

# Wpływ rodzaju nawierzchni na wybrane parametry hydrauliczne i jakościowe kanalizacji deszczowej

## Influence of surface type on selected hydraulic and qualitative characteristics of storm water system

Magda Sabat, Anna Musz-Pomorska, Marcin K. Widomski\*)

**Słowa kluczowe:** LID, powierzchnie wodoprzepuszczalne, SWMM, kanalizacja deszczowa

### Streszczenie

Wraz ze wzrostem udziału powierzchni utwardzonych w stosunku do naturalnych, następuje skrócenie czasu odpływu wód opadowych ze zlewni, wzrasta ilość odpływających wód powierzchniowych oraz ładunku zanieczyszczeń odprowadzanych systemem kanalizacji do odbiornika. Zjawisko to negatywnie wpływa na bilans wodny zlewni, oraz prowadzi do wzrostu częstości występowania podtopień, co jest związane z niedostosowaniem możliwości odbioru odpływu powierzchniowego przez istniejące systemy odwodnieniowe.

W pracy zaprezentowano wyniki badań modelowych warunków hydraulicznych transportu ścieków deszczowych w wybranym fragmencie sieci deszczowej. Badania przeprowadzono w programie SWMM 5 dla trzech opadów, różniących się czasem trwania i intensywnością. Badania symulacyjne przeprowadzono dla zlewni rzeczywistej oraz dla zlewni, dla której powierzchnię słabo- i nieprzepuszczalną zastąpiono materiałem wodoprzepuszczalnym. Przeprowadzone badania symulacyjne, na podstawie analizy wartości wielkości przepływu, prędkości oraz ilości odprowadzanej zawiesiny ogólnej umożliwiły ocenę wpływu zmiany rodzaju nawierzchni na warunki hydrauliczne i jakościowe pracy sieci.

**Keywords:** LID, water-permeable surfaces, SWMM, storm water drainage system

### Summary

Along with the increase in share of the sealed surfaces in the catchment, the decrease in the time of rainwater outflow from the catchment as well as the increase in surface runoff volume and pollutants loads delivered to stormwater receiver occur. The above phenomenon negatively affects the natural water balance of catchment and results in increased number of flooding caused by insufficient interception and removal of surface runoff by existing stormwater networks.

This paper presents results of modeling studies concerning hydraulic conditions of stormwater transport in a selected part of municipal stormwater network. The studies were performed by SWMM software for three rainfall events, different in duration and intensity. The simulations were performed for the real catchment and for catchment in which selected non-permeable surfaces were replaced by permeable concrete. The performed studies based on volumetric flow rate, flow velocity and TSS load values allowed analysis on influence of permeable pavements introduction on hydraulic and qualitative characteristics of the stormwater system.

## 1. Wstęp

Wzrost powierzchni uszczelnionych w zlewni zurbanizowanej powoduje zauważalne zmiany w hydrologii zlewni i prowadzi do występowania wysokich szczytowych przepływów w krótkim czasie. W przypadku zlewni zurbanizowanej o powierzchni szczelnej 70-100% spływ powierzchniowy może sięgać nawet 55% wysokości opadów, natomiast wartość ta w zlewniach naturalnych wynosi około 10 % [10, 25].

Dotychczas stosowane systemy kanalizacji deszczowej miały za zadanie gromadzić i transportować wody opadowe, spływające z obszarów miejskich, do pobliskich odbiorników wodnych [9]. Stosowanie tradycyjnych systemów kanalizacji deszczowej w warunkach zmieniających się częstotliwości i wzorców opadów prowadzi

może do występowania lokalnych wylań. Obserwowane w ostatnich latach zmiany klimatyczne spowodowały zmianę w podejściu do projektowania i działania systemów odwadniających [18, 30]. Obecne, rozwiązania te mają uwzględniać dodatkowo aspekty gospodarki wodnej w miastach, takie jak jakość spływu, walory wizualne, wartości rekreacyjne, ochronę środowiska i różnorodne wykorzystanie wody opadowej [14, 40]. Stąd wiele państw wdraża techniki zrównoważonych systemów kanalizacji deszczowej, takich jak: Sustainable Urban Drainage System (SUDS) [39], Low-Impact Development (LID) [11, 13] czy Water Sensitive Urban Design (WSUD) [28], będący częścią SUDS. Głównym celem zrównoważonych systemów jest zarządzanie powodzią miejską poprzez kontrolę źródła odpływu wód opadowych [2, 11, 20, 21]. Techniki te, w tym LID, zmniejszają ryzyko powodzi poprzez szereg środków

\*) mgr inż. Magda Sabat, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, magdasabat1@gmail.com

dr inż. Anna Musz-Pomorska, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, a.musz-pomorska@pollub.pl

dr hab. inż. Marcin K. Widomski, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, m.widomski@pollub.pl

niekonstrukcyjnych i strukturalnych tj. zwiększenie przepuszczalności zlewni poprzez stosowanie przepuszczalnych materiałów [1], budowę zielonej infrastruktury (zielone dachy, zielone ściany) [3,16], stosowanie systemów bioretencji czy zbiorników retencyjnych [m.in. 20, 31, 36].

Liczne badania [np. 7, 10, 24, 26, 32, 33, 37] pokazują, iż działania LID polegające na wdrażaniu zielonej infrastruktury, prowadzą do znacznego zmniejszenia spływu powierzchniowego oraz ograniczenie szczytów przepływu nawet o 60%.

Zrównoważone systemy odprowadzania wód opadowych bardzo często są zorientowane również na zwiększoną infiltrację wód opadowych do gleby, a tym samym poprawę zaburzonego bilansu wodnego. W ramach Low Impact Development stosowane są klasyczne materiały nawierzchniowe ze szczelinami lub materiały przepuszczalne dla wody (w tym przepuszczalne betony lub asfalty), pozwalające na zmniejszenie objętości spływu i zwiększenie stopnia infiltracji [5, 35, 41].

W pracy przedstawiono wyniki badań modelowych pracy sieci kanalizacji deszczowej, w warunkach wystąpienia trzech różnych opadów charakteryzujących się zmiennym czasem trwania i intensywnością, przeprowadzone dla zlewni rzeczywistej, w ok. 70% pokrytej powierzchnią słabo- lub nieprzepuszczalną oraz dla zlewni, w której powierzchnię słabo i nieprzepuszczalną zastąpiono materiałami wodoprzepuszczalnymi. Rodzaju nawierzchni nie zmieniono jedynie dla jezdni. Dodatkowo pokazano wielkość odpływu zanieczyszczeń, w postaci zawiesiny ogólnej, z badanej zlewni.

## 2. Metodyka pomiarów

### Charakterystyka zlewni

Badana zlewnia, o powierzchni ok. 5,26 ha, zlokalizowana jest w północnej części miasta Chełm, obejmuje tereny przy ulicy Okyszowskiej oraz część obszaru z ulicy Towarowej. Wody opadowe odprowadzane są do rzeki Uherki. Wybrany fragment miasta obejmuje głównie tereny usługowe i przemysłowe oraz zabudowę jednorodziną. Sieć zbudowana jest z przewodów betonowych o średnicach od 250 mm do 1000 mm. Średnica przewodów sieciowych dn 250 mm była zgodna z zasadami projektowania aktualnymi w momencie budowy badanej sieci.

### Model hydrauliczny

Model sieci kanalizacji deszczowej wykonano w programie SWMM 5.0, opracowanym i udostępnionym przez EPA, USA [15]. Dane niezbędne do budowy modelu (średnice, materiał przewodów, zagłębienie sieci, rodzaj nawierzchni zlewni) uzyskano od zarządcy sieci.

Badaną zlewnię podzielono na 73 zlewnie cząstkowe, charakteryzujące się podobnym stopniem uszczelnienia powierzchni oraz spad-

kiem terenu. W zbudowanym modelu wyróżniono 97 przewodów, 96 węzłów oraz jeden odbiornik wód opadowych (rys. 1).

Badania symulacyjne przeprowadzono przyjmując: czas trwania symulacji 3 doby, krok czasowy dla raportowania 5 minut, krok czasowy do wykonywania obliczeń 20 sekund, liczbę dni bezdeszczowych przed wykonaniem symulacji 5 dni.

Tabela 1. Parametry zlewni rzeczywistej

Table 1. Characteristics of real catchment

Parametry zlewni	Jednostka	Wartość		
Spadek terenu	[%]	0,11 – 3,40		
Szerokość ścieżki spływu	[m]	2,85 – 46,87		
Współczynnik infiltracji minimalny	[mm/h]	0,50 <sup>(1)</sup>	100,00 <sup>(2)</sup>	8,12 <sup>(3)</sup>
Współczynnik infiltracji maksymalny	[mm/h]	3,00 <sup>(1)</sup>	4,00 <sup>(2)</sup>	3,70 <sup>(3)</sup>
Stała zanikania intensywności infiltracji	[1/h]	4,00		
Współczynnik Manninga dla powierzchni nieprzepuszczalnych	[-]	0,012		
Współczynnik Manninga dla powierzchni przepuszczalnych	[-]	0,15		
Głębokość retencji powierzchni dla powierzchni nieprzepuszczalnej,	[mm]	1,50*		
Głębokość retencji powierzchni dla powierzchni przepuszczalnej,	[mm]	4,50*		
Procent powierzchni nieprzepuszczalnej, gdzie nie występuje retencja powierzchniowa	[%]	60,00*		

\*Wartości przyjęto na podstawie danych literaturowych [15], <sup>(1)</sup> – wartości dla powierzchni słaboprzepuszczalnej [27], <sup>(2)</sup> – wartości dla terenów zielonych [27], <sup>(3)</sup> – wartości dla powierzchni wodoprzepuszczalnej [42]

Tabela 2. Parametry przyjętych wariantów deszczy

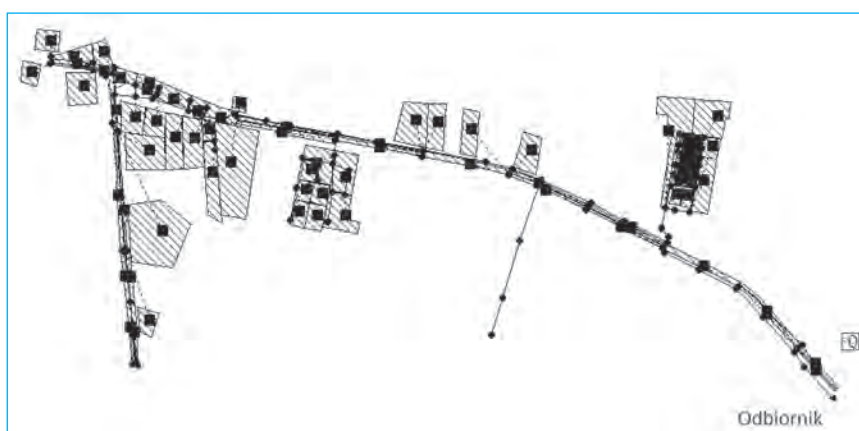
Table 2. Characteristics of assumed rainfall events

Wariant	Całkowity czas trwania deszczu [h]	Odpływ jednostkowy [dm <sup>3</sup> /(s·ha)]	Wysokość opadu [mm]
Deszcz I	12,00	8,00	32,40
Deszcz II	1,50	80,00	43,60
Deszcz III	2,50	159,50	143,55

W badaniach modelowych uwzględniono trzy warianty deszczy, różniących się czasem trwania oraz intensywnością. W tab. 2 przedstawiono parametry opadów przyjętych do obliczeń. Ze względu na brak pomiarów, natężenie deszczu oraz czas jego trwania przyjęto na podstawie literatury [38].

Z uwagi, iż badana sieć została wybudowana w drugiej połowie XX wieku i średnice przewodów wymiarowane były na podstawie przepływów obliczeniowych, wyznaczonych za pomocą wzoru Błaszczyka, do modelu wartości odpływów również wyznaczono za pomocą tej zależności. Obecnie prowadzone badania wskazują, iż model ten daje zaniżone, w porównaniu do rzeczywistych, wartości odpływów [22].

W analizach uwzględniono wpływ zastosowania LID, w postaci powierzchni przepuszczalnych, na wielkość odpływu oraz ilość odprowadzanych zanieczyszczeń. Przeprowadzono dwa warianty obliczeń uwzględniające: wariant A – analizy dla zlewni o rzeczywistym pokryciu powierzchnią nieprzepuszczalną oraz wariant B



Rys. 1. Schemat badanej zlewni

Fig. 1. Scheme of developed model

– obejmujący zastosowanie LID w postaci powierzchni przepuszczalnych. Zastosowanie nowoczesnych, przepuszczalnych pokryć uwzględniono dla całej powierzchni słabo i nieprzepuszczalnej danej zlewni cząstkowej, poza powierzchnią jezdni.

### Model jakościowy

Obliczenia jakościowe oparto o modele jakości dostępne w programie SWMM 5, w tym równania gromadzenia i zmywania zanieczyszczeń z powierzchni zlewni. Do obliczeń gromadzenia zanieczyszczeń i ich zmywania z terenu przyjęto modele eksponentialne, odpowiednio równania (1), (2) [4, 6, 27] oraz model oparty o średnie stężenie dla zjawiska opadowego (event mean concentration, EMC) (3) [8, 23, 34].

$$B = C_2(1 - e^{-C_2 t}) \quad (1)$$

$$W = C_1 Q^{C_3} \quad (2)$$

$$EMC = \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q} \quad (3)$$

gdzie:  $B$  – stężenie zanieczyszczenia nagromadzonego na powierzchni,  $mg/dm^3$ ;  $C_1$  – maksymalne stężenia zanieczyszczenia,  $mg/dm^3$ ;  $C_2$  – czas osiągnięcia połowy maksymalnego stężenia zanieczyszczenia,  $1/d$ ;  $t$  – czas,  $d$ ;  $W$  – stężenie zanieczyszczenia w splywie powierzchniowym,  $mg/dm^3$ ;  $C_3$  – współczynnik zmywania równy co do wartość EMC;  $Q$  – natężenie splywu powierzchniowego,  $dm^3/s$ ;  $C_i$  – stężenie badanego zanieczyszczenia,  $mg/dm^3$ ;  $Q_i$  – przepływ objętościowy wód deszczowych,  $dm^3/s$ .

Dane wejściowe, przedstawione w tab. 3, przyjęto na podstawie badań literaturowych [17, 19, 29, 34, 38] dla dwóch rodzajów zagospodarowania terenu: terenu zurbanizowanego, do którego przypisano jezdnie asfaltowe, parkingi, bruki kamienne i klinkierowe i dachy oraz terenu niezagospodarowanego (zielonego), do którego przypisano ogrody, zieleńce i trawniki.

Tabela 3. Dane wejściowe do obliczeń jakościowych  
Table 3. Input data applied to qualitative calculations

Rodzaj zlewni	Gromadzenie zanieczyszczeń		Zmywanie zanieczyszczeń	
Zlewnia zurbanizowana	TSS	$C_1=50 \text{ mg/dm}^3$ $C_2=2 \text{ 1/d}$	TSS	EMC=119,5
Zlewnia zielona	TSS	$C_1=100 \text{ mg/dm}^3$ $C_2=3 \text{ 1/d}$	TSS	EMC=206,5

### Walidacja modelu

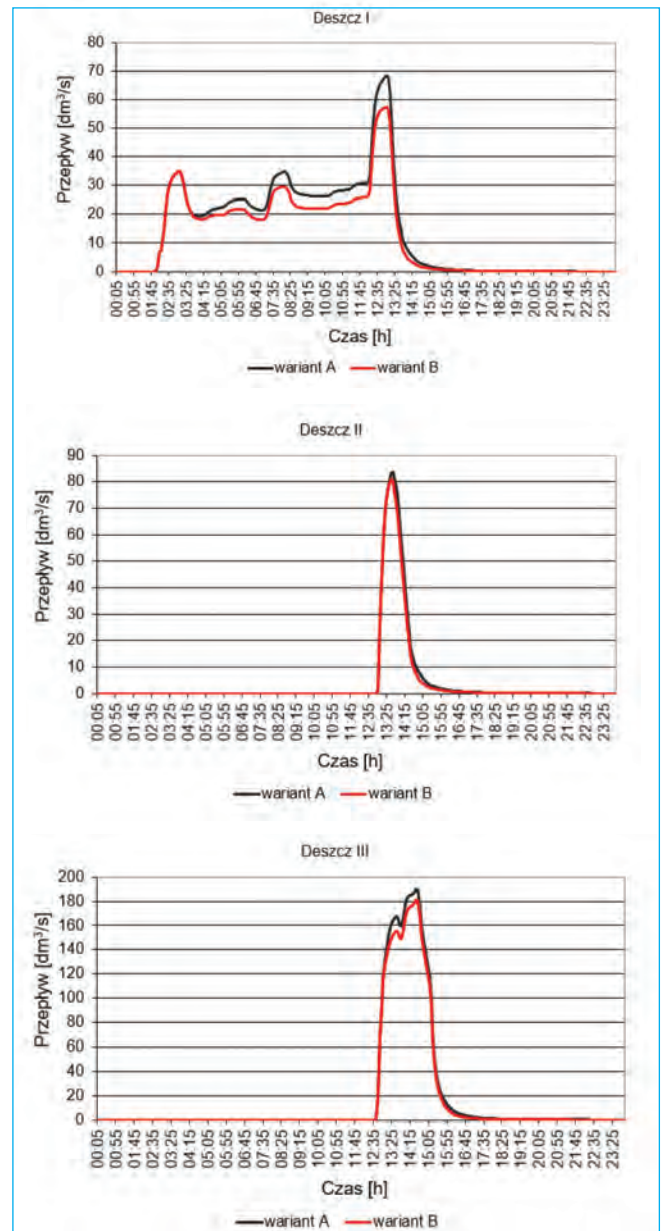
Analiza statystyczna wyników obliczeń modelowych objęła określenie istotności różnic pomiędzy wartościami natężenia przepływu oraz ładunku zawiesiny ogólnej, zaobserwowanymi w końcowym węźle sieci dla dwóch wariantów obliczeń (A i B) i danego opadu deszczu. Analizę normalności rozkładu zmiennych, stanowiącą podstawę do wyboru testu statystycznego, wykonano za pomocą metody Shapiro-Wilka. W przypadku rozkładów danych innych niż normalne zastosowano nieparametryczny test Wilcozona, jako alternatywę dla testu t-Studenta.

### 3. Wyniki

Wyniki badań symulacyjnych parametrów hydraulicznych (prędkości przepływu i wielkości przepływu) pracy sieci przedstawiono w tab. 4 oraz na wykresach (rys. 2 i 3).

Tabela 4. Dane wejściowe do obliczeń jakościowych  
Table 4. Input data applied to qualitative calculations

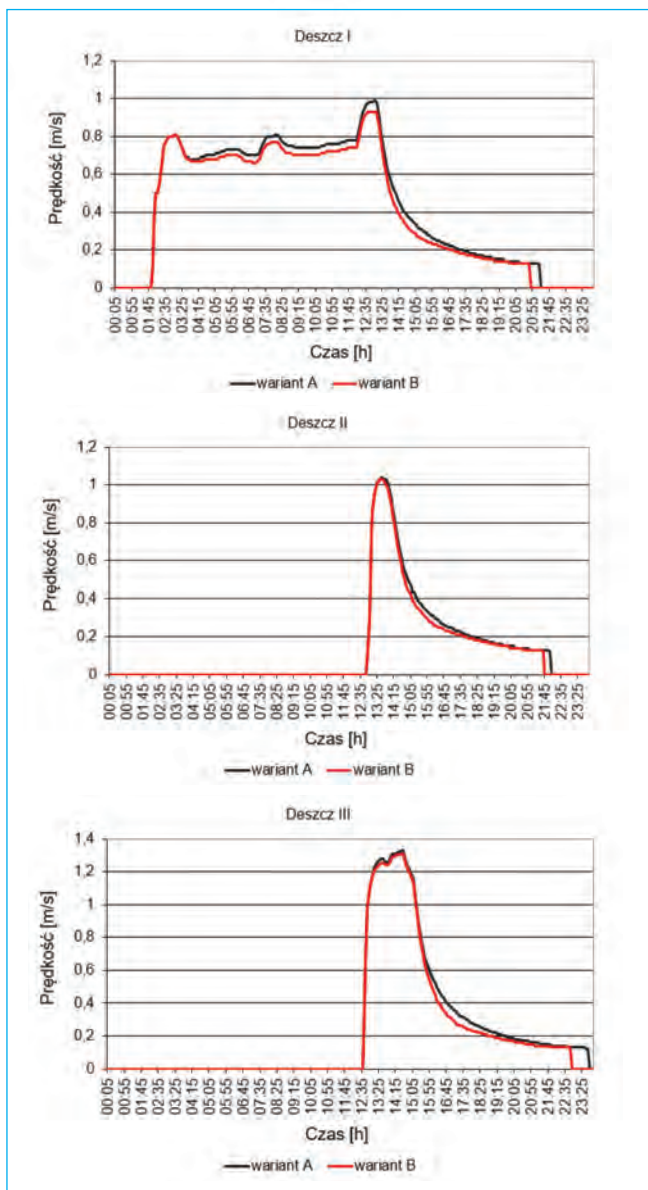
Badany parametr	Jednostka	Deszcz I		Deszcz II		Deszcz III	
		Wariant A	Wariant B	Wariant A	Wariant B	Wariant A	Wariant B
1	2	3	4	5	6	7	8
Prędkość przepływu $v < 0,3$ [m/s]	[szt]	47	40	34	35	23	22
Prędkość przepływu $0,3 < v < 0,6$ [m/s]	[szt]	12	24	22	25	29	32
Prędkość przepływu $v > 0,6$ [m/s]	[szt]	38	33	41	37	45	43



Rys. 2. Zmiana rozkładu przepływu w czasie dla różnych deszczy dla wariantu A i B obliczeń

Fig. 2. Time-related flow distribution for different rains and for A and B variants of calculations





Rys. 3. Zmiana rozkładu prędkości przepływu w czasie dla różnych deszczy dla wariantu A i B obliczeń

Fig. 3. Time-related flow velocity distribution for different rains and for A and B variants of calculations

Wyniki badań prędkości przepływu wskazują, iż wraz ze wzrostem natężenia deszczu polepszają się warunki hydrauliczne przepływu i zwiększa się liczba przewodów, w których zapewniona jest prędkość samooczyszczania (wg polskich wytycznych min. 0,6 m/s) (tab. 4). W przypadku wariantu A obliczeń prędkość samooczyszczania uzyskano w 39 %, 42 % oraz 46 % przewodów, w przypadku wariantu B: 34%, 38% oraz 44% przewodów, odpowiednio dla deszczu I, II oraz III. Po zmianie nawierzchni słabo- oraz nieprzepuszczalnej na przepuszczalną (wariant B) zaobserwowano zmniejszenie ilości przewodów, dla których zapewniona jest prędkość samooczyszczania dla poszczególnych opadów, w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla zlewni rzeczywistej. Zaobserwowano również obniżenie prędkości przepływu w porównaniu do wariantu A obliczeń. Największe zmiany zaobserwowano dla deszczu I i III, charakteryzujących się dłuższym czasem trwania w porównaniu do deszczu II (rys. 3). Maksymalne zaobserwowane różnice w wysokości prędkości przepływu dla poszczególnych opadów wynosiły odpowiednio: 0,07 m/s, 0,04 m/s oraz 0,07 m/s, co daje zmniejszenie wysokości prędkości o 12%, 6% i 12% w stosunku do wartości uzyskanych dla wariantu A.

Maksymalna obliczona prędkość przepływu w kanale końcowym wynosi dla wariantu A i B obliczeń: 0,99 m/s i 0,93 m/s, 1,04 m/s i 1,03 m/s, 1,33 m/s i 1,31 m/s odpowiednio dla deszczu I, II i III (Rys. 3). Dla żadnego z przyjętych wariantów opadów nie przekroczono prędkości maksymalnej, która dla kanałów deszczowych wynosi 7 m/s [22].

Podobne zależności zaobserwowano również w przypadku wielkości przepływu (rys. 2). Wielkość przepływu, zarówno dla wariantu A i B obliczeń, zwiększała się wraz ze wzrostem natężenia deszczu. W przypadku wariantu B obliczeń, zaobserwowano dla każdego z badanych deszczy zmniejszenie wielkości przepływu, w porównaniu do zlewni rzeczywistej.

W przypadku wariantu deszczu Nr II i Nr III kształt krzywych dla zlewni rzeczywistej i po zmianie rodzaju nawierzchni jest prawie identyczny (rys. 2). Widoczne jest zmniejszenie wielkości przepływu ze zlewni ze zmienioną powierzchnią, ze słabo oraz nieprzepuszczalnej, na przepuszczalną w stosunku do zlewni rzeczywistej. Zaobserwowane maksymalne wartości przepływów chwilowych dla poszczególnych deszczy, odpowiednio dla wariantu A i B obliczeń, są równe: 68,45 dm<sup>3</sup>/s i 57,39 dm<sup>3</sup>/s (dla deszczu I), 83,71 dm<sup>3</sup>/s i 81,19 dm<sup>3</sup>/s (dla deszczu II) oraz 190,18 dm<sup>3</sup>/s i 181,24 dm<sup>3</sup>/s (dla deszczu III). Dla poszczególnych deszczy, po zmianie rodzaju nawierzchni na wodoprzepuszczalną, zaobserwowano zmniejszenie odpływu, w stosunku do rzeczywistej powierzchni zlewni o 16%, 3% i 4,7%.

Oparta o nieparametryczny test Wilcozona analiza istotności zaobserwowanych różnic, pomiędzy wartościami chwilowego natężenia przepływu dla tego samego opadu i dwóch wariantów obliczeń, wykazała istotne statystycznie różnice pomiędzy medianami obu zmiennych w trzech rozpatrywanych przypadkach różnych opadów.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań jakościowych (stężenia i ładunków zawiesiny) modelowanych zanieczyszczeń, odprowadzanych do odbiornika z badanej zlewni.

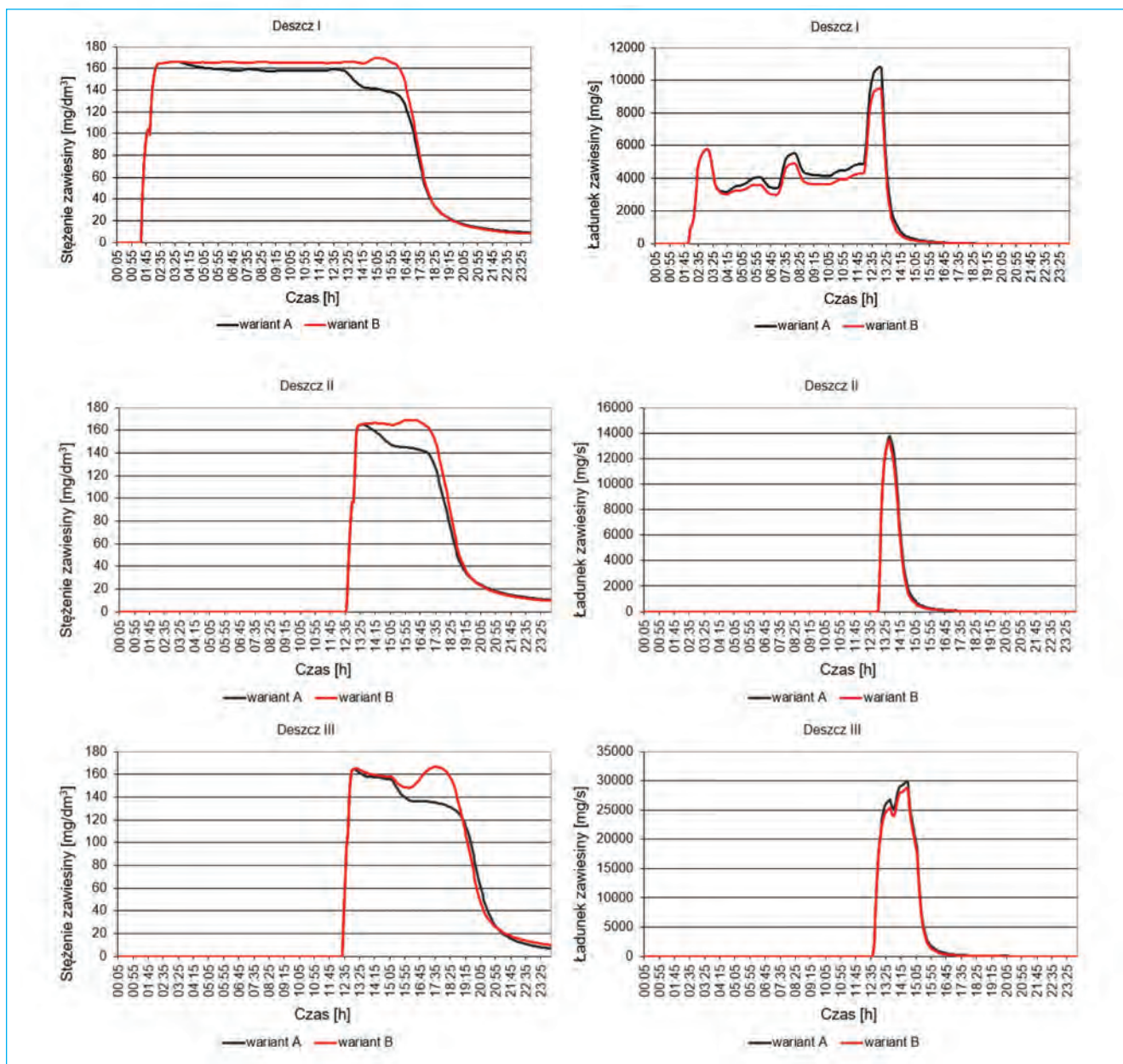
Przedstawione wyniki obliczeń stężenia zawiesiny w wodach opadowych odprowadzanych do odbiornika, wskazują na przekroczenie jej zawartości, względem wartości dopuszczalnej, określonej dla wód opadowych odprowadzanych do odbiorników wodnych, dla wszystkich zdarzeń opadowych. Zgodnie z rozporządzeniem [12] dopuszczalne stężenia zawiesiny ogólnej w wodach opadowych, odprowadzanych do odbiornika, wynosi 100 mg/dm<sup>3</sup>. Z uwagi na przyjęcie do badań modelowych, literaturowych wartości zanieczyszczenia w postaci zawiesiny ogólnej [12], badania te należy powtórzyć, uzupełniając o pomiary terenowe, mające na celu określenie rzeczywistych wartości gromadzonego zanieczyszczenia. Niemniej jednak uzyskane wyniki są wskazówką do podjęcia działań, mających na celu kontrolę jakości odprowadzanych do odbiornika wód opadowych oraz zastosowanie ich podczyszczania.

Przedstawione na rys. 4 zmiany ładunku zanieczyszczeń odprowadzanych do odbiornika wskazują, iż zastosowana zmiana powierzchni słabo i nieprzepuszczalnej na wodoprzepuszczalną spowodowała zmniejszenie ładunku zawiesiny odprowadzanej do odbiornika. Dla wariantu B obliczeń, zaobserwowano zmniejszenie ładunku zawiesiny w wodzie opadowej, w porównaniu do wariantu A, o: 12,5% (dla deszczu I), 7,4% (dla deszczu II) oraz 5,4% (dla deszczu III).

Analiza istotności zaobserwowanych różnic pomiędzy wartościami ładunku zawiesiny ogólnej dla tego samego opadu i dwóch wariantów obliczeń, przeprowadzona za pomocą testu Wilcozona, wykazała w każdym badanym przypadku istotną statystycznie różnicę pomiędzy medianami obu zmiennych.

#### 4. Wnioski

Na podstawie analizy wyników parametrów hydraulicznych uzyskanych za pomocą badań modelowych, dla przyjętych opadów oraz rodzajów powierzchni, można stwierdzić, iż zmiana powierzchni zlewni słabo- bądź nieprzepuszczalnej na przepuszczalną, spowo-



Rys. 4. Zmiana stężenia i ładunku zawiesiny ogólnej, odprowadzanych do odbiornika, dla różnych opadów – dla wariantu A i B obliczeń

Fig. 4. Concentrations and loads of Total Suspended Solids (TSS), discharged to storm water receiver for different rainfall events – variant A and B of calculations

dowała zmniejszenie wielkości oraz prędkości przepływu ścieków deszczowych. Wpływ zastosowanego rozwiązania zaobserwowano dla wszystkich zdarzeń opadowych, przy czym największą redukcję przepływu uzyskano dla deszczu I (zmniejszenie o 16%), charakteryzującego się najmniejszą intensywnością. W przypadku prędkości odpływu, najwyraźniejsze efekty uzyskano dla deszczu I i III (redukcja prędkości o 12%), charakteryzujących się wydłużonym czasem trwania w porównaniu do deszczu II.

Przeprowadzona, po przyjęciu danych literaturowych, analiza jakościowa wód deszczowych odprowadzanych z badanej zlewni do rz. Uherki wykazała przekroczenie na wylocie do odbiornika dopuszczalnego stężenia zawiesiny ogólnej dla wszystkich wariantów obliczeń. Analizując zmianę ładunku zawiesiny ogólnej, można zauważyć, iż zmiana powierzchni zlewni, przyczyniła się również do ograniczenia ładunku zawiesiny odprowadzanej do odbiornika. Dla wariantu B obliczeń, w przypadku deszczu o najmniejszej intensywności, uzyskano zmniejszenie ładunku zawiesiny o ponad 12%.

Ze względu na brak kalibracji modelu oraz przyjęcie literaturowych wartości stężenia zanieczyszczeń w postaci zawiesiny ogólnej, przedstawione w pracy wyniki badań należy traktować jako orientacyjne. Niemniej jednak zauważalny jest istotny statystycznie wpływ zastosowanego rozwiązania na wielkość odpływu oraz ładunku zanieczyszczeń odprowadzanych z badanej zlewni do odbiornika wód opadowych (rzeki).

## LITERATURA

- [1] Abdollahian S., Kazemi H., Rockaway T., Gullapalli V., 2018, "Stormwater Quality Benefits of Permeable Pavement Systems with Deep Aggregate Layers", *Environments*, vol. 5(6):68.
- [2] Ahiablame L.M., Engel B.A. Chaubey, I., 2012, "Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research", *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 223:4253-4273.



- [3] Ascione F., Francesca De Masi R., Mastellone M., Ruggiero S., Vanoli G.P., 2020, "Green Walls, a Critical Review: Knowledge Gaps, Design Parameters, Thermal Performances and Multi-Criteria Design Approaches", *Energies*, vol. v13:2296.
- [4] Berretta C., Gnecco I., Lanza L.G., La Barbera P., 2007, "An investigation of wash-off controlling parameters at urban and commercial monitoring sites", *Water Science and Technology*, vol. 56(12):77-84.
- [5] Boogaard F., Lucke T., 2019, "Long-Term Infiltration Performance Evaluation of Dutch Permeable Pavements Using the Full-Scale Infiltration Method", *Water*, vol. 11:320.
- [6] Borris M., Viklander M., Gustafsson A.M., Marsalek J., 2013, "Modelling the effects of changes in rainfall event characteristics on TSS loads in urban runoff", *Hydrological Processes*, vol. 28(4):1787-1796.
- [7] Bressy A., Gromaire M.C., Lorgeoux C., Saad M., Leroy F., Chebbo G., 2014, "Efficiency of source control systems for reducing runoff pollutant loads: Feedback on experimental catchments within Paris conurbation", *Water Research*, vol. 57:234-246.
- [8] Chen J., Adams B.J., 2007, "A derived probability distribution approach to stormwater quality modelling", *Advances in Water Resources*, vol. 30:80-100.
- [9] Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos M.R. Rauch W., Schilling W., Urbanas B., 2007, "Toward the sustainable management of urban stormwater", *Indoor and Built Environment*, vol. 16:273-285.
- [10] Demuzerea M.K., Orru O., Heidrich E., Olazabal D., Geneletti H., Orru A.G., et al., 2014, "Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure", *Journal of Environmental Management*, vol. 146:107e115.
- [11] Dietz M., 2007, "Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions", *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 186:351-363.
- [12] Dz U Nr 137, poz. 1800, 2014, "Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego.
- [13] Elliott A.H., Trowsdale S.A., 2007, "A review of models for low impact urban stormwater drainage", *Environmental Modelling & Software*, vol. 22:394-405.
- [14] Ellis J.B., D'Arcy B.J., 2002, "Chatfield, P.R. Sustainable urban-drainage systems and catchment planning", *Water Environmental Journal*, vol. 16:286-291.
- [15] EPA SWMM v.5.018. Manual v.5.0. US Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/ednrmrnl/models/swmm/>
- [16] Gaffin S.R., Khanbilvardi R., Rosenzweig C., 2009, "Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City", *Sensors*, vol. 9:2647-2660.
- [17] Goonetilleke A., Thomas E., Ginn S., Gillbert D., 2005, "Understanding the role of land use in urban stormwater quality management", *Journal of Environmental Management*, vol. 74:31-42.
- [18] Huong H.T.L., Pathirana A., 2013, "Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho City, Vietnam", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17:379-394.
- [19] Jacob JS., Lopez R., 2009, "Is denser greener? An evaluation of higher density development as an urban stormwater-quality best management practice", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 45(3):687-701.
- [20] Kaykhosravi S., Khan U.T., Jadidi A., 2018, "A Comprehensive Review of Low Impact Development Models for Research, Conceptual, Preliminary and Detailed Design Applications", *Water*, vol. 10:1541.
- [21] Khan U.T., Valeo C., Chu A., van Duin B., 2012, "Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 2-Water quality performance", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 39:1222-1233.
- [22] Kotowski A., Kaźmierczak B., 2010, „Probabilistyczne modele opadów miarodajnych do projektowania i weryfikacji częstości wylewów z kanalizacji we Wrocławiu”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, vol. 6:13-19.
- [23] Lee J.H., Bang K.W., 2000, "Characterization of urban stormwater runoff", *Water Research*, vol. 34(6):1773-1780.
- [24] Morgan S., Alyaseri I., Retzlaff W., 2011, "Suspended solids in and turbidity of runoff from green roofs", *International Journal of Phytoremediation*, vol. 13:179-193.
- [25] Paithankar D.N., Taji S.G., 2020, "Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model", *Materials Today: Proceedings*, vol. 32:943-950.
- [26] Pereira B., David L.M., Galvão A., 2020, "Green Infrastructures in Stormwater Control and Treatment Strategies", *Proceedings*, vol. 48:7.
- [27] Rossman L.A., 2009, "Storm water management model user's manual version 5.0. national risk management research laboratory", Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- [28] Roy A.H., Wenger S.J., Fletcher T.D., Walsh C.J., Ladson A.R., Shuster W.D., et al., 2008, "Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States", *Environmental Management*, vol. 42:344-359.
- [29] Sakson G., Zawilski M., Badowska E., Brzezińska A., 2014, "Zanieczyszczenie ścieków opadowych jako podstawa wyboru sposobu ich zagospodarowania", *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, vol. 61(3/1/14):253-264.
- [30] Semadeni-Davies A., Hernebring C., Svensson G., Gustafsson L.G., 2008, "The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater", *Journal of Hydrology*, vol. 350:114-125.
- [31] Šijanec Zavrl M., Zeren T. M., 2010, "Sustainability of Urban Infrastructures", *Sustainability*, vol. 2:950-2964.
- [32] Soulis K., Ntoulas N., Nektarios P., Kargas G., 2017, "Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover", *Ecological Engineering*, vol. 102:80-89.
- [33] Stovin V., Vesuviano G., Kasmin H., 2012, "The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions", *Journal of Hydrology*, vol. 414-415:148-161.
- [34] Taebi A., Droste R.L., 2004, "Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater" *Science of The Total Environment*, vol. 327:175-184.
- [35] Timm A., Kluge B., Wessolek G., 2018, "Hydrological balance of paved surfaces in moist mid-latitude climate - A review", *Landscape and Urban Planning*, vol. 175:80-91.
- [36] Wang M., Zhang D., Lou S., Hou Q., Liu Y., Cheng Y., Qi J., Tan S.K., 2019, "Assessing Hydrological Effects of Bioretention Cells for Urban Stormwater Runoff in Response to Climatic Changes", *Water*, vol. 11:997.
- [37] Wang X., Tian Y., Zhao X., 2017, "The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality", *Science of The Total Environment*, vol. 592:465-476.
- [38] Widomski M.K., Musz-Pomorska A., Gajuk D., Łągód D., 2012, "Numerical modeling in quantitative and qualitative analysis of storm sewage system extension", *Ecological Chemistry and Engineering A*, vol. 19 (4-5):471-481.
- [39] Willems P., Arnbjerg-Nielsen K., Olsson J., Nguyen V.T.V., 2012, "Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings", *Atmospheric Research*, vol. 103:106-118.
- [40] Zhou Q., 2014, "A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts", *Water*, vol. 6:976-992.
- [41] Zhu H., Yu M., Zhu J., Lu H., Cao R., 2019, "Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff", *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 8:373-382.
- [42] Zhu H., Wen C., Wang Z., Li L., 2020, "Study on the Permeability of Recycled Aggregate Pervious Concrete with Fibers", *Materials*, vol. 13:321. ■