

Bartosz Kaźmierczak, Andrzej Kotowski, Andrzej Danczewicz

Weryfikacja metod wymiarowania kanalizacji deszczowej za pomocą modelu hydrodynamicznego (SWMM) w warunkach wrocławskich

Wymiarowanie systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej w Polsce stwarza trudności wynikające z braku wiarygodnego modelu deszczu, ponieważ najczęściej stosowany wzór W. Błaszczyka z 1954 r. zaniża wyniki obliczeń o około 40%, co wykazano na przykładzie pomiarów wysokości opadów deszczu w stacji meteorologicznej IMGW we Wrocławiu z lat 1960–2009 [1, 2]. Ma to negatywne skutki w przypadku wymiarowania odwodnienia terenów w Polsce wg zaleceń najnowszej europejskiej normy PN-EN 752:2008, co do akceptowanych społecznie częstości wylewów z kanalizacji. Zastosowanie hydrodynamicznego modelu spływu wód opadowych do weryfikacji działania kanalizacji wymaga uprzednio zwymiarowania sieci odwodnieniowych tzw. metodami czasu przepływu. W metodach tych wymiarowanie kanalizacji deszczowej bądź ogólnospławnej opiera się na szeregu założeniach upraszczających (stały opad blokowy w zlewni, ruch równomierny ustalony w kanałach). Stosowana w Polsce metoda granicznych natężeń (MGN), wykorzystująca wzór W. Błaszczyka, w rezultacie zaniża wyniki obliczeń strumienia objętości wód opadowych, w porównaniu do metody współczynnika opóźnienia (MWO) stosowanej w Niemczech [3]. Zwymiarowane tymi metodami większe systemy kanalizacyjne (zwłaszcza o powierzchni zlewni $>2\text{ km}^2$) zaleca się obecnie sprawdzać pod kątem ich przepustowości hydraulicznej w oparciu o skalibrowane modele symulacyjne, w celu spełnienia wymagań normy PN-EN 752:2008. Wykorzystanie modeli hydrodynamicznych do symulacji działania systemów kanalizacyjnych umożliwia uwzględnienie zmiennych w czasie i przestrzeni rzeczywistych spływów wód deszczowych, a także zmiennego i niestabilnego przepływu ścieków w kanałach [4].

W pracy dokonano weryfikacji przydatności wybranych metod czasu przepływu do projektowania kanalizacji deszczowej, na przykładzie modelowej zlewni miejskiej o powierzchni 154 ha w terenie płaskim. W tym celu zwymiarowano sieć kanalizacji deszczowej trzema metodami, tj. MGN ze wzorem W. Błaszczyka oraz MGN i MWO z modelem opadów we Wrocławiu, a następnie wykorzystując model hydrodynamiczny sprawdzono działanie tak zwymiarowanych sieci ze względu na napięcia w stosunku do powierzchni terenu i wylania. Jako obciążenie

zlewni zastosowano deszcz modelowy Eulera (typ II) oraz deszcz rzeczywisty zarejestrowany w stacji IMGW Wrocław-Strachowice. Wykazano, że bezpieczną metodą czasu przepływu wymiarowania kanalizacji deszczowej była metoda współczynnika opóźnienia, przy kryterium braku napięć i wylewów z kanałów.

Metody badawcze

Bezpieczne projektowanie sieci kanalizacyjnych ma na celu zapewnienie odpowiedniego standardu odwodnienia terenu, który definiuje się jako przystosowanie sieci do przyjęcia prognozowanych strumieni objętości wód opadowych z częstością równą dopuszczalnej (akceptowanej społecznie) częstości wystąpienia wylania (tab. 1).

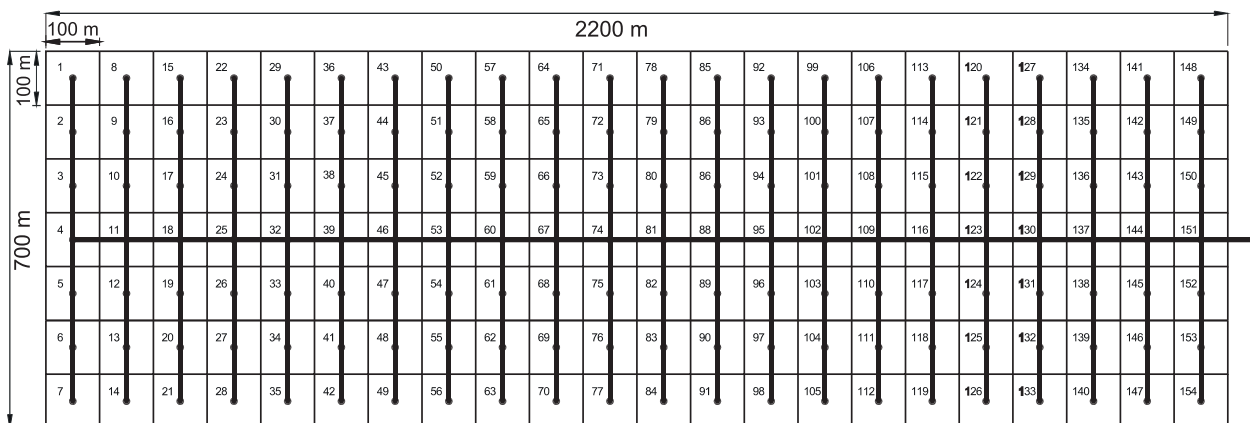
Tabela 1. Zalecenia normy PN-EN 752:2008

Table 1. Recommendations specified in the Polish standard PN-EN 752:2008

Kategoria standardu odwodnienia	Częstość deszczu	Częstość wylania
I. Tereny pozamiejskie (wiejskie)	1 na rok	1 na 10 lat
II. Tereny mieszkaniowe	1 na 2 lata	1 na 20 lat
III. Centra miast, tereny usług i przemysłu	1 na 5 lat	1 na 30 lat
IV. Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami, itp.	1 na 10 lat	1 na 50 lat

W modelowaniu hydrodynamicznym systemów kanalizacyjnych zintegrowane powierzchnie cząstkowe zlewni deszczowej, zwłaszcza na terenach zurbanizowanych, powinny być możliwie jak najmniejsze (co najwyżej kilka hektarów, ze względu na dokładność odwzorowania [3, 5]). Przyjęto więc zlewnie cząstkowe o powierzchni 1,0 ha ($100\text{ m} \times 100\text{ m}$) i zaproponowano modelową zlewnię o wymiarach $700\text{ m} \times 2200\text{ m}$ i łącznej powierzchni $F=154\text{ ha}$. Zlewnia składała się z 154 modułów – zintegrowanych zlewni cząstkowych. Schemat ideowy zlewni przedstawiono na rysunku 1. Założono, że analizowana zlewnia deszczowa w zabudowie mieszkaniowej znajduje się w terenie płaskim na obszarze Wrocławia. Przyjmując średni ważony współczynnik spływu wód opadowych $\psi=0,30$, zredukowana powierzchnia zlewni wyniosła $F_{zr}=46,2\text{ ha}$. Przyjęto 44 kanały boczne (rys. 1) o długości 300 m (3 odcinki obliczeniowe po 100 m) oraz kolektor o łącznej długości 2200 m (22 odcinki obliczeniowe po 100 m). Szorstkość ścian kanałów założono równą $n=0,013\text{ s/m}^{1/3}$.

Dr inż. B. Kaźmierczak, dr hab. inż. A. Kotowski: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Usuwania Ścieków, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
 bartosz.kazmierczak@pwr.wroc.pl, andrzej.kotowski@pwr.wroc.pl
 Mgr A. Danczewicz: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział we Wrocławiu, ul. Parkowa 30, 51-616 Wrocław
 andrzej.danczewicz@imgw.wroc.pl



Rys. 1. Schemat ideowy modelowej zlewni deszczowej (F=154 ha)
Fig. 1. Schematic diagram of the model rainwater drainage basin (F=154 ha)

Do hydrodynamicznej symulacji systemów kanalizacyjnych wybrano program SWMM 5.0 (Storm Water Management Model), opracowany przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (U.S. EPA). Program ten składa się z trzech głównych modułów – moduł RAIN służy do wprowadzania i przechowywania danych dotyczących opadów, moduł RUNOFF wykorzystywany jest do modelowania hydrologicznego zlewni pod względem hydraulicznym i jakościowym, a moduł EXTRAN służy do modelowania hydraulicznego sieci kanalizacyjnych przy wykorzystaniu układu równań różniczkowych Saint Venanta.

W programie SWMM 5.0 zlewnia cząstkowa jest reprezentowana przez prostokąt o zadanej powierzchni i szerokości (hydraulicznej). Do obliczeń odpływu zlewni dzielona jest zasadniczo na dwa rodzaje powierzchni – przepuszczalną, na której występuje infiltracja oraz nieprzepuszczalną. Odpływ liczony jest oddzielnie z każdej z powierzchni, a następnie sumowany. Strumień objętości wód deszczowych spływających do węzła obliczeniowego sieci obliczany jest z zastosowaniem modelu zbiornika nieliniowego (rys. 2) w postaci:

$$Q_m = W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{n} i^{1/2} \quad (1)$$

w której:

Q_m – modelowy strumień objętości wód deszczowych, m^3/s
 W – szerokość hydrauliczna zlewni, m

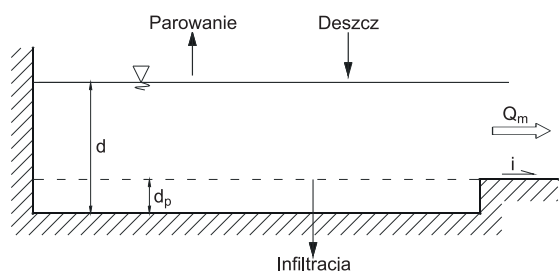
d – wysokość opadu, m

d_p – wysokość retencji powierzchniowej, m

n – współczynnik chropowatości powierzchni (Manninga), $s/m^{1/3}$

i – średni spadek terenu zlewni

Napełnienie zbiornika odpowiada objętości wody, która znalazła się na terenie zlewni, pomniejszonej o straty na



Rys. 2. Schemat obliczania strumienia objętości deszczu w module RUNOFF

Fig. 2. Scheme of computing the runoff volume in the RUNOFF module

parowanie, infiltrację i na wypełnienie nierówności terenu. W rezultacie obliczeń numerycznych uzyskuje się informacje o zmianach wartości strumienia objętości ścieków deszczowych i napełnienia w poszczególnych elementach systemu kanalizacyjnego w czasie. Parametry W , i oraz n zintegrowanej zlewni cząstkowej reprezentują właściwości retencyjne zlewni. W przypadku zlewni symetrycznych względem kanału odprowadzającego ścieki deszczowe przyjmuje się, że szerokość hydrauliczna jest dwukrotnie większa od długości kanału [6]. Jest to równoważne z założeniem obliczeniowej długości drogi spływu ze zlewni równej odległości od granicy zlewni do kanału odprowadzającego, co z kolei odpowiada połowie geometrycznej szerokości zlewni (wymiaru zlewni w kierunku prostopadłym do kanału). Ponieważ zintegrowane powierzchnie cząstkowe (moduły) modelowej zlewni miały kształt kwadratów o wymiarach $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, a kanał odprowadzający ścieki deszczowe mieścił się w środku zlewni, dlatego w programie SWMM przyjęto szerokość hydrauliczną zlewni $W=200\text{ m}$. Podczas prowadzenia symulacji hydrodynamicznej przyjęto zastępczą wartość nachylenia powierzchni – $i=5\%$ oraz zastępczy współczynnik szorstkości (do wzoru Manninga) uszczelnionych powierzchni zlewni – $n=0,015\text{ s/m}^{1/3}$ [7–12].

Wymiarowanie kanalizacji deszczowej

W zaproponowanej zlewni modelowej zwymiarowano sieć kanalizacji deszczowej trzema metodami czasu przepływu. Zastosowano kanały o przekroju kołowym, ułożone z minimalnym spadkiem dna, dobieranym z formuły $1/D$. Połączenia kanałów w węzłach obliczeniowych (studzienkach) zrównano dnami. Obliczenia hydrologiczne i hydrauliczne przeprowadzono wg trzech wariantów wymiarowania sieci (trzema metodami czasu przepływu), uwzględniających modele opadów we Wrocławiu:

- MGN (I) z modelem W. Błaszczyka ($H=590\text{ mm}$ [2]),
- MGN (II) z modelem opadów maksymalnych,
- MWO (III) z modelem opadów maksymalnych.

W metodzie granicznych natężeń, stosowanej w Polsce, przyjmuje się, że obliczeniowy strumień objętości ścieków deszczowych (Q) w rozpatrywanym przekroju kanału występuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do momentu rozpoczęcia deszczu (po suchej pogodzie) o czas niezbędny na retencję terenową (t_k), retencję kanałową (t_r) oraz przepływ w kanale (t_p) od początku do przekroju obliczeniowego. Stąd też czas spływu wód opadowych ze zlewni

przyjmuje się jako równy czasowi trwania deszczu miarodajnego (t_{dm}):

$$t_{dm} = t_k + t_r + t_p \quad (2)$$

Obliczeniowy strumień objętości Q (dm^3/s) w dowolnym przekroju kanału jest opisany wzorem:

$$Q = q(t_{dm})F_{zr} = \frac{6,631 \sqrt[3]{H^2 C}}{t_{dm}^{2/3}} F_{zr} \quad (3)$$

w którym:

$q(t_{dm})$ – natężenie deszczu przy miarodajnym czasie trwania (wg wzoru W. Błaszczyka), $dm^3/s \cdot ha$

H – wysokość opadu normalnego, mm

C – częstość deszczu obliczeniowego, lata

F_{zr} – zredukowana powierzchnia zlewni deszczowej, ha

W metodzie współczynnika opóźnienia (MWO), stosowanej w Niemczech, za miarodajny czas trwania deszczu (t_d) przyjmuje się czas przepływu ścieków (t_p) w kanale. Pomija się więc czasy retencji terenowej i kanałowej, głównie ze względu na bezpieczeństwo działania sieci przy rzadszych niż obliczeniowe częstościach (C) występowania deszczów. Wyznaczone w ten sposób spływy wód deszczowych są większe w porównaniu do obliczonych wg metody granicznych natężeń [3, 13, 14]. Strumień objętości wód deszczowych (Q , dm^3/s) wg metody współczynnika opóźnienia obliczany jest ze wzoru:

$$Q = q(t_d)F_{zr} \quad (4)$$

w którym:

$q(t_d)$ – natężenie deszczu przy czasie trwania równym czasowi przepływu, $dm^3/s \cdot ha$

W pracy [2] sformułowano probabilistyczny model deszczu maksymalnego w warunkach wrocławskich, przy czasie jego trwania w zakresie $t \in [5; 4320]$ min i prawdopodobieństwie wystąpienia $p=1/C \in [1; 0,01]$, w postaci:

$$q = 166,7[-4,58 + 7,41 t^{0,242} + (97,11 t^{0,0222} - 98,68)(-\ln p)^{0,809}] t^{-1} \quad (5)$$

w którym:

q – maksymalne (jednostkowe) natężenie deszczu, $dm^3/s \cdot ha$

Wzór (5) opracowano na podstawie deszczów zarejestrowanych w stacji meteorologicznej IMGW Wrocław-Strachowice w latach 1960–2009. Do rejestracji wysokości opadu wykorzystano w głównej mierze deszczomierz pływakowy (zegarowy), a od 2007 r. opady zapisywano przy pomocy deszczomierza korytkowego z rejestratorem elektronicznym (SEBA) [15, 16]. W tabeli 2 zestawiono założenia wyjściowe trzech wariantów obliczeniowych sieci kanalizacji deszczowej. Na podstawie przyjętych założeń projektowych wykonano obliczenia hydrauliczne sieci kanalizacji deszczowej wraz z doбором średnic i spadków kanałów. Zbiorcze zestawienie wyników podano w tabeli 3. Obliczeniowy strumień objętości wód opadowych w wariantcie III był większy o prawie 83% w stosunku do wariantu I oraz o 16% w stosunku do wariantu II.

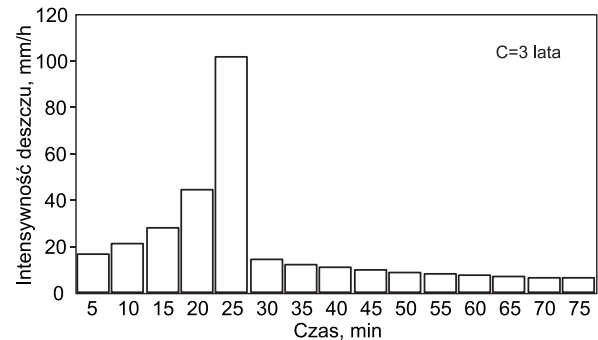
Tabela 2. Założenia wyjściowe do wymiarowania przykładowych sieci kanalizacji deszczowej

Table 2. Initial assumptions for the example storm sewer system sizing

Wariant obliczeń	C lata	t_k min	t_r	$t_{dm \min}$ min	D %
I – MGN wzór (3)	2	2	$0,2t_p$	10	≤ 100
II – MGN wzór (4)	2	2	$0,2t_p$	10	≤ 100
III – MWO wzór (4)	2	0	0	15	≤ 75

Tworzenie deszczu modelowego Eulera (typ II)

Ideą deszczu modelowego jest oddanie w sposób zbliżony do rzeczywistości przebiegu typowych opadów deszczu o zmiennej w czasie intensywności. Przykładem deszczu modelowego jest model Eulera (typ II), zalecany do modelowania kanalizacji w Niemczech [4]. Model ten oparty jest na spostrzeżeniu, że największe 5-minutowe natężenie deszczu występuje w jednej trzeciej czasu jego trwania [17, 18]. W celu weryfikacji występowania nadpętrzeń w kanałach należy – zgodnie z zaleceniami ATV-A118 – obciążyć zlewnię modelową deszczem o częstości występowania $C=3$ lata i czasie trwania co najmniej dwukrotnie przewyższającym czas przepływu ścieków deszczowych w sieci [4]. Ponieważ w zaprojektowanych zlewniach modelowych obliczeniowy czas przepływu wynosił ok. 37 min, opracowano na podstawie wzoru (5) deszcz modelowy o czasie trwania $t=75$ min (rys. 3).



Rys. 3. Histogram deszczu modelowego Eulera (typ II)
Fig. 3. Histogram of Euler's model rainfall (type II)

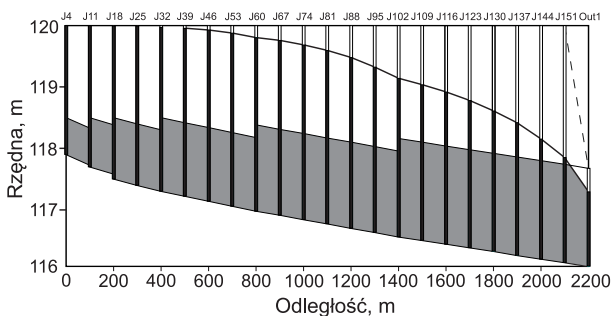
Opracowany deszcz modelowy w warunkach wrocławskich przy $t=75$ min i $C=3$ lata ($p=0,33$) charakteryzował się maksymalną intensywnością równą $101,71$ mm/h, występującą pomiędzy 20. a 25. minutą jego trwania. Średnia intensywność deszczu wynosiła $20,27$ mm/h, co odpowiadało wysokości opadu równej $25,33$ mm.

Tabela 3. Wyniki wymiarowania sieci kanalizacyjnej
Table 3. Results of the example storm sewer system sizing

Wariant obliczeń	Strumień odpływu m^3/s	Obliczeniowy czas przepływu min	Wymiar kanałów m	Zagłębienie kanałów m p.p.t.	Objętość sieci m^3	Wskaźnik objętości sieci m^3/ha
I	2,07	37,8	K0,30+K1,60	1,30+3,92	4948	32,1
II	3,26	36,4	K0,30+K2,00	1,30+4,01	6547	42,5
III	3,78	36,6	K0,30+K2,20	1,30+4,07	7901	51,3

Modelowanie działania sieci kanalizacji deszczowej

W celu weryfikacji przepustowości hydraulicznej sieci kanalizacji deszczowej (zwyiarowanej wg trzech wariantów) obciążono zlewnię opracowanym deszczem modelowym Eulera (typ II) w warunkach wrocławskich. Z sumarycznej wysokości opadu 30% zostało przekształcone w spływ powierzchniowy i trafiło do kanalizacji ($\psi=0,30$). W wyniku przeprowadzonych symulacji hydrodynamicznych otrzymano informacje o strumieniach objętości i wypełnieniach w poszczególnych odcinkach sieci kanalizacyjnej w czasie trwania deszczu modelowego. Profil kolektora w wybranym czasie trwania opadu (28. minuta – największe wypełnienie) w przypadku sieci kanalizacyjnej zwyiarowanej w wariancie I przedstawiono na rysunku 4.



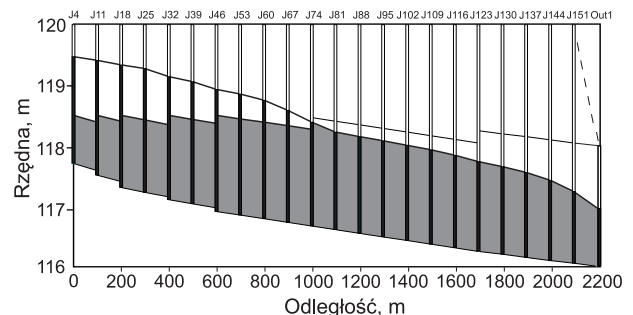
Rys. 4. Profil kolektora w 28. minucie trwania deszczu modelowego (wariant I)

Fig. 4. Interceptor profile in the 28th minute of model precipitation duration (variant I)

Zaprojektowana w tym wariancie sieć kanalizacji deszczowej nie miała odpowiedniej przepustowości hydraulicznej, aby bez nadpiętrzeń do poziomu terenu mogła odprowadzać modelowane strumienie objętości ścieków deszczowych. Jak pokazano na rysunku 4, praktycznie cały kolektor, poza ostatnim odcinkiem, pracował pod ciśnieniem w czasie trwania zadanego deszczu modelowego. Nadpiętrzenia rzędu kilku metrów, w tym do powierzchni terenu i wylania, wystąpiły w większości węzłów obliczeniowych kolektora. W przypadku kanałów bocznych również wystąpiły liczne nadpiętrzenia do poziomu terenu. W początkowych kanałach bocznych ciśnienie osiągało poziom terenu na całej długości kanałów. W przypadku dalszych kanałów bocznych, gdzie kolektor, do którego zostały podłączone, znajdował się już na większej głębokości, nadpiętrzenia do poziomu terenu wystąpiły tylko

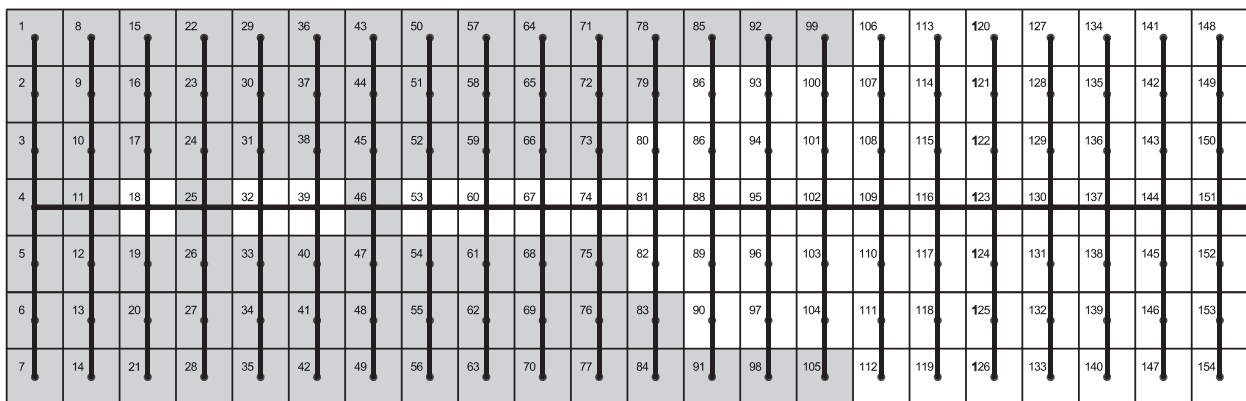
na początkowych odcinkach tych kanałów. Sumaryczna objętość ścieków, które podczas trwania deszczu modelowego wylały się z sieci wynosiła 767 m³, przy czym jako wylanie traktowano wypływ o objętości większej niż 1,0 m³ trwający dłużej jak 0,01 h. Większą część tej objętości stanowiły ścieki deszczowe, które wylały się w początkowych odcinkach sieci (w węzłach obliczeniowych), gdzie zagłębienie kolektora było najmniejsze. Największe odnotowane wylania wystąpiły w węzłach J1 i J7 i wynosiły po 18 m³. Łącznie zanotowano wylania aż w 80 węzłach obliczeniowych (rys. 5). W kanalizacji deszczowej zwyiarowanej wg wariantu I maksymalny modelowy strumień objętości na ostatnim odcinku kolektora wyniósł $Q_{m(I)}=5,62 \text{ m}^3/\text{s}$.

W celu weryfikacji przepustowości hydraulicznej sieci kanalizacji deszczowej zaprojektowanej wg wariantu II obciążono zlewnię deszczem modelowym analogicznie jak w wariancie I. Profil kolektora wraz z wypełnieniami w wybranym czasie trwania opadu (27. minuta) przedstawiono na rysunku 6, na którym widać, że początkowe odcinki kolektora pracowały z nadpiętrzeniem wynoszącym kilkadziesiąt centymetrów. W początkowych kanałach bocznych wystąpiły już jednak nadpiętrzenia do poziomu terenu. Sumaryczna objętość ścieków, które podczas trwania deszczu modelowego wylały się z sieci wynosiła 10 m³. Największe symulowane wylania nastąpiły w węzłach J1 i J7 – po 3 m³. Łącznie wylania zanotowano w 4 węzłach (rys. 7). W przypadku 150 (ze 154) zintegrowanych zlewni cząstkowych nadpiętrzenia nie osiągnęły poziomu terenu w żadnej chwili trwania deszczu modelowego. Maksymalny modelowy strumień objętości ścieków deszczowych wyniósł $Q_{m(II)}=5,84 \text{ m}^3/\text{s}$.



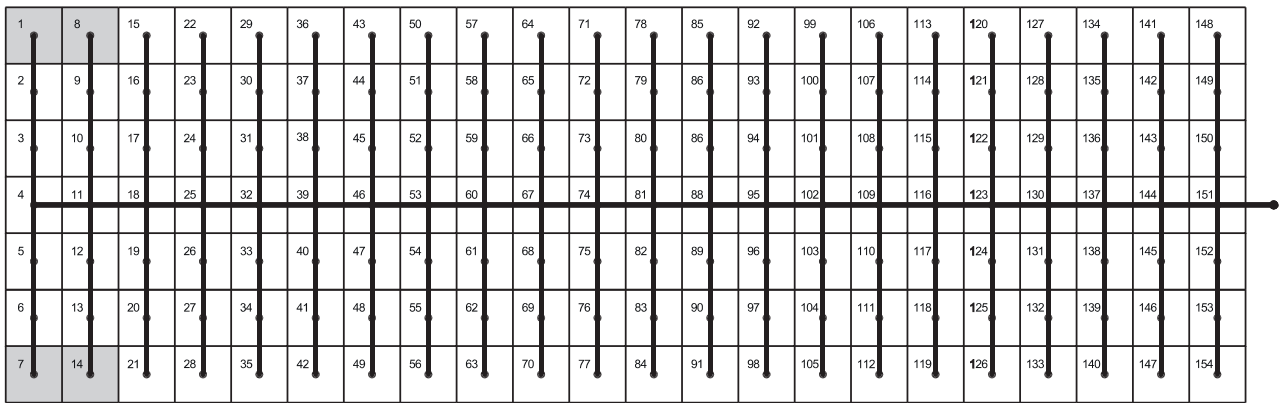
Rys. 6. Profil kolektora w 27. minucie trwania deszczu modelowego (wariant II)

Fig. 6. Interceptor profile in the 27th minute of model precipitation duration (variant II)



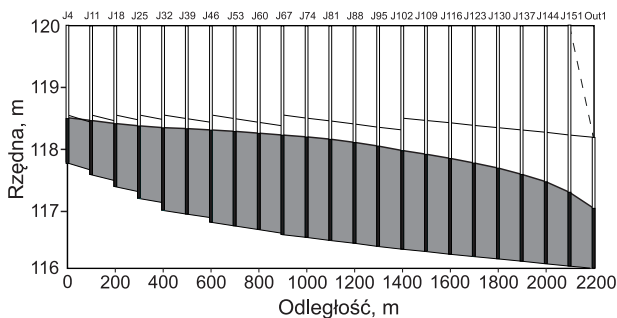
Rys. 5. Miejsca nadpiętrzeń do poziomu terenu (wariant I)

Fig. 5. Locations of damming up above the ground level (variant I)



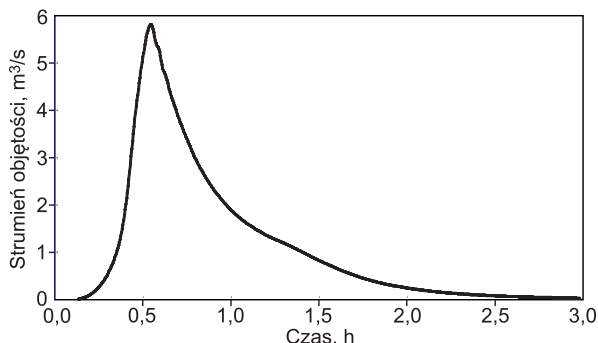
Rys. 7. Miejsca nadpiętrzeń do poziomu terenu (wariant II)
Fig. 7. Locations of damming up above the ground level (variant II)

W celu weryfikacji przepustowości hydraulicznej sieci kanalizacji deszczowej zaprojektowanej wg wariantu III obciążono ją również deszczem modelowym Eulera (typ II). Profil kolektora wraz z wypełnieniami w wybranym czasie trwania opadu (29. minuta) przedstawiono na rysunku 8, na którym widać, że praktycznie cały kolektor pracował ze swobodnym zwierciadłem ścieków w czasie trwania zadanego deszczu modelowego. W żadnym z kanałów bocznych nadpiętrzenia do poziomu terenu również nie wystąpiły. Maksymalny modelowy strumień objętości ścieków (w wariantie III) na ostatnim odcinku kolektora wynosił $Q_{m(III)}=5,82\text{ m}^3/\text{s}$. Hydrogram przepływu ścieków na tym odcinku kolektora przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 8. Profil kolektora w 29. minucie trwania deszczu modelowego (wariant III)

Fig. 8. Interceptor profile in the 29th minute of model precipitation duration (variant III)



Rys. 9. Hydrogram przepływu ścieków deszczowych na ostatnim odcinku kolektora (wariant III)

Fig. 9. Hydrograph of storm water flow in the last interceptor section (variant III)

Zbiorcze zestawienie wyników analiz działania modelowej sieci kanalizacyjnej zwymiarowanej wg trzech wariantów przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki modelowania działania sieci kanalizacyjnej
Table 4. Results of modeling the functioning of the storm sewer system

Wariant obliczeń	Modelowy strumień obj. m^3/s	Liczba wylań	Objętość wylań m^3
I	5,62	80	767
II	5,84	4	10
III	5,82	0	0

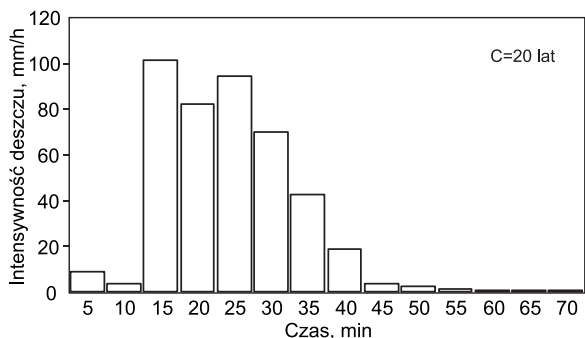
Weryfikacja wyników symulacji przy zastosowaniu deszczu rzeczywistego

W celu weryfikacji przepustowości hydraulicznej kanalizacji deszczowej zwymiarowanej według wariantu III obciążono zlewnię deszczem rzeczywistym z 23 czerwca 1975 r., zarejestrowanym na pluwiogramie w stacji IMGW Wrocław-Strachowice. W celu dokładnego odwzorowania przebiegu deszczu rzeczywistego (w przedziałach 5-minutowych) przeprowadzono digitalizację zapisu danych pluwiograficznych [19]. Zapis cyfrowy pozwolił na szczegółowy opis opadu deszczu w czasie, niezbędny do modelowania (tab. 5). Prezentowany deszcz o czasie trwania $t=70\text{ min}$ i sumarycznej wysokości $h=35,8\text{ mm}$ należał

Tabela 5. Parametry deszczu w przedziałach 5-minutowych
Table 5. Parameters of rainfall at 5-minute intervals

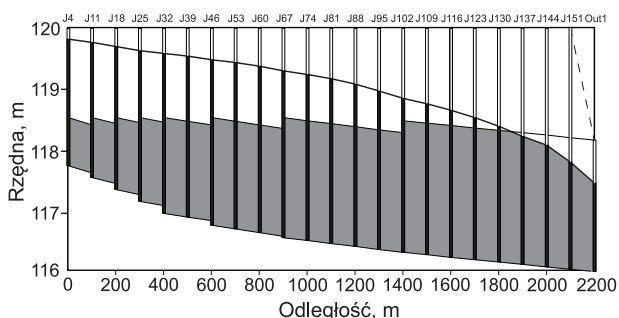
t, min	h, mm	Δh , mm	I, mm/h
5	0,74	0,74	8,88
10	1,06	0,32	3,84
15	9,50	8,44	101,28
20	16,34	6,84	82,08
25	24,18	7,84	94,08
30	30,00	5,82	69,84
35	33,53	3,53	42,36
40	35,08	1,55	18,60
45	35,37	0,29	3,48
50	35,56	0,19	2,28
55	35,68	0,12	1,44
60	35,75	0,07	0,84
65	35,79	0,04	0,48
70	35,82	0,03	0,36

do kategorii silnej ulewy (ponad 4. kategorii wg kryterium Chomicza [2, 3]), o częstotliwości występowania we Wrocławiu $C=20$ lat. Zapis graficzny (histogram) opracowanego deszczu rzeczywistego przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Histogram deszczu rzeczywistego w przedziałach 5-min.
Fig. 10. Histogram of recorded rainfall at 5-minute intervals

W przypadku zadanego deszczu rzeczywistego przeprowadzono symulacje hydrodynamiczne działania kanalizacji deszczowej z wymiarowaną wg wariantu III i otrzymano informacje o strumieniach objętości ścieków i wypełnieniach w poszczególnych odcinkach sieci kanalizacyjnej. Profil kolektora w wybranym czasie trwania deszczu rzeczywistego (27. minuta) podczas największych napięć w sieci przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Profil kolektora w 27. minucie trwania deszczu rzeczywistego (wariant III)

Fig. 11. Interceptor profile in the 27th minute of the recorded rainfall event (variant III)

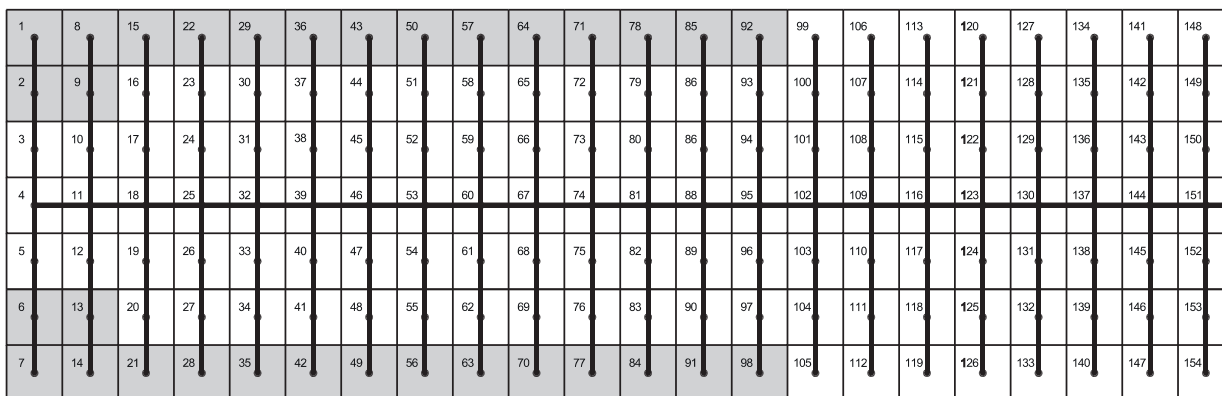
Jak należało oczekiwać, zaprojektowana w wariantcie III kanalizacja deszczowa nie miała aż tak dużej przepustowości hydraulicznej, aby bez napięć do poziomu terenu odprowadzić symulowany strumień objętości ścieków w przypadku deszczu rzeczywistego o częstotliwości

występowania $C=20$ lat. W czasie trwania zadanego deszczu rzeczywistego praktycznie cały kolektor (poza trzema końcowymi odcinkami) pracował pod ciśnieniem. W kanałach bocznych wystąpiły już liczne napięcia, w tym do poziomu terenu. Dotyczyło to 32 (ze 154) węzłów sieci. Sumaryczna objętość ścieków, które podczas trwania deszczu rzeczywistego ($C=20$ lat, $t=70$ min) wylały się z sieci wynosiła 408 m^3 . Większą część z tej objętości stanowiły ścieki deszczowe, które wylały się w początkowych odcinkach sieci, tj. w węzłach obliczeniowych, gdzie średnice i zagłębienia kolektora oraz kanałów bocznych były najmniejsze (rys. 12). Maksymalny, modelowy strumień objętości ścieków na ostatnim odcinku kolektora wyniósł $Q_{\max(\text{III})}=9,83 \text{ m}^3/\text{s}$.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy wykazały jednoznacznie, że bezpiecznym sposobem wymiarowania kanalizacji deszczowej jest metoda współczynnika opóźnienia (MWO) z modelem deszczów maksymalnych we Wrocławiu, wobec stwierdzonego braku napięć ścieków do powierzchni terenu i ich wylewów z kanalizacji. Przyjęta zlewnia modelowa w terenie płaskim była ostrym kryterium do oceny działania kanalizacji deszczowej, bowiem wszystkie węzły obliczeniowe były zarazem punktami krytycznymi sieci.

Wzór W. Błaszczyka i ogólnie metoda granicznych natężeń (MGN) znacznie niedoszacowuje miarodajny do wymiarowania sieci kanalizacyjnej strumień objętości wód deszczowych, powodując liczne występujące napięcia do powierzchni terenu i wylania ścieków. Próba zastąpienia w MGN wzoru W. Błaszczyka nowym wzorem deszczów maksymalnych we Wrocławiu też nie przyniosła zadowalających wyników – zmalała jedynie liczba napięć ścieków i objętość ich wylewów. Wariant wymiarowania kanalizacji deszczowej wg MWO z modelem deszczów maksymalnych we Wrocławiu zapewnił już bezpieczny wynik wymiarowania kanalizacji w przypadku modelowej zlewni w warunkach wrocławskich (brak napięć ścieków do powierzchni terenu), przy obciążeniu zlewni deszczem modelowym Eulera (typ II). Jednak z wymiarowaną tą metodą kanalizacja deszczowa nie gwarantowała odprowadzenia bez wylewów symulowanych spływów ścieków deszczowych, przy zadanym deszczu rzeczywistym o częstotliwości występowania co 20 lat (wg PN-EN 752:2008 dopuszczalne są wówczas wylania z kanalizacji na terenach mieszkaniowych). W czasie trwania deszczu rzeczywistego praktycznie cały kolektor działał pod ciśnieniem, a wylania wystąpiły w ok. 20% węzłów obliczeniowych sieci.



Rys. 12. Miejsca napięć do poziomu terenu podczas deszczu rzeczywistego (wariant III)

Fig. 12. Locations of damming up above the ground level during the recorded rainfall event (variant III)

Badania zrealizowano ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na naukę w latach 2009–2011, w ramach projektu nr NN 523 4244 37.

LITERATURA

1. B. KAŻMIERCZAK: Badania symulacyjne działania przelewów burzowych i separatorów ścieków deszczowych w warunkach ruchu nieustalonego do wspomaganie projektowania sieci odwodnieniowych. Praca doktorska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011 (praca niepublikowana).
2. A. KOTOWSKI, B. KAŻMIERCZAK, A. DANCEWICZ: Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji. *Monografie Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN* 2010, nr 68.
3. A. KOTOWSKI: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2011.
4. ATV-A118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Gfa, Hennef 1999.
5. M. ZAWILSKI: Integracja zlewni zurbanizowanej w symulacji spływu ścieków opadowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 6, ss. 28–32.
6. M. SKOTNICKI, M. SOWIŃSKI: Weryfikacja metody wyznaczania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych na przykładzie wybranej zlewni miejskiej. Mat. konf. „POLKAN”, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2008.
7. A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
8. M. LEŚNIEWSKI: Modelowanie sieci kanalizacyjnych za pomocą programu SWMM. Mat. konf. „GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi”, PZITS, Warszawa 2005, ss. 185–197.
9. L.A. ROSSMAN: Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0. U.S. EPA, 2010.
10. W. JAMES: A Guide to the Rain, Temperature and Runoff Modules of the U.S. EPA SWMM4. CHI Publications, Guelph, Ontario 2000.
11. M. ZAWILSKI, G. SAKSON: Wykorzystanie programu SWMM w modelowaniu systemów kanalizacyjnych. W: Problemy zagospodarowania wód opadowych. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2008, ss. 155–169.
12. M. ZAWILSKI, G. SAKSON: Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 11, ss. 32–36.
13. A. KOTOWSKI: O potrzebie dostosowania zasad wymiarowania kanalizacji w Polsce do wymagań normy PN-EN 752 i zaleceń Europejskiego Komitetu Normalizacji. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2006, nr 6, ss. 20–26.
14. R. EDEL: Odwodnienie dróg. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
15. A. KOTOWSKI, A. DANCEWICZ, B. KAŻMIERCZAK: Accuracy of measurements of precipitation amount using standard and tipping bucket pluviographs in comparison to Hellmann rain gauges. *Environment Protection Engineering* 2011, Vol. 37, No. 2, pp. 23–34.
16. A. KOTOWSKI, A. DANCEWICZ, B. KAŻMIERCZAK: Czasowo-przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych we Wrocławiu. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 4, ss. 37–46.
17. T.G. SCHMITT, M. THOMAS: Rechnerischer Nachweis der Überstauhäufigkeit auf der Basis von Modellregen und Starkregenserien. *KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 2000, Vol. 47, No. 1, S. 63–69.
18. T.G. SCHMITT: Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen”. DWA, Hennef 2000, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.
19. P. LICZNAR: Propozycja metody przetwarzania danych pluwiograficznych na potrzeby projektowania i eksploatacji miejskich systemów odwodnienia. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 2005, t. 5, nr 14, ss. 197–207.

Kazmierczak, B., Kotowski, A., Dancewicz, A. Verification of Storm Sewerage Sizing Methods with the Hydrodynamic Model SWMM 5.0 for the Municipality of Wrocław. *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 2, pp. 25–31.

Abstract: Selected flow time methods were verified for application in the design of storm sewer systems, taking a model municipal flat drainage basin of a 1.54 km² surface area as an example. For the purpose of verification, the storm sewerage was sized using three methods: the method of critical intensities with Blaszczyk's formula, the method of critical intensities with the precipitation model for the city of Wrocław, and the method of delay coefficient with the precipitation model for the city of Wrocław. Thereafter use was made of the hydrodynamic model SWMM 5.0 in

order to verify the functioning of the storm sewer system, taking into account two factors: damming up above the ground level, and flooding from the drains. Drainage area load was described by Euler's precipitation model (type II) for the conditions of the city of Wrocław, and by an actual rainfall event recorded at the Wrocław-Strachowice station of the Institute of Meteorology and Water Management. It has been demonstrated that the method of delay coefficient, where the absence of both damming up above the ground level and flooding from the drains is taken as the criterion, is a safe flow time method of storm sewer system sizing for this municipal drainage basin.

Keywords: Rainfall, sewerage system, hydrodynamic modeling.