowanymi w oparciu o historyczne oraz aktualne dane o intensywnościach opadów. Przeanalizowane symulacje wskazały przewody osiągające maksymalne wypełnienie i tym samym działające ciśnieniowo, miejsca i momenty przepętnień sieci zmieniające się w zależności od przyjętego modelu opadowego.

Jako, że model nie został skalibrowany na podstawie rzeczywistych danych (przepływy w przewodach, chropowatości), otrzymane wyniki należy traktować w charakterze poglądowym.

Słowa kluczowe: wody opadowe i roztopowe; kanalizacja deszczowa; model hydrodynamiczny; modele opadowe; SWMM

The proper design of the stormwater drainage system, due to the irregular and random nature of rainfall, constant changes in the catchment structure and, consequently, the nature of runoff, is of concern. Short-lived and heavy rains are increasingly contributing to the overloading of sewer systems in cities, leading to failures and even urban flooding. Existing drainage concepts in many cities were created based on historically recommended guidelines and previously used design methods, tested against the latest rainfall data, may not stand the test of time and fail to meet the challenges posed by modern rainwater and snowmelt drainage systems.

The article attempts to evaluate a section of the stormwater drainage network of one city in Poland, which is being successively implemented based on an existing concept created in 2014, more than 10 years ago.

The functioning of the network was analysed in a model created in the Storm Water Management Model (SWMM) program by loading it with four rainfall scenarios with probability of exceedance $p = 20\%$ (frequency of occurrence $C = 5$ years, for urban areas according to PN-EN 752:2017-06) developed based on historical and current rainfall intensity data. Analysed simulations indicated conduits reaching maximum filling and thus acting pressurised, the locations and moments of network overflows changing depending on the adopted rainfall model.

As the model has not been calibrated based on real data (flows in the conduits, roughness), the results should be considered in an illustrative character.

Keywords: rainwater and snowmelt; storm sewers; hydrodynamic model; precipitation models; SWMM

Wprowadzenie

Planowanie rozbudowy sieci wodociągowych i kanalizacyjnych przez przed-

siębiorstwa jest uregulowane prawnie zgodnie z zapisami ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i odprowadzaniu ścieków [1]. W myśl art. 15 ustawy, przed-

siębiorstwo w odpowiedzi na zapotrzebowanie rozwoju infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej ujęte w zatwierdzonych przez gminę miejscowych planach

mgr inż. Piotr Hładki <https://orcid.org/0009-0007-3716-9407>, dr inż. Katarzyna Miszta-Kruk <https://orcid.org/0000-0002-6513-2528> – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych, Warszawa.
Adres do korespondencji/Corresponding author: piotr.hladki@pw.edu.pl

zagospodarowania przestrzennego, programuje zadania rozwoju i modernizacji sieci ustalając własny wieloletni plan. Opracowany dokument precyzuje m.in. zakres świadczonych usług wodociągowo-kanalizacyjnych, plan realizacji przedsięwzięć budowy urządzeń wodociągowych i kanalizacyjnych, racjonalizację zużycia wody oraz odprowadzania ścieków, nakłady i sposoby finansowania inwestycji.

Na potrzeby wykonania zadania kompleksowej lub szczegółowej rozbudowy sieci powstają projekty koncepcyjne tworzone przez przedsiębiorstwa lub na ich zlecenie przez podmioty zewnętrzne. Przyjęte opracowanie stanowi w późniejszym etapie podstawę do uzyskania zezwoleń i źródeł finansowania inwestycji.

Koncepcja rozbudowy sieci musi być zgodna z lokalnymi wytycznymi do projektowania i wykonawstwa, a swoim zakresem obejmuje przede wszystkim lokalizację (rozmieszczenie) przewodów, obliczenia hydrauliczne, na podstawie których ustalane są rzędne, średnice i spadki rurociągów, rozwiązania techniczne lub technologiczne, a także zestawienia materiałów i robót, etapy realizacji, analizę kosztów, koncepcję sterowania, monitoringu i inne. Tak przygotowana koncepcja, staje się wyznacznikiem rozwoju w przedsiębiorstwie na kilka lub nawet kilkanaście lat.

Zarys problematyki

W ostatnim czasie w Polsce coraz więcej środków przeznaczanych jest na inwestycje w infrastrukturę wodociągową i kanalizacyjną. Zmiany klimatyczne oraz wzrastająca świadomość proekologiczna w społeczeństwie stanowią zarówno wyznawania jak i są motorem napędowym dla podejmowanych inwestycji. W przedsiębiorstwach oprócz opracowywania nowych planów i strategii, sięga się często po te już uchwalone, ale jeszcze czekające na wdrożenie. Koncepcje budowy bądź rozbudowy sieci, powstałe w odpowiedzi na zapotrzebowanie postawione na etapie opracowań planistycznych dotyczących rozbudowy jednostki osadniczej, częstokroć wdrażane są w odległym horyzoncie czasu i możemy mówić tu nawet o kilku lub kilkunastu latach.

Założenia istniejącej koncepcji

Rozpatrywane miasto znajduje się w granicach aglomeracji warszawskiej, a koncepcja zagospodarowania wód opadowych została sporządzona dla całego obszaru. Teren miasta podzielono na zlewnie obsługiwane przez od-

dzielne oczyszczalnie wód deszczowych (OWD). Projektowana sieć przebiega zgodnie z układem komunikacyjnym i ma za zadanie odwadnianie powierzchni utwardzonych: nawierzchni ulic, chodników oraz podjazdów na posesję. Dodatkowo przewidziano możliwość przyłączenia odpływów z dachów i innych utwardzonych powierzchni (parkingi, place) z przyległych posesji. Przyjęto minimalne i maksymalne zagłębienia kanałów, policzono średnice, spadki (zapewniające prędkość samooczyszczenia kanałów przy 50% napełnieniu) i głębokości posadowienia przewodów sieci grawitacyjnej kanalizacji deszczowej. Określono rozwiązanie materiałowe dla przewodów oraz studzienek. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o normę PNS02204 Odwodnienie dróg, natężenie deszczu miarodajnego określono na podstawie wzoru Błaszczyka dla całego obszaru Polski (z wyjątkiem miejscowości podgórskich i gór, zakładając roczną sumę opadów równą 600 mm oraz częstotliwość ich wystąpienia dla średnic przewodów równych i większych 600 mm $C = 2$ lata, a dla kanałów drugorzędnych $C = 1$ rok). Przewidziano retencję w kanałach i studniach kanalizacyjnych, zakładając spiętrzenie wód opadowych na poziomie $0,5 \pm 1$ m poniżej rzędnej terenu dla oczyszczalni ścieków danej zlewni. Ponadto dokonano zestawień długości kolektorów i zagłębień pomocnych m.in. w oszacowaniu wielkości robót ziemnych, określono etapową realizację inwestycji (bez uwzględnienia czasu realizacji) oraz zarys systemu monitoringu i sterowania pracą OWD.

Celem analizy było zweryfikowanie powyższych założeń koncepcyjnych, tj. sprawdzenie jak zaprojektowana 11 lat temu sieć będzie zachowywała się w nowej rzeczywistości. Dlatego analizę oparto w głównej mierze o jej podstawowe założenia, wprowadzając jedynie niezbędne zmiany przystosowujące ją do obecnego stanu (2025 r.). Adaptacja wynikała z nowej struktury użytkownika zlewni oraz zmian klimatycznych, których efektem jest wzrost częstotliwości pojawiania się ekstremalnych zjawisk opadowych.

Obszar analizy

Analizie poddano fragment miasta stanowiący jedną z części odrębnej zlewni cząstkowej, w perspektywie rozbudowy sieci kanalizacji deszczowej do stanu docelowego, czyli pełnej realizacji koncepcji.

Wody opadowe i roztopowe zbierane z powierzchni ulic oraz utwardzonych po-

wierzchni kierowane są do oczyszczalni wód opadowych, a stamtąd odprowadzane do rowu (historycznie wykorzystywanego przy zabiegach melioracyjnych – nawadnianie i odwadnianie) łączącego się z odbiornikiem. W przypadku odcinków już wybudowanych, a jeszcze nie połączonych z kolektorem głównym zastosowano rozwiązania tymczasowe w postaci studni chłonnych. Symulując całą sieć w docelowym jej kształcie włączono studnie chłonne do zaprojektowanego systemu odwadniającego (będą one stanowiły lokalne punkty odciażające w przypadku większych opadów). Kolektor zbiorczy odprowadzający wody opadowe i roztopowe do oczyszczalni wód deszczowych (OWD) wykonany z żywicy poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym (GRP PN1 SN10000) o średnicy 1200 mm. Pozostałe przewody zaprojektowano z tworzywa sztucznego (PP SN10) o średnicach od 200 do 800 mm. Łączna długość przewodów rozpatrywanego fragmentu sieci wynosi niespełna 19 km, w tym ok. 0,25 km już istniejących (stan na 2024 r.). Kolektory sieciowe przebiegają wzdłuż głównych ulic, ze spadkiem zgodnym z terenem, w kierunku obsługujących je pompowni i oczyszczalni. Wody ze zlewni doprowadzane są do pompowni dwoma głównymi odcinkami: kolektor 1 (k1) długości 0,59 km i kolektor 2 (k2) dł. 1,52 km.

Metodyka

W celu aktualizacji danych skorzystano z istniejącej dokumentacji powykonawczej oraz analizy danych przestrzennych w systemie GIS. Materiały do analizy pozyskano z danej spółki wodociągowo-kanalizacyjnej oraz z ogólnodostępnej bazy danych przestrzennych udostępnianych przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii na platformie geportal.gov.pl. Wykorzystano informacje o uzbrojeniu terenu (przewodach i urządzeniach) zawarte na warstwie WMS Krajowa Integracja Uzbrojenia Terenu (KIUT), zaś ukształtowanie terenu – wysokości i spadki ustalono na podstawie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) w układzie wysokościowym PLEVRF2007NH o rozdzielczości 5 m (aktualność 2022 r.).

Koncepcja zakładała wydzielenie zlewni jedynie w obrębie odwadnianych ulic, przewidując na sieci miejsca z możliwością podłączenia indywidualnych posesji. Obsługiwane drogi w obrębie całych działek podzielono na zlewnie cząstkowe lokalizując wpusty, analizując spadki oraz użytkowanie terenu. Węzły odbierające spływ wód opadowych z powierzchni

zlewni (wpusty uliczne) lokalizowano na odcinkach istniejących zgodnie z dokumentacją powykonawczą, zaś w przypadku projektowanych odcinków na zasadach podanych w wytycznych projektowania dróg. Całkowita odwadniana powierzchnia na rozpatrywanym fragmencie sieci wyniosła 24,4 ha i składała się z 379 zlewni cząstkowych o powierzchni od 0,01 do 0,65 ha.

Model hydrodynamiczny

Model stworzono w programie Storm Water Management Model (SWMM), który składa się z trzech zintegrowanych modułów: bazy danych, bloku obliczeniowego i modułu graficznego z przedstawionymi wynikami symulacji [2]. W opracowanym modelu odwzorowano przebieg istniejących kanałów z planów uzbrojenia terenu oraz dokumentacji powykonawczej. Następnie sieć powiększono o odcinki projektowane zgodnie z koncepcją, wprowadzając zaprojektowane rzędne i średnice. Skonfrontowanie rozwiązania koncepcyjnego ze stanem istniejącym, po analizie NMT, wymusiło poprawę niektórych zagłębień kanałów. Starano się jednak jak najdokładniej oddać zaprojektowaną wizję odwodnienia. Zlewnie cząstkowe wyznaczone zgodnie z przebiegiem ulic obejmowały całe działki o przeznaczeniu komunikacyjnym wg planów zagospodarowania przestrzennego miasta. Dla wszystkich zlewni cząstkowych ustalono procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych, szerokość zlewni, średni spadek, zastępcze współczynniki szorstkości oraz wysokość retencji terenowej. Dla powierzchni przepuszczalnych, z braku szczegółowych danych, przyjęto parametry infiltracji do modelu Hortona jako wartości domyślne z programu.

W celu weryfikacji koncepcji odprowadzania wód opadowych i roztopowych z terenu miasta w modelu SWMM, badaną zlewnię obciążono opadem opracowanym czterema różnymi metodami. Opady wyznaczone w oparciu o ogólnopolskie modele natężeń deszczów miarodajnych: modelu fizycznego Błaszczyka z 1954 r. (wykorzystywany przy tworzeniu koncepcji – formuła Błaszczyka jeszcze do niedawna była najczęściej stosowaną formułą do wymiarowania kanalizacji w Polsce), modelu probabilistycznego Bogdanowicza i Stachy (B-S) z 1998 r. (dla regionu centralnego, wynikającego z lokalizacji miasta), fizycznego modelu komercyjnego opracowanego dla przedmiotowej miejscowości przez firmę RetencjaPL na podstawie Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa) [3]

oraz odczytanych z atlasu opadów PMaxTP [5] udostępnionych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Pierwsze dwie metody były dostępne w trakcie powstawania koncepcji i zostały opracowane dla terenu Polski w oparciu o długie ciągi obserwacyjne i zalecane w przypadku, gdy nie dysponowano rzeczywistymi pomiarami opadu. Opad wyznaczony pozostałymi dwiema metodami bazuje na danych zaczerpniętych z aktualnych atlasów opadów maksymalnych, opracowanych na podstawie możliwie długich ciągów obserwacyjnych i gęstej sieci stacji pomiarowych. Jest to bardziej dokładna i rekomendowana metoda pozyskiwania danych do projektowania i wymiarowania systemów odprowadzania wód opadowych i roztopowych.

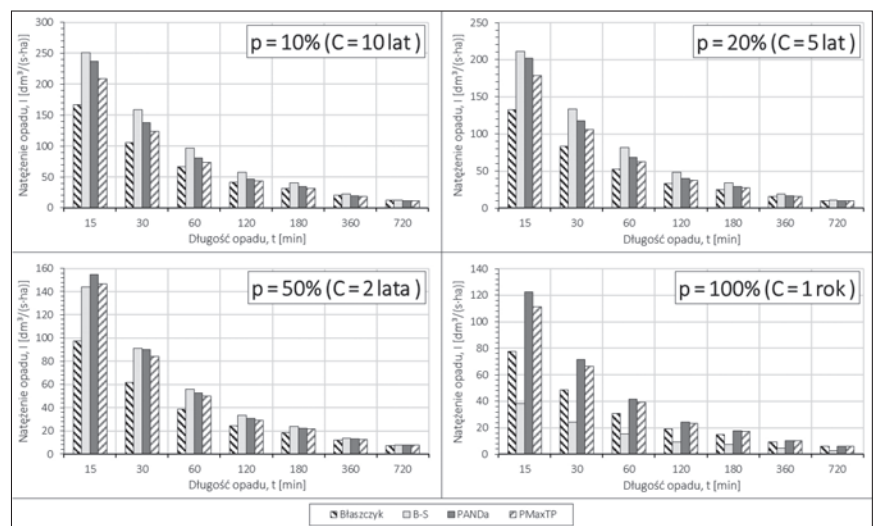
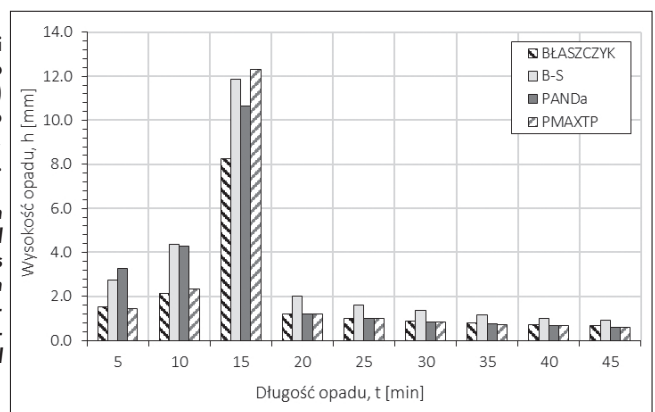
Zgodnie z zaleceniami obecnie obowiązującej normy PN-EN 752:2017-06 [6] częstość opadu obliczeniowego dla centr miast, terenów usług i przemysłu wynosi $C = 5$ lat. Jest to zalecana wartość opadu, dla którego wystąpienie nadpiętrzeń i ewentualnych wylań z systemu ka-

nalizacji deszczowej, można jeszcze traktować jako akceptowalne społecznie [7].

Zlewnię obciążano opadami trwającymi 15, 45, 60 i 120 min. opracowanymi dla każdej z metod wyznaczania natężeń maksymalnych dla prawdopodobieństw przewyższenia $p = 20\%$. Każdorazowo za kształt hietogramu opadu przyjęto opad modelowy Eulera (typ II) zalecany w Polsce do analizowania prostych zagadnień modelowych [8]. Przykładowy rozkład opadu pokazano na rys. 1.

Dla prawdopodobieństw przewyższenia $p = 10\%$, 20% , 50% i 100% (powtarzalności wystąpienia odpowiednio $C = 10, 5, 2$ lata oraz 1 rok) porównano wartości natężeń deszczów miarodajnych obliczonych dla metod ogólnopolskich Błaszczyka, Bogdanowicza i Stachy oraz lokalnego modelu fizycznego dla miasta opracowanego przez zespół RetencjaPL. Wartości natężeń z modelu IMGW-PIB odczytano dla danej lokalizacji z aplikacji PMaxTP udostępnianej na stronie internetowej dla metody przewyższeń selekcji danych POT (Peak Over Threshold), dającej lepsze rezultaty od drugiej z dostępnych

Rys. 1. Porównanie wysokości opadu obliczeniowego dla $C = 5$ lat ($p = 20\%$) i $t = 45$ min określonego różnymi metodami, kształt hietogramów wg rozkład Eulera (typ II)
Fig. 1. The comparison of calculated rainfall amount for $C = 5$ years ($p = 20\%$) and $t = 45$ min for considered calculation methods, hietographs of Euler's model rainfall (type II)



Rys. 2. Porównanie natężeń opadów miarodajnych określonego różnymi metodami, dla wybranych czasów trwania
Fig. 2. Comparison of rainfall intensities for considered calculation methods for different durations

– AMP (Annual Maximum Precipitation) [9]. Wyniki zestawiono i przedstawiono dla wybranych czasów trwania opadu na rys. 2.

Z porównania wielkości natężeń opadów maksymalnych zauważyć można, że dla niższych wartości prawdopodobieństw 10, 20 i 50% fizyczny wzór Błaszcyka daje znacząco niższe wartości w odniesieniu do pozostałych metod. Intensywności opadu wyznaczone z probabilistycznej formuły Bogdanowicza i Stachy są najwyższe dla niemal wszystkich wybranych czasów trwania opadu i prawdopodobieństw 10 i 20% (jedynie dla 12 h opadu o $p = 10\%$ intensywność wg Błaszcyka jest najwyższa). W miarę zwiększającej się powtarzalności opadów dla $p = 50$ i 100% intensywności wyznaczone przy użyciu atlasów opadów (PANDa i PMaxTP) są wyższe od obliczonych formułami Błaszcyka oraz Bogdanowicza i Stachy, każdorazowo ze wskazaniem na rozwiązanie komercyjne.

Wyniki analiz

Z modelu otrzymano objętości oraz czas trwania wylewów w poszczególnych węzłach obliczeniowych w całej analizowanej zlewni. Węzeł zaklasyfikowano jako wylewający, gdy czas trwania zdarzenia przekroczył 0,01 h oraz jego objętość była większa niż $1,0 \text{ m}^3$. Sumaryczną ilość wody wypływającej z systemu zestawiono w tabeli 1. Procentowy udział przepelnionych studzienek w ogólnej ich liczbie przedstawiono na rys. 3.

Tabela 1. Objętość wylań otrzymana z modelu SWMM [m^3] dla rozpatrywanych modeli opadów i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat)

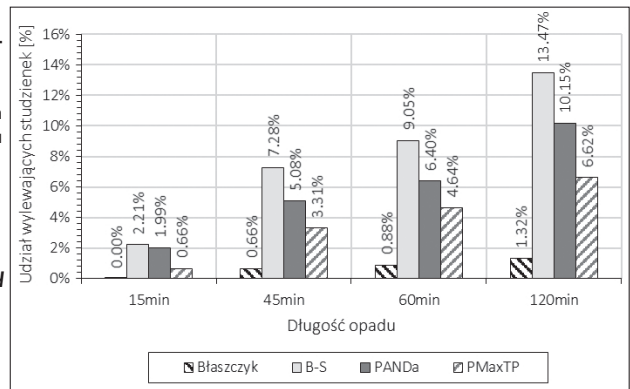
Table 1. The volume of floods from the SWMM model [m^3] for considered rainfall models and assumed rainfall durations with probability of occurrence $p = 20\%$ ($C = 5$ years)

Długość opadu	Opad modelowy			
	Błaszcyk	BS	PANDa	PMaXTP
15 min	0	681	491	57
45 min	60	2278	1380	962
60 min	331	2639	1594	1168
120 min	824	3289	1966	1489

Symulacja hydrodynamiczna wykazała, że przy obciążeniu zlewni najintensywniejszym opadem (najkrótszy, trwający 15 min) określonym na podstawie wzoru Błaszcyka na sieci nie stwierdzono przepelnień ani wylań. Ta metoda posłużyła projektantom koncepcji i dla takiego

Rys. 3. Procentowy udział wylewających studzienek w ogólnej ich liczbie dla rozpatrywanych modeli opadów i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat)

Fig. 3. Percentage share of discharging wells in their total number for considered calculation rainfall models for different durations with probability of occurrence $p = 20\%$ ($C = 5$ years)



opadu można stwierdzić zgodność projektu z wymaganiami. Jednak analizując dłuższe zdarzenia opadowe (45, 60 i 120 min), na sieci zaczynają pojawiać się przepelnienia i w konsekwencji wylania. Dla opadu określonego z formuły Błaszcyka udział zalanych studzienek jest najniższy i waha się w okolicy 1%. W pozostałych przypadkach rośnie proporcjonalnie do przedłużającego się opadu. Procentowa ilość zalanych studzienek dla najdłuższego zdarzenia opadowego wyniosła dla opadu określonego z formuły Bogdanowicza i Stachy 13,5%, na podstawie atlasów PANDa i PMaxTP odpowiednio 10,2% oraz 6,6%.

Na obszarze wyszczególniono dwa główne przewody zbierające wody opadowe z terenu zlewni i odprowadzające je do oczyszczalni. Kolektory przeanalizowano pod kątem wypełnienia przewodów oraz przepelnienia w węzłach (studzienkach).

Dla rozpatrywanych modeli opadów i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat) w modelu zidentyfikowano czas w minutach, liczony od po-

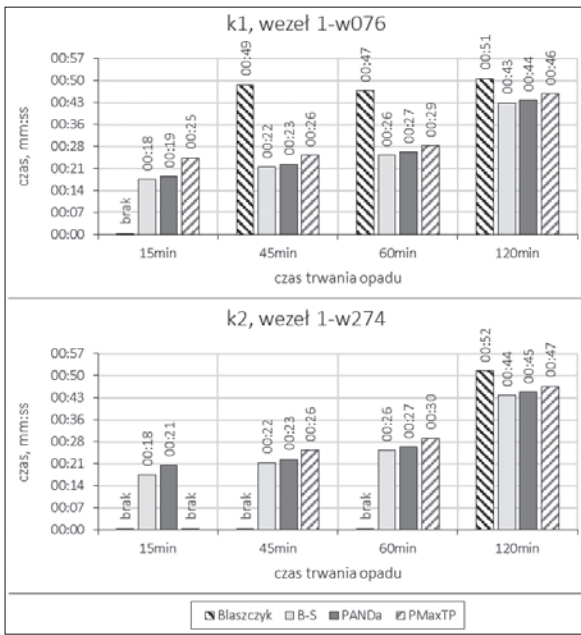
czątku opadu, w którym dojdzie do maksymalnego wypełnienia przewodów. Za moment maksymalnego prowadzenia wód opadowych w kolektorze przyjęto chwilę, w której suma wypełnień odcinków składowych przewodu (między węzłami) osiągnie wartość najwyższą, czyli jest to chwila (w zadanym kroku czasowym), w której kolektor działa pod ciśnieniem, prowadzi wody opadowe pełnym przekrojem przewodów na najdłuższej swojej trasie. Na obu kolektorach rozpoznano studzienkę (węzeł) najbardziej narażoną na przelanie (o najniższej rzędnej terenu) i podano czas, w którym zaobserwowano to zjawisko. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 2., momenty wylania w najbardziej narażonych węzłach kolektorów k1 i k2 zestawiono na rys. 4.

Przykładowy profil kolektora k1 dla opadu wyznaczonego przy użyciu atlasu natężeń deszczów PMaxTP trwającego 45 min w chwili, od której prowadzi maksymalną ilość opadu (23 min) oraz w momencie wylania (26 min). Sumaryczna ilość opadu, od początku jego trwania, obciążającego w tym czasie zlewnie k1 wyniosła odpowiednio:

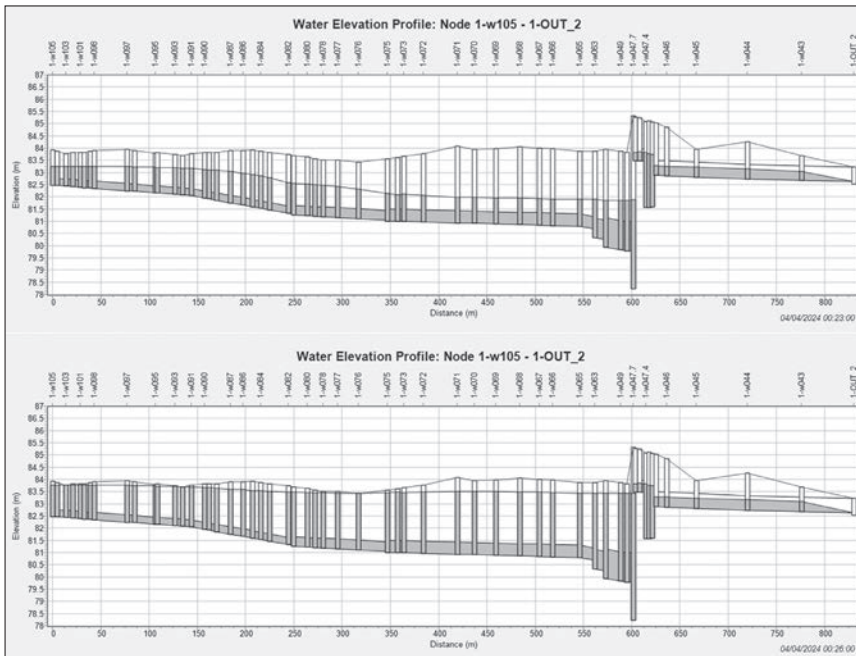
Tabela 2. Moment (w minutach), w którym dojdzie do maksymalnego prowadzenia wód opadowych w całym kolektorze oraz wylania w najbardziej narażonym węźle dla rozpatrywanych modeli opadów i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat)

Table 2. Moment (in minutes) of maximum water flow in the entire collector and the overflow in the most exposed node for considered rainfall models and assumed rainfall durations with probability of occurrence $p = 20\%$ ($C = 5$ years)

Długość opadu	Opad modelowy							
	Błaszcyk		BS		PANDa		PMaXTP	
	max wypełnienie	wylanie w węźle	max wypełnienie	wylanie w węźle	max wypełnienie	wylanie w węźle	max wypełnienie	wylanie w węźle
Kolektor nr 1 (wylania dla węzła 1-w076)								
15 min	00:14	brak	00:16	00:18	00:12	00:19	00:16	00:25
45 min	00:37	00:49	00:21	00:22	00:21	00:23	00:23	00:26
60 min	00:37	00:47	00:25	00:26	00:26	00:27	00:27	00:29
120 min	00:46	00:51	00:42	00:43	00:43	00:44	00:45	00:46
Kolektor nr 2 (wylania dla węzła 1-w274)								
15 min	00:28	brak	00:20	00:18	00:21	00:21	00:20	brak
45 min	00:49	brak	00:24	00:22	00:25	00:23	00:27	00:26
60 min	00:52	brak	00:27	00:26	00:29	00:27	00:31	00:30
120 min	00:51	00:52	00:44	00:44	00:46	00:45	00:48	00:47



Rys. 4. Moment wylania w najbar-dziej narażonym węźle kolektora k1 i k2 w zależności od przyjętej metody określania opadu modelowego i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat)
Fig. 4. The moment of over-flow in the most exposed collector node k1 and k2 for considered calculation rainfall models for different durations with probability of occurrence $p = 20\%$ ($C = 5$ years)



Rys. 5. Profil kolektora k1 w 23. (maksymalne wypełnienie) i 26. (wylanie w węźle) minucie trwania deszczu modelowego długości $t = 45$ min, wyznaczony modelem PMaxTP
Fig. 5. K1 collector profile in the 23th (maximum filling) and 26th (overflow in node) minute of the model rainfall with duration $t = 45$ min, determined by the PMaxTP maximum rainfall atlas

17,3 mm w momencie maksymalnego wypełnienia oraz 18,3 mm w chwili wylania. W tabeli 3. zestawiono informacje dotyczące pojawiających się wylań studzienek na wybranych kolektorach w zależności od obciążenia zlewni danym opadem modelowym.

Na rys. 6. przedstawiono schemat sieci wraz z zaznaczonymi studzienkami, w których odnotowano wylania. Dla rozpatrywanych kolektorów dołączono informacje dotyczące pojawiających się wylań w zależności od obciążenia zlewni danym opadem modelowym.

Podsumowanie i wnioski

Wytyczne Ministerstwa Infrastruktury z 2023 r. WR-D-71-1 [10] dotyczące projektowania urządzeń do odwadniania dróg, które to należy zaznaczyć, nie stanowią przepisów techniczno-budowlanych czy ścisłych aktów prawnych, a są zbiorem rekomendacji oraz zasad opracowanych w oparciu o wiedzę techniczną, dopuszczając określenie natężeń opadów miarodajnych do projektowania z użyciem lokalnych modeli opadowych na równi z odczytaniem wartości z aktualnego atlasu opadowego. Rekomendacje ministerstwa stwierdzają również wymagania dla źródeł pozyskiwanych danych o opadach. Zarówno atlasy jak i modele opadowe powinny bazować na reprezentatywnych statystycznie okresach opadów wieloletnich (min 20-30 lat) nie starszych niż 50 lat. Ten zapis klasyfikuje formułę Błazszyka opracowaną na podstawie obserwacji dla Warszawy w latach 1837-1925 jako nie aktualną. Dodatkowo ogólna dostępność danych opadowych opracowanych w formie komercyjnego atlasu opadowego PANDa lub publicznego PMaxTP, jest znacznie lepszym rozwiązaniem, ponieważ otrzymane wartości opadów będą odnosiły się ściśle do lokalizacji analizowanego obiektu.

Uznając zatem za referencyjne wartości natężeń opadów miarodajnych określonych z atlasów opadowych, po analizie danych opracowanych do budowy modelu kanalizacji deszczowej oraz symulacji jej pracy stwierdzono:

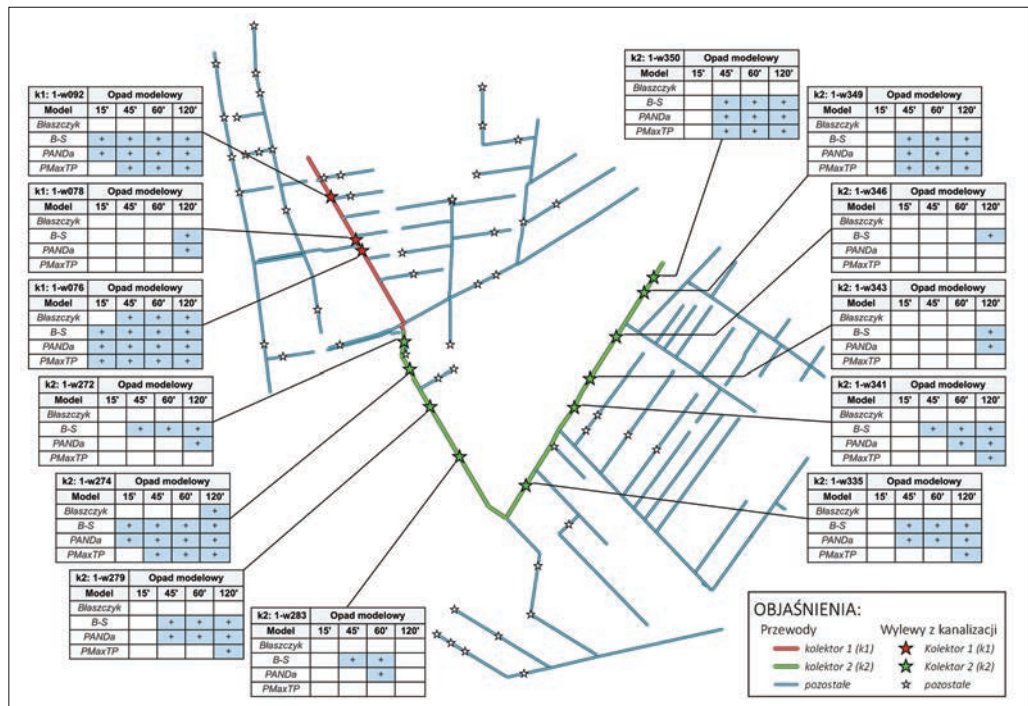
- Formuła Błazszyka zaniża wartości maksymalnych natężeń opadów miarodajnych, co może prowadzić do niedoszacowania sieci wraz ze

Tabela 3. Wykaz wylań w węzłach (zalanych studzienek) dla rozpatrywanych modeli opadowych i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat)
Table 3. Overflows in nodes (flooded wells) for considered calculation rainfall models for different durations with probability of occurrence $p = 20\%$ ($C = 5$ years)

Nr węzła	Rzędna terenu [m n.p.m.]	Opad modelowy															
		Błazszyk				BS				PANDa				PMaxTP			
		15'	45'	60'	120'	15'	45'	60'	120'	15'	45'	60'	120'	15'	45'	60'	120'
Kolektor nr 1																	
1-w092	83.70					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
1-w078	83.64								+				+				
1-w076	83.42		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kolektor nr 2																	
1-w350	86.50						+	+	+		+	+	+		+	+	+
1-w349	86.11						+	+	+		+	+	+		+	+	+
1-w346	85.29								+								
1-w343	84.81								+				+				
1-w341	84.53						+	+	+			+	+				+
1-w335	84.27						+	+	+		+	+	+				+
1-w283	83.93						+	+			+						
1-w279	83.68						+	+	+		+	+	+				+
1-w274	83.53				+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
1-w272	83.60						+	+	+				+				

• + • wystąpienie wylania

Rys. 6. Lokalizacja wylań z kanalizacji deszczowej z wykazem wystąpienia wylań na kolektorach głównych dla rozpatrywanych modeli opadowych i przyjętych czasów trwania opadu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($C = 5$ lat)
Fig. 6. Location of floodings from stormwater drainage system with a list of overflows on the main collectors for considered calculation rainfall models for different durations with probability of occurrence $p = 20\%$ ($C = 5$ years)



znajdującymi się na niej obiektami kanalizacyjnymi, co stwierdzono już we wcześniejszych pracach [11].

- Model opadowy Bogdanowicza i Stachy (B-S) opracowany dla podobnych serii pomiarowych i metod probabilistycznych daje zbliżone wyniki przy prawdopodobieństwach 50, 20 i 10%. Na rozpatrywanym obszarze dla najniższych wartości prawdopodobieństw maksymalne wartości natężeń odpadów otrzymane ze wzoru BS były zawsze najwyższe.
- Formuła B-S nie nadaje się do oszacowania opadów z rocznym prawdopodobieństwem powtarzalności, zaniżając wartości maksymalnych natężeń nawet o ok. 30%.

Analizując pracę sieci w modelu dla przyjętego prawdopodobieństwa $p = 20\%$ ($C = 5$ lat) zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 752:2017-06 dla terenów miejskich stwierdzono, że układ kanalizacyjny w takiej formie nie spełni wymogów dotyczących częstości występowania nadpiętrań i wylań.

- Najmniejszą objętość wylań z systemu odnotowano dla opadu modelowego opracowanego na podstawie formuły Błazszyka.
- Opad 45minutowy w zależności od przyjętej metody modelowej powodował wycieki o łącznej objętości 60 m³ dla formuły Błazszyka, 2278 m³ dla formuły B-S, 1380 m³ dla opadu opracowanego na podstawie atlasu PANDa oraz 962 m³ dla opadu z atlasu PMaxTP, co stanowiło odpowiednio ok.: 1, 7, 5 i 3% zalanych studzienek w ogólnej ich liczbie.
- Moment przelania (wypływ wody ponad powierzchnię terenu) w najbar-

dziej niekorzystnym węzle kolektora wskazuje, że czas, w którym dojdzie do wylania skraca się w miarę zwiększania intensywności opadu (najszybciej dochodzi do wylania dla deszczy najkrócej trwających – o najwyższej intensywności 15 min, najpóźniej dla 2h). Ma to związek z przyjętym kształtem hietogramu modelowego Eulera (typ II), w którym pik opadu oddala się w miarę wydłużania jego trwania.

- Moment wylania w najbardziej narażonej studzience dla przyjętych metod określania opadu obliczeniowego, odpowiada wielkości wyznaczonych natężeń maksymalnych – najszybciej do przelania dojdzie dla deszczu obliczonego formułą B-S, następnie otrzymanego z atlasów opadowych PANDa, PMaxTP i wzoru Błazszyka.

Wpływ rozwiązań zaproponowanych w koncepcji na odpływ wód opadowych ze zlewni, najłatwiej jest przeanalizować w modelu hydrodynamicznym, co powinno być kolejnym krokiem przedsięwzięcia przed przystąpieniem do inwestycji, w jej trakcie oraz po zakończeniu.

Wykorzystywanie miarodajnych danych opadowych oraz modelowania matematycznego jako dwóch narzędzi, wydaje się wystarczające i w znaczącym stopniu uwiarygadniające koncepcje odprowadzania wód opadowych i roztopowych z terenów miejskich.

LITERATURA

- [1] Dz.U.2024 poz. 757 Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 15 maja 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków.

- [2] Nowakowska M., Kotowski A. Metodyka i zasady modelowania odwodnień terenów urbanizowanych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2017.
- [3] Licznar P., Janusz Zaleski J. Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężenia Deszczów (PANDa). Wyd. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa 2020.
- [4] Burszta-Adamiak E., Licznar P. Analiza struktury czasowej opadów maksymalnych Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa). Instal nr 3, 2018, s. 4953.
- [5] Pod red. Ozga-Zielińskiego B. Modele probabilistyczne opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia – Projekt PMaxTP. Wyd. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa 2022.
- [6] PN-EN 752:2017-06 Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne – Zarządzanie systemem kanalizacyjnym.
- [7] Kotowski A. Podstawy Bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów, Wyd. Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2011.
- [8] Kotowski A., Kaźmierczak B., Licznar P. Wybrane problemy projektowania i modelowania odwodnień terenów. Instal nr 5, 2018, s. 5661.
- [9] Ciupak M., Ozga-Zieliński B., Tokarczyk T., Adamowski J. A Probabilistic Model for Maximum Rainfall Frequency Analysis, Water 2021, 13(19), p. 2688. DOI: 10.3390/w13192688
- [10] Wytyczne Ministerstwa Infrastruktury z 2023 roku: WR-D-71-1: „Wytyczne projektowania urządzeń do odwodnienia dróg zamieszkiwych i ulic. Część 1: Wymagania podstawowe”.
- [11] Kotowski A., Kaźmierczak B., Danciewicz A. Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji. Monografia. Wyd. Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Studia z Zakresu Inżynierii nr 68, Warszawa 2010.
- [12] Dz. U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690, z późn. zm. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [13] Dz. U. z 2017 r. poz. 1566 Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne.