

# PRACE ORYGINALNE ORIGINAL PAPERS

---

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 69, 2015: 209–223  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 69, 2015)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 69, 2015: 209–223  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 69, 2015)

**Mariusz BARSZCZ**

Katedra Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie  
Department of Hydraulic WULS – SGGW

## Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej The application of the SWMM model to forecast probable flows in urban catchment

**Słowa kluczowe:** zlewnia miejska, podtopienia, opady i przepływy prawdopodobne, model SWMM

**Key words:** urban catchment, flooding, probable flows, SWMM model

### Wprowadzenie

Postępujący wzrost udziału powierzchni szczelnych i skanalizowanych w zlewniach miejskich przyczynia się do zwiększenia odpływu wywołanego opadami deszczu. Ze względu na ograniczoną przepustowość kanalizacji deszczowej i kanałów otwartych dochodzi na obszarze zlewni do wylewania wód opadowych i związanych z tym utrudnień w komunikacji, strat materialnych i szkód środowiskowych. Wobec występowania przytoczonych konsekwencji podtopień, pojawiających się po intensywnych deszczach, także w badanej zlewni, stajemy przed koniecznością zmniejszenia

częstości ich występowania. Jedną z metod prowadzących do redukcji odpływu (częstości występowania podtopień) jest zwiększenie możliwości zatrzymywania wody w zlewni, głównie poprzez budowę zbiorników retencyjnych lub innych typów obiektów służących do retencji i infiltracji wód opadowych, takich jak: zielone dachy, ogrody deszczowe, rowy i studnie chłonne, komory rozsączające. Analizę efektywności tego typu obiektów w redukcji odpływu można znaleźć przykładowo w pracach Barszcza (2014a, 2015) oraz Sakson i Zawilskiego (2013).

Podstawą zarówno do oceny częstości występowania podtopień w zlewni, jak i do projektowania obiektów retencyjonujących wody opadowe są przepływy o zadanym prawdopodobieństwie przekroczenia. Określenie przepływów z wystarczająco dużą dokładnością jest trudne w zlewni miejskiej ze względu

na dużą zmienność obszarową odpływu (wynikającą ze zróżnicowania użytkowania zlewni cząstkowych), jak również ze względu na występowanie licznych obiektów, budowli i urządzeń kształtujących odpływ (przepustów, zbiorników, zastawek, sieci kanalizacyjnej i kanałów otwartych).

Niektóre modele o parametrach skupionych umożliwiają obliczenie przepływów ze stosunkowo dużą dokładnością, ale nie uwzględniają transformacji przepływów w kanałach i zbiornikach oraz przestrzennej zmienności modelowanych procesów. Wyniki potwierdzające przydatność jednego z takich modeli do symulacji przepływów w zlewni miejskiej, a mianowicie modelu SBUH (Santa Barbara Unit Hydrograph) o parametrach skupionych, można znaleźć w pracach autora (Barszcz, 2014b, c).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki zastosowania modelu SWMM (Storm Water Management Model), uwzględniającego przestrzenną zmienność procesów hydrologicznych i hydraulicznych do prognozy przepływów o określonym prawdopodobieństwie w 10 przekrojach na obszarze zlewni Potoku Służewieckiego. Przedstawione obliczenia zostały uwzględnione w koncepcji pt. „Przebudowa układu hydrologicznego obejmującego Potok Służewiecki i Rów Wolica w celu zabezpieczenia przeciwpowodziowego rejonu dolnego biegu Potoku Służewieckiego. Etap II”, opracowanej przez firmę Waga-Bart dla części zlewni Potoku Służewieckiego (obejmującej potok na odcinku od km 0+000 do 6+576). Celem tej koncepcji było określenie działań praktycznych, prowadzących do redukcji przepływów w dolnej części zlewni. Jednym z dzia-

łań w tym zakresie będzie budowa zbiorników retencyjnych Staw Służewiecki i Księży Staw.

## **Opis zlewni i systemu pomiarowego**

Zlewnia Potoku Służewieckiego jest położona w południowej części Warszawy i obejmuje całość lub fragmenty dzielnic: Ochota, Włochy, Mokotów, Ursynów i Wilanów. Jej powierzchnia wynosi 55,2 km<sup>2</sup>. Na obszarze zlewni występują liczne przepusty i zbiorniki, które mają duży wpływ na kształtowanie się przepływów w poszczególnych częściach zlewni.

Zbiorniki zamknięte, znajdujące się na obszarze portu lotniczego „Okęcie”, posiadają pojemność retencyjną wynoszącą łącznie 42 490 m<sup>3</sup>. Staw Berensewicza (zbiornik boczny), zlokalizowany w miejscu dopływu Rowu Grabowskiego do potoku, posiada rezerwę powodziową wynoszącą ok. 11 000 m<sup>3</sup>. Rezerwa powodziowa stawu Wyścigi (zbiornik przepływowy) wynosi ok. 17 700 m<sup>3</sup>. Niżej położony Staw Służewiecki funkcjonuje jako suche zagłębienie terenowe, przez które przepływa potok (trwają prace budowlane mające na celu nadanie zbiornikowi funkcji retencyjnej).

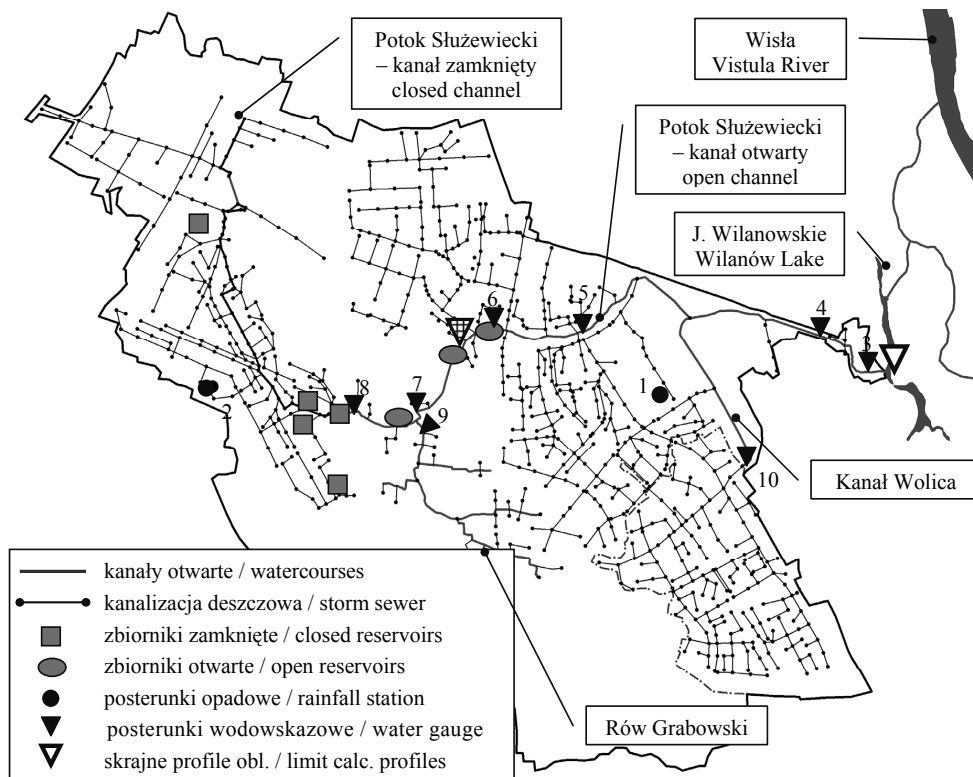
Potok Służewiecki jest kanałem zamkniętym w górnej części zlewni (rys. 1). Na odcinku od wylotu z obszaru portu lotniczego „Okęcie” do ujścia w Jeziorze Wilanowskim jest kanałem otwartym, do którego siecią kanalizacyjną odprowadzane są wody opadowe z obszaru zlewni. Długość tego odcinka potoku wynosi 9,0 km. Całkowita długość Potoku Służewieckiego wynosi

14,3 km. Jego głównymi dopływami są Rów Grabowski i kanał Wolica. Drugi z wymienionych cieków jest zasilany wodami opadowymi odprowadzanymi za pomocą sieci kanalizacyjnej ze zlewni o powierzchni 6,23 km<sup>2</sup>.

Na rysunku 1 przedstawiono lokalizację posterunków wodowskazowych i opadowych, w których hydrogramy stanów wody i wysokości opadów są rejestrowane za pomocą elektronicznych urządzeń (czujników typu „Diver” i deszczomierzy korytkowych) w przyjętych 10-minutowych przedziałach cza-

sowych. Stany wody, mierzone za pomocą czujników „Diver”, są przeliczane na przepływy za pomocą krzywej natężenia przepływów, opracowanej dla każdego profilu wodowskazowego.

Wskazane na rysunku posterunki (poza jednym opadowym) zainstalowano w ramach projektu badawczego COST/210/2006. Posterunek opadowy „Okęcie” należy do sieci pomiarowej IMGW. Profile wodowskazowe w Potoku Służewieckim, oznaczone numerami od 3 do 8, posiadają następujący kilometraż: 0+150, 1+300, 4+910,



RYСУNEK 1. System odprowadzania wód opadowych w zlewni Potoku Służewieckiego

FIGURE 1. The storm drainage system in the Służewiecki Stream catchment

Objaśnienia/Explanations: Posterunki opadowe i wodowskazowe / Rainfall and water gauge stations: 1 – SGGW, 2 – Okęcie, 3 – park Wilanów, 4 – Wilanowska, 5 – Rosoła, 6 – Staw Służewiecki, 7 – Staw Berensewicza, 8 – Kłobucka, 9 – Rów Grabowski, 10 – Płaskowicka



RYSUNEK 2. Potok Służewiecki w profilu wodowskazowym „Rosola” (fot. M. Barszcz)  
 FIGURE 2. The Służewiecki Stream at the water gauge station of “Rosola” (photo M. Barszcz)

6+050, 7+840, 8+650. Na rysunkach 2–3 przedstawiono widoki wybranych przekrojów wodowskazowych w Potoku Służewieckim.

### Model zlewni Potoku Służewieckiego

Do modelowania transformacji opadu w odpływ w badanej zlewni został wykorzystany model SWMM (Storm Water Management Model) w wersji 5.0.022, opracowany przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (U.S. Environmental Protection Agen-



RYSUNEK 3. Potok Służewiecki w profilach wodowskazowych „Wilanowska” i „Park Wilanów” (fot. M. Barszcz)  
 FIGURE 3. The Służewiecki Stream at water gauge stations of “Wilanowska” and “Park Wilanów” (photo M. Barszcz)

cy – EPA). Szeroki opis modelu można znaleźć w pracach Barszcza (2009) oraz Zawilskiego i Sakson (2008), a przykład jego zastosowania w pracy Chowa i in. (2012).

Model SWMM, adaptowany dla zlewni Potoku Służewieckiego, umożliwił analizę w dowolnym punkcie zlewni procesów hydrologicznych (odpływu, retencji, infiltracji) oraz hydraulicznych warunków przepływu w przewodach sieci kanalizacyjnej (z uwzględnieniem pracy pod ciśnieniem) i kanałach otwartych, jak również transformacji przepły-

wów przez zbiorniki, przepusty i urządzenia do regulacji przepływu. W tych analizach do ustalenia wielkości opadu efektywnego (odpływu wody) wybrano metodę SCS (USDA-SCS, 1975, SCS, 1986), a do obliczenia transformacji fal wezbraniowych w kanałach zastosowano model fali dynamicznej.

Wielkość opadu efektywnego w metodzie SCS jest uzależniona głównie od rodzaju gleb (w zależności od współczynnika filtracji gleby jest ona zaliczana do grupy A, B, C lub D) i użytkowania terenu oraz od uwilgotnienia gleb w zlewni przed wystąpieniem badanego opadu. Wszystkie te czynniki ujmują parametr CN, którego wartości określano z tablic w odniesieniu do rodzajów użytkowania terenu, wyróżnionych w zlewni na podstawie ortofotomapy (zdjęcia lotniczego przedstawiającego użytkowanie zlewni w 2013 roku), i rodzajów gleb określonych na podstawie map opracowanych przez Instytut Geologiczny oraz dla założonych przeciętnych warunków wilgotnościowych zlewni.

Adaptacja modelu SWMM dla zlewni Potoku Służewieckiego polegała na utworzeniu w modelu obiektów, które reprezentują fizyczne składniki rzeczywistego systemu hydrologicznego i hydraulicznego zlewni, a następnie na określeniu wartości ich parametrów, będących w większości przypadków fizycznie mierzalnymi charakterystykami. Model SWMM adaptowano dla trzech scenariuszy obliczeniowych, które uwzględniają obliczenie przepływów o prawdopodobieństwach 50, 10 oraz 2 i 1% poprzez dostosowanie parametrów modelu. Pierwszą adaptację modelu dla badanej zlewni autor przeprowadził w 2009 roku, publikując jej wyniki we

wcześniejszej pracy (Barszcz, 2009). W celu przeprowadzenia analiz, przedstawionych w niniejszej pracy, opracowano od podstaw model badanej zlewni. Zakres aktualnej adaptacji modelu SWMM dla badanej zlewni Potoku Służewieckiego, metodykę identyfikacji parametrów i wyniki weryfikacji modelu przedstawiono w dalszej części pracy.

Do oszacowania i identyfikacji parametrów obiektów modelu wykorzystano pomierzone w terenie i zidentyfikowane na podstawie dostępnych materiałów (projektów, opracowań) charakterystyki rzeczywistych obiektów oraz wartości parametrów zalecane w tabelach podręcznika modelu (Rossman, 2005). Obiekty, które uwzględniono w modelu zlewni:

1. Sumy opadów rzeczywistych wykorzystanych do kalibracji i weryfikacji modelu oraz sumy opadów prawdopodobnych (obliczonych ze wzoru Bogdanowicz i Stachy'ego) zastosowanych do prognozy przepływów określono we właściwościach obiektu nazwanego w modelu „posterunkiem opadowym”, w przyjętych 10-minutowych przedziałach czasowych. Do obliczania przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia, w reakcji na opady obliczone według formuły Bogdanowicz i Stachy'ego, przyjęto rozkład warstwy opadu deszczu o intensywności stałej w czasie (opad blokowy). W systemie zlewni uwzględniono dwa posterunki, które są zlokalizowane na obszarze portu lotniczego „Okęcie” i kampusu SGGW w Warszawie.

2. Obszarową zmienność spływu powierzchniowego uwzględniono przez podział zlewni na 3386 zlewnie cząstkowe. Głównym kryterium podziału był

charakter użytkowania (zidentyfikowany na podstawie zdjęcia lotniczego wykonanego w 2013 r.) i związany z nim procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych (udział powierzchni określono na podstawie analiz w programie ArcGis). Podział na zlewnie cząstkowe ilustruje rysunek 4, odpowiadający schematowi przyjętemu w modelu SWMM. Dla każdej zlewni cząstkowej określono wartości 13 parametrów wykorzystywanych do obliczenia ilości spływu wód deszczowych.

3. Odpływ wód deszczowych ze zlewni poprzez sieć kanałów otwartych i przewodów kanalizacyjnych modelowano za pomocą wydzielenia 2265 odcinków kanałów i 2259 węzłów (umieszczonych w miejscu określającym zmianę charakterystyki kanałów lub rozgałęzienia/połączenia kanałów), definiując ich parametry geometryczne i inne parametry wpływające na warunki hydrauliczne przepływu wód opadowych. Przekroje poprzeczne Potoku Służewieckiego na odcinku od km 0+000 do 6+576 oraz na



RYSUNEK 4. Zlewnia Potoku Służewieckiego w modelu SWMM z podziałem na zlewnie cząstkowe oraz plan sytuacyjny sieci kanalizacyjnej i kanałów otwartych  
FIGURE 4. The Służewiecki Stream catchment in the SWMM model divided into subcatchment areas as well the plan of the storm sewer system and open watercourses

całej długości kanału Wolica uwzględniono w modelu na podstawie danych opracowanych przez firmę Waga-Bart (dane uzyskano w ramach współpracy autora z firmą przy opracowywaniu koncepcji opisanej we wprowadzeniu). Parametry sieci kanalizacyjnej uwzględniono w modelu na podstawie danych z mapy zasadniczej, własnych pomiarów lub dokumentacji powykonawczej (w przypadku kanałów położonych na obszarze lotniska „Okęcie”). W modelu uwzględniono dużą liczbę kanałów sieci kanalizacyjnej (kolektorów i kanałów bocznych), ażeby przyłączyć zlewnie cząstkowe do kanału, który w rzeczywistości odbiera wody opadowe z określonej zlewni cząstkowej. Uwzględniona w modelu trasa kanałów precyzyjnie odzwierciedla położenie rzeczywistych kanałów na obszarze zlewni. W modelu uwzględniono wszystkie węzły sieci kanalizacyjnej, w których następuje połączenie kanałów (węzły w miejscu studzienek połączeniowych) lub następuje wspomniana wcześniej zmiana charakterystyki kanałów.

4. Przepusty drogowe i inne obiekty infrastruktury komunikacyjnej zlokalizowane w Potoku Służewieckim na odcinku od km 0+000 km do 6+576 i kanału Wolica uwzględniono w modelu na podstawie danych firmy Waga-Bart.

5. Zbiorniki powierzchniowe (Staw Berensewicza i staw Wyścigi), zbiorniki zamknięte na obszarze portu lotniczego „Okęcie” i jeziora. Charakterystyki zbiorników zamkniętych i ich urządzeń do regulacji przepływu uwzględniono w modelu na podstawie dokumentacji powykonawczej, uzyskanej od właściwych służb ds. zarządzania siecią odwadniającą lotnisko (dokumentację

uzyskano w ramach współpracy autora z tymi służbami).

6. Regulatory przepływu: klapy zwrotne w kanałach, urządzenia (budowle) upustowe i przelewowe zbiorników, pompy i zastawki współpracujące ze zbiornikami zamkniętymi.

Jednym z etapów adaptacji modelu SWMM dla zlewni Potoku Służewieckiego była kalibracja i weryfikacja modelu. W tym celu prowadzono symulację hydrogramów w 8 profilach wodowskazowych (ich położenie wskazano na rys. 1), dla których dysponowano zróżnicowaną liczbą danych pomiarowych hydrogramów przepływu wywołanych opadami o różnym czasie trwania i o różnych wysokościach, a hydrogramy rzeczywiste i symulowane były porównywane, zwłaszcza ich przepływy maksymalne. Do kalibracji i weryfikacji modelu wykorzystano zdarzenia opad – odpływ pomierzone przez Katedrę Inżynierii Wodnej SGGW w okresie od 2006 do 2009 roku. Wysokości opadów zarejestrowano za pomocą deszczomierzy zlokalizowanych na posterunkach „SGGW” i „Okęcie”.

Ponieważ parametry obiektów uwzględnionych w modelu zlewni, opisane w podręczniku do modelu przez Rossmana (2005), są w większości przypadków fizycznie mierzalnymi charakterystykami, a jednocześnie ich wartości mieszczą się w stosunkowo małym zakresie zmienności i w praktycznych obliczeniach część z tych parametrów jest przyjmowana jako standardowa wartość, więc w procesie kalibracji modelu wprowadzono jedynie niewielkie korekty wartości parametrów. Największy wpływ na wartości symulowanych przepływów miał parametr „Width”

(szerokość drogi spływu powierzchniowego), będący jednym z kilkunastu parametrów dla poszczególnych zlewni cząstkowych w modelu. Przybliżone wartości tego parametru obliczono, stosując się do zalecenia podanego w podręczniku modelu SWMM, a mianowicie dzieląc powierzchnię zlewni cząstkowej przez średnią maksymalną długość drogi spływu powierzchniowego w tej samej zlewni. Wartości parametru „Width” ustalono oddzielnie dla każdego z szesnastu rodzajów użytkowania terenu, które zidentyfikowano na obszarze całej zlewni (obliczono wartości średnie dla dużej liczby zlewni cząstkowych). Pozostałe parametry modelu, które podlegały kalibracji, to: „Dstore-Imperv”, „Dstore-Perv” oraz parametr CN w metodzie SCS do obliczania warstwy opadu efektywnego. Pierwsze dwa wymienione parametry oznaczają wysokość warstwy opadu zatrzymaną w zagłębieniach (nierównościach) terenowych, występujących odpowiednio na powierzchni nieprzepuszczalnej i przepuszczalnej w zlewni cząstkowej o określonym rodzaju użytkowania. Typowe wartości tych trzech parametrów można znaleźć w tablicach w podręczniku do modelu, a więc w procesie kalibracji modelu ich wartości ulegały małym zmianom. Inny parametr modelu – spadek terenu na obszarze zlewni cząstkowych, ustalono na podstawie numerycznego modelu terenu. Procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych w zlewniach cząstkowych o określonym rodzaju użytkowania terenu ustalono na podstawie szczegółowej analizy struktury użytkowania dla reprezentatywnych zlewni cząstkowych, przy wykorzystaniu narzędzi programu ArcGIS.

Ostatnim etapem adaptacji modelu dla zlewni Potoku Służewieckiego była jego weryfikacja, która pozwoliła określić przydatność modelu do prognozy przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia. Do weryfikacji modelu wykorzystano hydrogramy przepływu wywołane opadami, których wysokość wynosiła co najmniej 5,0 mm dla opadów zarejestrowanych na posterunku opadowym „SGGW”. W poszczególnych profilach wodowskazowych dysponowano zróżnicowaną liczbą hydrogramów przepływu. W profilach „Rosoła” i „Płaskowicka” do weryfikacji modelu wybrano odpowiednio czternaście i osiem hydrogramów. W każdym z pozostałych sześciu profili wodowskazowych dysponowano pięcioma hydrogramami przepływu.

Profil wodowskazowy „Rosoła” jest głównym profilem badawczym w zlewni Potoku Służewieckiego, natomiast profil „Płaskowicka” ma istotne znaczenie w kontekście opracowywanej koncepcji przebudowy Potoku Służewieckiego. Sumy opadów dla czternastu deszczy (tych, które wywołały hydrogramy w profilu „Rosoła” wybrane do weryfikacji modelu), zarejestrowanych na posterunku opadowym „SGGW”, zawierały się w zakresie od 8,1 do 44,1 mm, a ich czas trwania wynosił od 30 do 290 minut. Średnia suma opadu dla analizowanych deszczy wynosiła 19,1 mm. Wartości przepływów, które obserwowano w profilu „Rosoła” w reakcji na analizowane opady, wynosiły od 4,462 do 22,066 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (przy wartości średniej 10,688 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>). Wartości najmniejszego i największego błędu względnego (procentowego), ustalone na podstawie pomierzonych i symulowanych przepły-



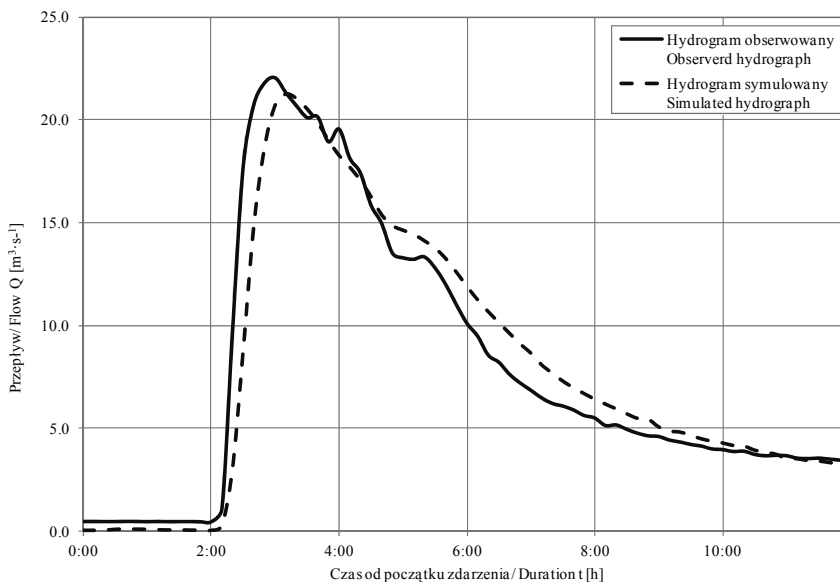
wów dla analizowanych zdarzeń w profilu „Rosoła”, wynosiły odpowiednio  $-1,2$  i  $-32,0\%$ . Średni błąd, obliczony przy uwzględnieniu wartości bezwzględnych błędów symulacji dla poszczególnych zdarzeń (zaniedbano znaki minus dla ustalonych błędów względnych), wynosił  $10,3\%$ . Średni błąd symulacji, obliczony w adekwatny sposób dla ośmiu zdarzeń w profilu „Płaskowicka”, wynosił  $11,4\%$ . Wartości najmniejszego i największego błędu wynosiły odpowiednio  $-0,1$  i  $39,8\%$ .

Przykładowe hydrogramy przepływu, tj. hydrogram obserwowany w profilu wodowskazowym „Rosoła” i hydrogram uzyskany w wyniku symulacji przy weryfikacji modelu w reakcji na opad zarejestrowany w dniu 15.08.2008 roku (wysokość opadu na posterunku „SGGW” wynosiła  $44,1$  mm – odpowiadała w przybliżeniu opadowi o praw-

dopodobieństwie  $10\%$ , a na posterunku „Okęcie” wynosiła  $24,2$  mm – oszacowane prawdopodobieństwo wynosi  $20\%$ ), przedstawiono na rysunku 5.

### Obliczenie przepływów prawdopodobnych

Jako zasadniczy cel artykułu przyjęto prognozę przepływów o prawdopodobieństwach przekroczenia  $50$ ,  $10$ ,  $2$  i  $1\%$ , wywołanych opadami deszczu o tym samym prawdopodobieństwie. Wykorzystując model SWMM adaptowany dla badanej zlewni, przeprowadzono prognozę przepływów w 8 przekrojach Potoku Służewieckiego (przekroje o numeracji: I–V, VIII–X) i w 2 przekrojach kanału Wolica (VI, VII), zlokalizowanych w charakterystycznych punktach tych cieków. Początek i koniec analizo-



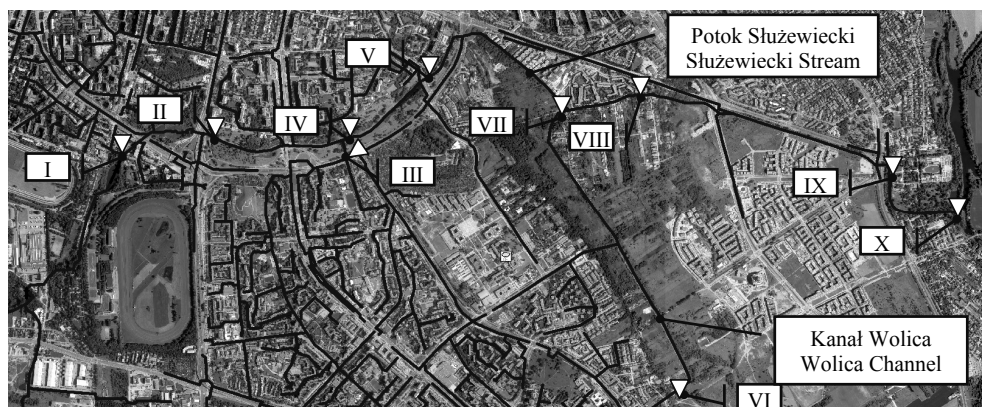
RYSUNEK 5. Hydrogramy obserwowany i symulowany w profilu „Rosoła”  
 FIGURE 5. Hydrographs observed and simulated in the profile of “Rosoła”

wanego odcinka Potoku Służewieckiego znajduje się pomiędzy 6+576 i 0+000 km (od stawu Wyścigi do ujścia w Jeziorze Wilanowskim). Przekrój numer III znajduje się na odcinku ujściowym kolektora deszczowego, odwadniającego dolną część obszaru dzielnicy Ursynów. Jeden z przekrojów w kanale Wolica jest położony tuż poniżej wylotu kolektora deszczowego, a drugi – przy ujściu do Potoku Służewieckiego. Lokalizację przekrojów obliczeniowych przedstawiono na rysunku 6 (na tle zdjęcia lotniczego), a ich kilometraż podano w tabeli 1.

W analizach za pomocą modelu SWMM przyjmowano opady o różnym czasie trwania w relacji do określonego prawdopodobieństwa i prognozowano hydrogramy przepływu, które różniły się wartościami przepływu kulminacyjnego. W ten sposób ustalono w każdym przekroju obliczeniowym przepływy o prawdopodobieństwach 50, 10, 2 i 1%, które odpowiadają największej wartości przepływu kulminacyjnego hydrogramu, obliczonej w reakcji na opad o krytycznym czasie trwania i określonym prawdopodobieństwie. Do obliczenia wysokości

opadów wykorzystano formułę zaproponowaną przez Bogdanowicz i Stachy'ego (1997). Bardzo ważnym elementem w prognozie przepływów było przyjęcie założenia o równomierności wysokości opadu deszczu w całej zlewni. Charakterystyki opadów obliczeniowych i wartości prognozowanych przepływów prawdopodobnych zestawiono w tabeli 1. Przykładowe hydrogramy przepływu, które prognozowano w przekroju obliczeniowym numer IV (zlokalizowany w pobliżu profilu wodowskazowego „Rosola”) w reakcji na opady o różnych prawdopodobieństwach, przedstawiono na rysunku 7. Hydrogramy przepływu, obliczone dla opadu o prawdopodobieństwie 10% w czterech wybranych przekrojach obliczeniowych Potoku Służewieckiego, zamieszczono na rysunku 8.

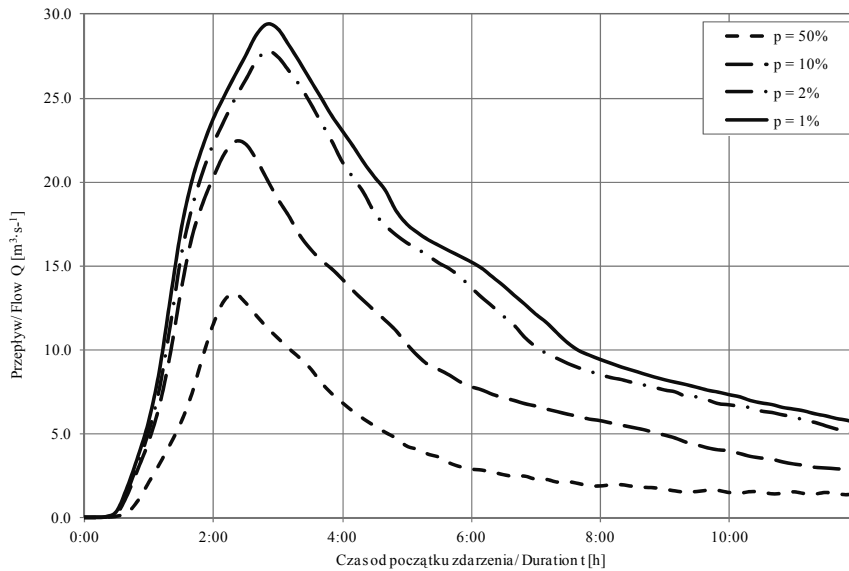
Największe wartości prognozowanych przepływów prawdopodobnych występują w profilach obliczeniowych IV i V (tab. 1). Gwałtowny wzrost przepływów w profilu IV (km 4+976), w stosunku do przepływów obliczonych w wyżej położonych profilach Potoku Służewieckiego (I, II), jest



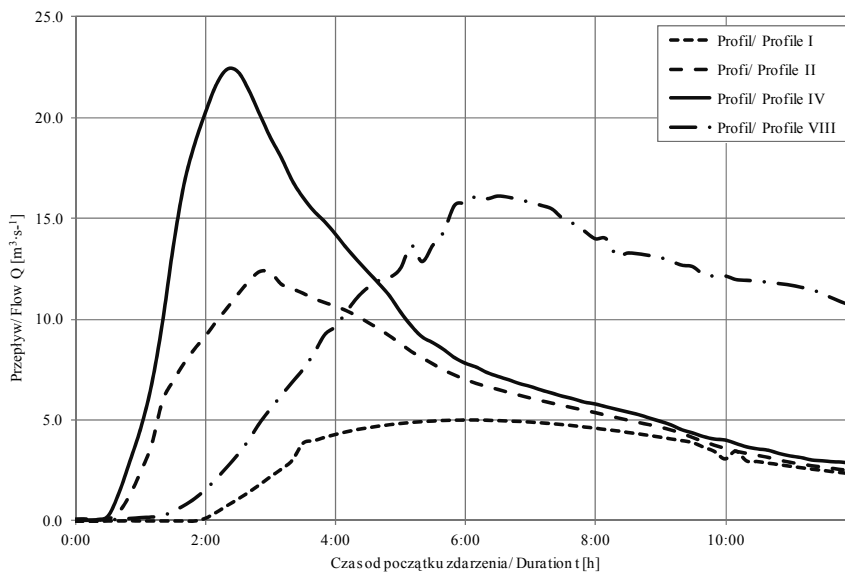
RYSUNEK 6. Lokalizacja przekrojów obliczeniowych w Potoku Służewieckim i kanale Wolica  
 FIGURE 6. Location of calculation's profiles in the Służewiecki Stream and the Wolica Channel

TABELA 1. Charakterystyki opadów obliczeniowych i wartości przepływów prawdopodobnych  
 TABLE 1. Characteristics of calculating rainfalls and values of probable flows

Nazwa kanału Name of channel	Numer przekroju Profile No.	Kilometraż Kilometr [km]	Prawdopodobieństwo Probability [%]	Krytyczny czas opadu Critical time [min]	Wysokość opadu Rainfall [mm]	Przepływ Flow [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Potok Służewiecki	I	6+576	50	180	25,8	2,137
			10	180	44,0	4,979
			2	170	56,7	5,702
			1	170	61,6	5,797
Potok Służewiecki	II	5+900	50	150	25,0	6,981
			10	150	42,9	12,348
			2	150	55,8	15,860
			1	150	60,6	16,802
Potok Służewiecki – kolektor/ collector	III	4+976	50	50	19,1	7,733
			10	40	31,1	11,648
			2	30	37,3	13,328
			1	30	40,6	13,924
Potok Służewiecki	IV	4+976	50	110	23,5	13,345
			10	120	41,5	22,451
			2	150	55,8	27,807
			1	150	60,6	29,387
Potok Służewiecki	V	4+267	50	130	24,4	13,863
			10	140	42,5	23,019
			2	150	55,8	28,825
			1	150	60,6	30,500
Kanał Wolica	VI	2+318	50	80	21,7	8,005
			10	80	37,6	9,770
			2	80	49,0	11,958
			1	80	53,3	12,402
Kanał Wolica	VII	0+000	50	130	24,4	2,373
			10	130	42,0	4,080
			2	160	56,2	5,563
			1	160	61,1	5,759
Potok Służewiecki	VIII	2+591	50	240	27,1	8,898
			10	240	45,8	16,075
			2	170	56,7	20,902
			1	120	58,8	20,907
Potok Służewiecki	IX	0+726	50	260	27,5	8,027
			10	260	46,3	13,275
			2	240	59,3	18,025
			1	240	64,4	18,640
Potok Służewiecki	X	0+000	50	260	27,5	7,811
			10	260	46,3	13,075
			2	240	59,3	17,833
			1	240	64,4	18,440



RYSUNEK 7. Hydrogramy obliczone w przekroju IV w reakcji na opady o różnych prawdopodobieństwach  
 FIGURE 7. Hydrographs calculated in profile IV in response to rainfalls with different probability

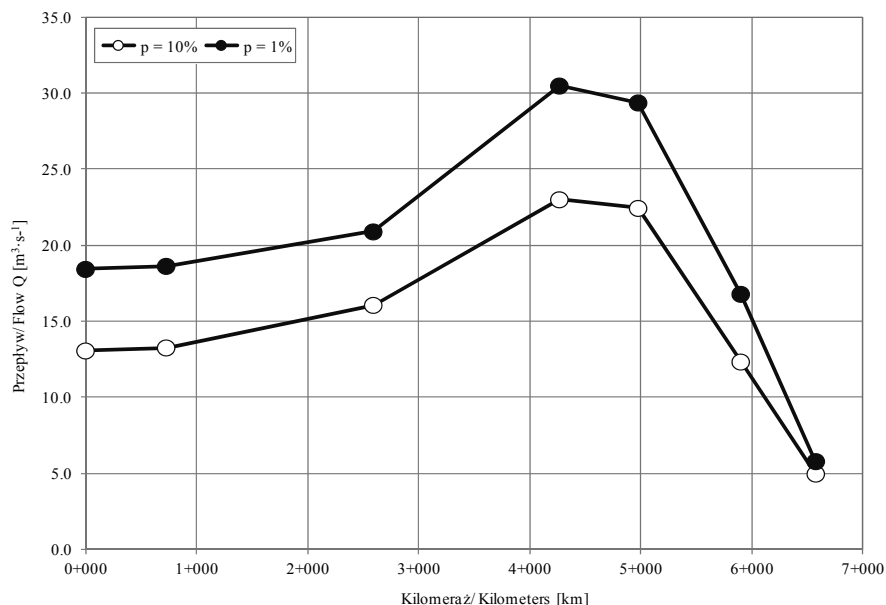


RYSUNEK 8. Hydrogramy obliczone w czterech przekrojach w reakcji na opad o prawdopodobieństwie 10%  
 FIGURE 8. Hydrographs calculated in four profiles in response to rainfall with probability of 10%

spowodowany dopływem dużej ilości wód opadowych z części obszaru dzielnicy Ursynów (zlewnia cząstkowa z rozbudowaną siecią kanalizacyjną). Wartości przepływów prawdopodobnych w przekroju III, zlokalizowanym na odcinku ujściowym kolektora deszczowego odwadniającego część obszaru Ursynowa, są tego samego rzędu jak przepływy prognozowane w profilu II. W przekrojach obliczeniowych VIII–X obliczono mniejsze wartości przepływów prawdopodobnych niż w wyżej położonym przekroju Potoku Służewieckiego. Przyczyną redukcji przepływów na odcinku od przekroju V do ujścia w Jeziorze Wilanowskim jest transformacja przepływów w kanale, a przede wszystkim wylewanie wód opadowych z koryta i ograniczenie odpływu przez liczne przepusty drogowe. Opisany przebieg zmienności przepły-

wów prawdopodobnych w 7 przekrojach Potoku Służewieckiego (I–II, IV–V, VIII–X), zlokalizowanych na odcinku od km 6+576 do 0+000, zilustrowano na przykładzie przepływów o prawdopodobieństwach 10 i 1% (rys. 9).

Ze względu na zbyt małą przepustowość koryta Potoku Służewieckiego na odcinku od przekroju V do ujścia w Jeziorze Wilanowskim w ramach koncepcji pt. „Przebudowa układu hydrologicznego...” (Waga-Bart, 2014) opracowano trzy warianty rozwiązań technicznych, które pozwolą zredukować przepływy prawdopodobne do wartości mniejszej niż przepływ brzegowy. Zaproponowane warianty przewidują przerzut wód kanału Wolica oraz części wód Potoku Służewieckiego poprzez przepompownie i rurociąg tłoczny bezpośrednio do Wisły, przebudowę koryta potoku na odcinku od km 3+340 do 4+060 w celu zwiększe-



RYSUNEK 9. Kształtowanie się przepływów prawdopodobnych w przekrojach Potoku Służewieckiego  
 FIGURE 9. Formation of probable flows in profiles of the Służewiecki Stream

nia jego przepustowości, retencjonowanie wody w dwóch suchych zbiornikach o łącznej pojemności retencyjnej 250 tys. m<sup>3</sup> i jednym zbiorniku wodnym (Księżym Stawie) z rezerwą powodziową wynoszącą około 20 tys. m<sup>3</sup>.

## Wnioski

1. Opracowanie modelu zlewni miejskiej wymagało uwzględnienia w nim dużej liczby obiektów (w tym sieci kanalizacyjnej, przepustów drogowych i zbiorników retencyjnych) oraz podziału zlewni na zlewnie cząstkowe (charakteryzujące się odmiennymi warunkami transformacji opadu w odpływ), aby najlepiej odwzorować proces opad – odpływ oraz zidentyfikować parametry systemu hydrologicznego i hydraulicznego badanej zlewni.

2. Największe wartości przepływów prognozowano w profilach obliczeniowych IV i V. Wartości przepływów prawdopodobnych w przekroju Potoku Służewieckiego numer V (km 4+267) wynoszą:  $Q_{50\%} = 13,863$ ,  $Q_{10\%} = 23,019$ ,  $Q_{2\%} = 28,825$  i  $Q_{1\%} = 30,500$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (wartości przepływów dla wszystkich profili zestawiono w tab. 1).

3. Gwałtowny wzrost przepływów w profilu IV (km 4+976) w stosunku do przepływów obliczonych w wyżej położonych profilach Potoku Służewieckiego – numer I oraz II (km 6+576 i 5+900) jest spowodowany dopływem dużej ilości wód opadowych poprzez kolektor usytuowany na obszarze dzielnicy Ursynów. Przepływy w kolektorze (przekrój III) są tego samego rzędu wielkości jak przepływy prognozowane w profilu II.

4. W przekrojach obliczeniowych VIII–X (odcinek Potoku Służewieckiego od km 2+591 do ujścia w Jeziorze Wilanowskim) obliczono mniejsze wartości przepływów prawdopodobnych niż w wyżej położonych przekrojach potoku. Przyczyną redukcji przepływów jest ich transformacja w kanale, a przede wszystkim wylewanie wód opadowych z koryta i ograniczenie odpływu przez liczne przepusty drogowe.

## Literatura

- Barszcz, M. (2009). Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 4 (46), 3–23.
- Barszcz, M. (2014a). Analiza wpływu zastosowania obiektów do infiltracji i retencji wód deszczowych na kształtowanie odpływu ze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie. *Gospodarka Wodna*, 74 (4), 134–140.
- Barszcz, M. (2014b). Zastosowanie modelu Santa Barbara Unit Hydrograph do symulacji hydrogramu przepływów w zlewniach zurbanizowanych. *Przegląd Geograficzny*, 86 (3), 381–391.
- Barszcz, M. (2014c). Adaptacja modelu Santa Barbara Unit Hydrograph do obliczania hydrogramu przepływów w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, XXXI, 61 (4), 21–34.
- Barszcz, M. (2015). Influence of applying infiltration and retention objects on the runoff of rainwater on a plot and catchment scale – case study of the Służewiecki Stream subcatchment in Warsaw. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24 (1), 57–65.
- Bogdanowicz, E. i Stachý, J. (1997). Maksymalne opady deszczu w Polsce, charakterystyki projektowe. Materiały badawcze IMGW, 23. *Hydrologia i Oceanologia* 85.

- Chow, M.F., Yusop, Z. i Toriman, M.E. (2012). Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 737–748.
- Rossman, L.A. (2005). *Storm water management model user's manual version 4*. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory.
- Sakson, G. i Zawilski, M. (2013). Wpływ zastosowania obiektów LID na funkcjonowanie miejskich systemów kanalizacyjnych. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 6, 246–248.
- SCS (Soil Conservation Service) (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. SCS (Soil Conservation Service). *Technical Release*, 55.
- USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service) (1975). *National Engineering Handbook. Section 4*. Washington: D.C: USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service).
- Waga-Bart (2014). *Przebudowa układu hydrologicznego obejmującego Potok Służewiecki i Rów Wolica w celu zabezpieczenia przeciwpowodziowego rejonu dolnego biegu Potoku Służewieckiego. Etap II*. Warszawa: Waga-Bart.
- Zawilski, M., i Sakson, G. (2008). Wykorzystanie programu SWMM w modelowaniu systemów kanalizacyjnych. W: J. Łomotowski (red.). *Problemy zagospodarowania wód opadowych* (s. 155–169). Warszawa: Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.

## Streszczenie

**Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej.** W niniejszym artykule przedstawiono wyniki zastosowania modelu SWMM, adaptowanego dla zurbanizowanej

zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie, do obliczenia przepływów o prawdopodobieństwach 50, 10, 2 i 1% wywołanych ulewami. Przepływy prawdopodobne obliczono w ośmiu przekrojach Potoku Służewieckiego (zlokalizowanych na odcinku od km 0+000 do 6+576) i dwóch przekrojach Kanału Wolica (dopływ Potoku Służewieckiego). Największe wartości przepływów obliczono w Potoku Służewieckim w profilu numer V:  $Q_{50\%} = 13,863$ ,  $Q_{10\%} = 23,019$ ,  $Q_{2\%} = 28,825$  i  $Q_{1\%} = 30,500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

## Summary

**The application of the SWMM model to forecast probable flows in urban catchment.** The article presents the results of an application of the SWMM model, adapted for the urbanized catchment of the Służewiecki Stream in Warsaw, to calculating flows with probability of 50, 10, 2 and 1% caused by heavy rains. Probable flows were calculated in eight profiles of the Służewiecki Stream (located on the section from km 0+000 to 6+576) and two profiles of the Wolica Channel (a tributary of the Służewiecki Stream). The highest values of flows were calculated in the Służewiecki Stream in the profile number V:  $Q_{50\%} = 13,863$ ,  $Q_{10\%} = 23,019$ ,  $Q_{2\%} = 28,825$  and  $Q_{1\%} = 30,500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Author's address:

Mariusz Barszcz  
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
 Katedra Inżynierii Wodnej  
 ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
 Poland  
 e-mail: mariusz\_barszcz@sggw.pl