

## ANALIZA WPLYWU WIELKOŚCI USZCZELNIENIA TERENU NA HYDROGRAM ODPLYWU ZE ZLEWNI

Katarzyna Kołodziejczyk

Politechnika Krakowska

**Streszczenie.** Na podstawie 10-sekundowych danych opadowych z posterunku Zawila, danych dotyczących zagospodarowania terenu oraz danych z mapy glebowo-rolniczej zbadano wpływ wielkości uszczelnienia terenu na hydrogram odpływu bezpośredniego ze zlewni w przekroju ją zamykającym. Analizę wykonano dla zlewni Potoku Wróblowickiego znajdującej się na terenie Krakowa. Do obliczenia opadu efektywnego zastosowano metodę CN-SCS. Hydrogram odpływu bezpośredniego wyznaczono na podstawie chwilowego hydrogramu jednostkowego i hydrogramu jednostkowego dla parametrów modelu Nasha. Obliczenia przeprowadzono dla czterech wybranych epizodów opadowych, dla różnych stopni uszczelnienia zlewni obliczonych na podstawie danych o zagospodarowaniu terenu.

Wykazano, że dla tego samego opadu rzeczywistego reakcja zlewni w zależności od stopnia zurbanizowania różni się wysokością opadu efektywnego, czasem jego pojawienia się, czasem opóźnienia odpływu, objętością fali wezbraniowej oraz czasem osiągnięcia kulminacji. Im większe uszczelnienie terenu tym krótszy czas opóźnienia odpływu, większa objętość fali i krótszy czas osiągnięcia kulminacji.

**Słowa kluczowe:** zlewnia miejska, urbanizacja, metoda CN-SCS, opad efektywny, czas opóźnienia odpływu, model Nasha

### WSTĘP

Wzrost urbanizacji niesie za sobą zmiany w zagospodarowaniu terenu (zabudowa i uszczelnienie). Badania wskazują, że zwiększenie udziału pokrywy nieprzepuszczalnej skutkuje zmianą naturalnych stosunków wodnych, co z kolei powoduje wzrost zagrożenia powodziowego na terenach objętych rozwojem urbanizacji [np. Kanclerz i in. 2016]. Woda opadowa docierając do powierzchni gruntu, w zależności od rodzaju (przepuszczalności) gruntu, sposobu jego użytkowania (zagospodarowanie), a także warunków wilgotnościowych gruntu i wielu innych czynników, częściowo infiltruje, zasilając wody podziemne.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: mgr inż. Katarzyna Kołodziejczyk, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; e-mail: [katarzyna.kolodziejczyk@iigw.pk.edu.pl](mailto:katarzyna.kolodziejczyk@iigw.pk.edu.pl).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

Gdy wysokość opadu przekracza zdolności retencyjne zlewni, zaczyna tworzyć się spływ powierzchniowy.

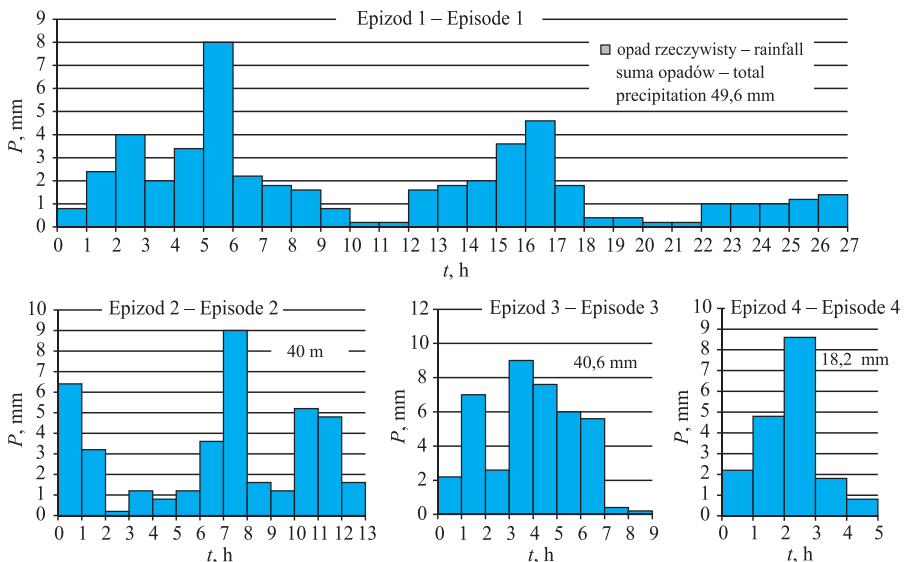
Badania nad wpływem urbanizacji na odpływ powierzchniowy prowadzono już w latach 60. [m.in. Espey i in. 1965, Sarma i in. 1969, Rao i in. 1972]. Pierwsze kompleksowe badania nad wpływem urbanizacji na czas opóźnienia zaprezentował Carter [1961]. Kolejne badania prowadzili m. in. Wiitala [1961] i Van Sickle [1962].

Celem pracy jest analiza wpływu wielkości uszczelnienia terenu na wybrane charakterystyki hydrogramu odpływu bezpośredniego ze zlewni: czas opóźnienia odpływu, wielkość kulminacji oraz, czas jej kulminacji.

## DANE

Dane przyjęte do analizy pochodziły z posterunku Zawila będącego własnością MPWiK SA, znajdującego się na terenie analizowanej zlewni Potoku Wróblowickiego (Kraków), obejmowały dane opadowe z okresu 05.04.–07.10.2014 r. mierzone co 10 sekund, zagregowane do wartości godzinowych; dane o zagospodarowaniu terenu miasta Krakowa w latach 2006, 2010 i 2014 r. pozyskane z Wydziału Geodezji Urzędu Miasta Krakowa, oraz informacje o rodzaju gleb pochodzące z mapy glebowo rolniczej w skali 1:5000, udostępnionej przez Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego (Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej) w Krakowie.

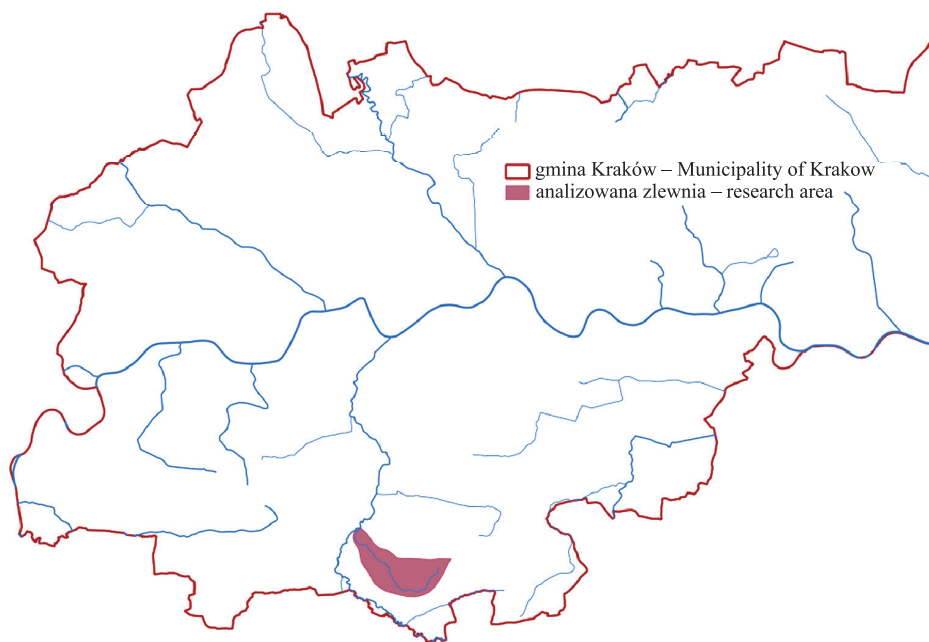
Dla celów pracy, z tego okresu wybrano cztery epizody opadowe (ryc. 1). Trzy z nich wybrano ze względu na najwyższe sumy opadów, natomiast epizod 4. został wybrany ze względu na wysoką sumę opadów z 5 dni poprzedzających. Obliczenia wykonano dla różnych stopni uszczelnienia terenu obliczonych na podstawie zagospodarowania terenu z lat 2006, 2010 i 2014.



Ryc. 1. Epizody opadowe wybrane do analizy

Fig. 1. Rainfall events selected for analysis

Do analizy wybrano zlewnię Potoku Wróblowickiego o powierzchni 2,49 km<sup>2</sup>, znajdującą się na terenie Krakowa, w dzielnicy Swoszowice (ryc. 2). Wybór ten podyktowany był dużą zmianą zagospodarowania jaka nastąpiła na tym obszarze w latach 2006–2014. Potok Wróblowicki jest prawobrzeżnym dopływem Wilgi, odbiornikiem ścieków z Uzdrowiska Swoszowice.

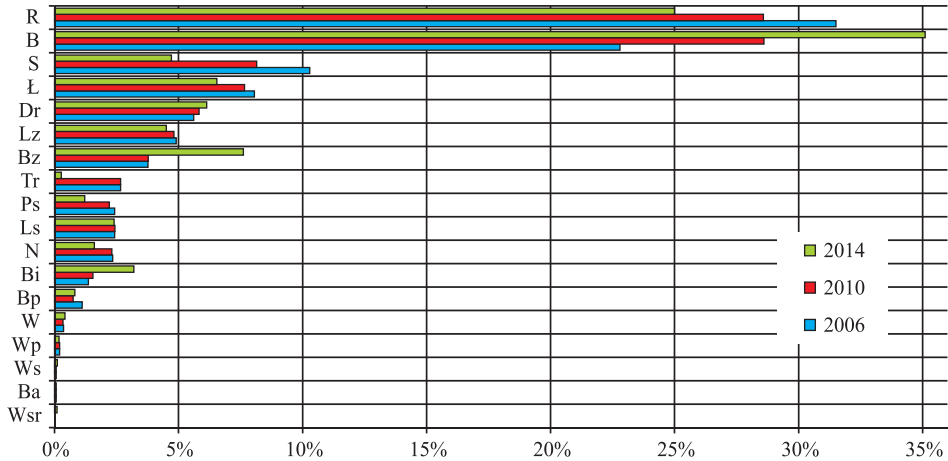


Ryc. 2. Lokalizacja zlewni Potoku Wróblowickiego

Fig. 2. Location of the Potok Wróblowicki catchment

Na przestrzeni lat 2006–2014 zagospodarowanie analizowanej zlewni uległo znacznej zmianie (ryc. 3). W 2006 r. przeważały grunty orne (31,5%). W 2010 r. ich udział zmalał do 28,58% na rzecz terenów mieszkaniowych, natomiast w 2014 r. zdecydowaną większość stanowiły tereny mieszkaniowe (35,1%) przy udziale obszarów ornych wynoszącym 25%. Taka zmiana pociągnęła za sobą wzrost współczynnika uszczelnienia z 32% w 2006 r. do 46% w roku 2014.

Czynnikami mającym istotny wpływ na charakterystyki hydrogramu odpływu są parametry fizjograficzne zlewni (tab. 1). Zlewnia Potoku Wróblowickiego jest zlewnią małą, o powierzchni  $A$  zaledwie 2,49 km<sup>2</sup>. Długość zlewni  $L$  wynosi 2,7 km, obwód  $P$  równy jest 7,49 km. Z pozostałych parametrów określających kształt zlewni na uwagę zasługują wskaźnik wydłużenia zlewni  $C_w$  wynoszący 0,42 oraz wskaźnik kolistości zlewni  $C_k$  wynoszący 0,56. Istotne informacje o rzeźbie analizowanej zlewni zawiera deniwelacja terenu wynosząca 93 m oraz średni spadek zlewni  $J$  (według formuły dla zlewni wydłużonych) równy 22,05%. Współczynnik uszczelnienia zlewni  $U$  w roku 2006 wynosił 32%, w roku 2010 – 37% natomiast w 2014 – 46%.



Ryc. 3. Zagospodarowanie zlewni Potoku Wróblowickiego w latach 2006, 2010 i 2014 (R – grunty orne, B – tereny mieszkaniowe, S – sady, Ł – łąki, Dr – drogi, Lz – grunty zadrzewione i zakrzewione, Bz – tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, Tr – tereny różne, Ps – pastwiska trwałe, Ls – lasy, N – nieużytki, Bi – inne tereny zabudowane, Bp – zurbanizowane tereny niezabudowane, W – grunty pod rowami, Wp – grunty pod wodami pow. płynącymi, Ws – grunty pod wodami pow. stojącymi, Ba – tereny przemysłowe, Wsr – grunty pod stawami)

Fig. 3. Land use in the Potok Wróblowicki catchment in the years 2006, 2010 and 2014 (R – arable land, B – residential areas, S – orchards, Ł – permanent meadows, Dr – roads, Lz – woody and bushy land, Bz – recreational and rest areas, Tr – miscellaneous land, Ps – permanent pastures, Ls – forests, N – wasteland, Bi – other built-up areas, Bp – urbanized non-built-up areas, W – under ditches areas, Wp – lands under surface waters (flowing), Ws – lands under surface waters (standing), Ba – industrial areas, Wsr – under ponds areas).

Tabela 1. Wybrane parametry fizjograficzne analizowanej zlewni

Table 1. Selected physiographic characteristics of the analyzed catchment

<i>A</i>	<i>L</i>	<i>P</i>	<i>C<sub>w</sub></i>	<i>C<sub>k</sub></i>	$\Delta H$	<i>J</i>	<i>U</i> %		
km <sup>2</sup>	km	km	–	–	m	%	2006	2010	2014
2,49	2,7	7,49	0,42	0,56	93	22,05	32	37	46

## METODY

Do obliczenia opadu efektywnego wybrano metodę CN-SCS [Mishra i Singh 2003] opracowaną w USA przez Służbę Ochrony Gleb (Soil Conservation Service). Jej adaptację dla warunków polskich przygotował m.in. Ignar [1993]. Metoda ta wiąże opad efektywny z rodzajem gleb, sposobem zagospodarowania terenu zlewni, charakterem pokrywy roślinnej, warunkami hydrologicznymi, a także uwilgotnieniem gleby przed wystąpieniem analizowanego epizodu opadowego [Ignar 1993, Banasik 2009]. Wszystkie te czynniki zawiera w sobie bezwymiarowy parametr *CN*, który przyjmuje

wartości z przedziału  $\langle 0; 100 \rangle$ .  $CN = 1$  oznacza powierzchnię doskonale przepuszczalną, dla której odpływ nie występuje; natomiast  $CN = 100$  określa powierzchnię całkowicie nieprzepuszczalną, dla której opad w całości przekształcany jest w opad efektywny [Mishra i Singh 2003, Okoński i Miler 2010]. Odpływ bezpośredni rozpoczyna się, gdy wysokość opadu przekroczy wysokość warstwy wody zatrzymanej przed rozpoczęciem wezbrania [Ignar 1993]. W przekroju zamykającym zlewnię opad efektywny powoduje zwiększenie natężenia przepływu, co przedstawione jest w formie hydrogramu odpływu [Kolerski 2014].

W celu określenia parametru  $CN$ , każdy rodzaj gleby występującej na analizowanym terenie przypisano do odpowiedniej grupy glebowej określonej w metodzie CN-SCS [Pociask-Karteczka 2006]:

- A – gleby o dużej przepuszczalności, na których prawie nie występuje spływ powierzchniowy,
- B – gleby o przepuszczalności powyżej średniej,
- C – gleby o przepuszczalności poniżej średniej,
- D – gleby o małej przepuszczalności, ułatwiające powstawanie spływu powierzchniowego.

Każdemu rodzajowi gleby oraz znajdującemu się na niej zagospodarowaniu przypisano odpowiedni parametr  $CN$  (w zależności od użytkowania powierzchni zlewni, grupy glebowej oraz warunków hydrologicznych) [Ozga-Zielińska i Brzeziński 1994]. Parametr ten dobrany został dla przeciętnych warunków wilgotnościowych (AMCII). Z uwagi na niską sumę opadów w okresie 5 dni poprzedzających analizowane epizody, w trzech przypadkach zaszła konieczność dokonania korekty parametru  $CN$  do I poziomu oznaczającego niskie uwilgotnienie zlewni. Dla epizodu 4, ze względu na intensywne wcześniejsze opady, poziom uwilgotnienia został podniesiony do poziomu III oznaczającego wysokie uwilgotnienie (tab. 2) [Ozga-Zielińska i Brzeziński 1994, Pociask-Karteczka 2006].

Zmienność obszarowa użytkowania powierzchni zlewni, rodzaju gleb, sposobu uprawy i warunków hydrologicznych uwzględniona została poprzez obliczenie parametru  $CN$  jako średniej ważonej.

$$CN = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^n A_i CN_i \quad (1)$$

Na podstawie wartości  $CN$  obliczono maksymalną potencjalną retencję zlewni  $R$  w mm:

$$R = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

a następnie straty początkowe ( $S_p$ ), rozumiane jako ta część opadu, która nie dostała się do koryta z powodu intercepcji, infiltracji itp. [Pociask-Karteczka 2006, Banasik 2009].

$$S_p = \mu R \quad (3)$$

gdzie:

$\mu$  – współczynnik empiryczny dobierany na podstawie wartości parametru  $CN$  [Pociask-Karteczka 2006].

Tabela 2. Korekta parametru *CN* ze względu na stan uwilgotnienia zlewni  
 Table 2. Revision of *CN* parameter due to watershed moisture conditions

	Epizod 1 Episode 1		Epizod 2 Episode 2		Epizod 3 Episode 3		Epizod 4 Episode 4	
	2006	2010	2014	2006	2010	2014	2006	2010
Epizod opadowy								
Poziom wilgotności gruntu – AMC level	II	II	II	II	II	II	II	II
Suma opadów z 5 dni poprzedzających, mm	18,4	18,4	18,4	17,2	17,2	0,6	0,6	0,6
5-day antecedent rainfall, mm				17,2	17,2	0,6	0,6	0,6
Skorygowany poziom wilgotności – okres wegetacyjny	I	I	I	I	I	I	I	I
Adjusted AMC level – growing seasons				I	I	I	I	I
Parametr <i>CN</i> , – <i>CN</i> parameter, –	77	78	79	77	78	79	77	78
Parametr <i>CN</i> skorygowany, – Adjusted <i>CN</i> parameter, –	59	60	62	59	60	62	59	60
				62	60	62	89,5	90
								90,5

Opad efektywny  $P_e(t)$  w rozumieniu metody CN-SCS jest częścią opadu całkowitego pozostającą po odjęciu strat początkowych  $S_p$  oraz retencji maksymalnej gruntu  $R$ . Dla analizowanych epizodów opadowych obliczono skumulowany opad efektywny  $P_e(t)$ , a następnie cząstkowy opad efektywny w danym kroku czasowym. Skumulowany opad efektywny obliczono z zależności:

$$P_e(t) = \begin{cases} 0 & \text{gd}y S_p \geq P(t) \\ \frac{(P(t) - S_p)^2}{P(t) - S_p + R} & \text{gd}y S_p < P(t) \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

$P(t)$  – skumulowany opad całkowity, mm,  
 $t$  – krok czasowy [Pociask-Karteczka 2006].

Hydrogram odpływu bezpośredniego obliczono na podstawie hietogramu opadu efektywnego oraz hydrogramu jednostkowego. Hydrogram jednostkowy jest funkcją transformującą opad efektywny w odpływ bezpośredni. Jest on wykresem przebiegu wezbrania stanowiącego reakcję zlewni na opad efektywny o wysokości równej jednostce i czasie trwania  $\Delta t$ . Dla opadu jednostkowego o czasie trwania  $\Delta t \rightarrow 0$  nazywany jest chwilowym hydrogramem jednostkowym [Banasik 2009].

Do wyznaczenia chwilowego hydrogramu jednostkowego zastosowano koncepcyjny model Nasha (1957), który przedstawia zlewnię jako kaskadę  $N$ -zbiorników liniowych, z których pierwszy zasilany jest opadem efektywnym, a kolejne odpływem ze zbiornika poprzedniego. Wpływ z ostatniego stanowi chwilowy hydrogram jednostkowy zlewni (IUH). Jest on tutaj dwuparametrową funkcją gęstości prawdopodobieństwa rozkładu gamma [Banasik 2009]:

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(N)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (5)$$

gdzie:

$u(t)$  – rzędne chwilowego hydrogramu jednostkowego,  $h^{-1}$ ,  
 $t$  – czas od początku opadu, h,  
 $k$  – parametr retencji zbiornika, h,  
 $N$  – liczba zbiorników  
 $\Gamma(N)$  – funkcja gamma Eulera, której wartość dla całkowitej liczby zbiorników wynosi  $\Gamma(N) = (N - 1)!$

Do obliczenia parametrów  $N$  i  $k$  modelu Nasha dla zlewni zurbanizowanych zastosowano metodę Rao i in. [1972]. Zakłada ona, że czas opóźnienia odpływu ( $LAG$ ) maleje wraz z wysokością warstwy odpływającej wody i rośnie w miarę wydłużania się czasu opadu efektywnego. Daje również możliwość wyznaczania czasu opóźnienia dla pojedynczych zdarzeń [Krajewski i Banasik 2013].

Wartość  $k$  wyznacza się z zależności:

$$k = 0,56 \cdot A^{0,39} \cdot (1 + U)^{-0,62} \cdot H^{-0,11} \cdot D^{0,22} \quad (6)$$

gdzie:

- $A$  – powierzchnia zlewni, km<sup>2</sup>,
- $U$  – udział powierzchni nieprzepuszczalnych w zlewni,
- $H$  – wysokość opadu efektywnego, mm,
- $D$  – czas trwania opadu efektywnego, h.

Liczbę zbiorników  $N$  obliczono z wzoru:

$$N = \frac{LAG}{k} \quad (7)$$

gdzie  $LAG$ , czas opóźnienia odpływu, jest równy [Banasik 2009]:

$$LAG = 1,28 \cdot A^{0,46} \cdot (1 + U)^{-1,66} \cdot H^{-0,27} \cdot D^{0,37} \quad (8)$$

Na podstawie rzędnych chwilowego hydrogramu jednostkowego wyznaczono rzędne  $h_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , w m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> · mm<sup>-1</sup>, hydrogramu jednostkowego wywołanego opadem efektywnym o wysokości 1 mm i czasie trwania  $\Delta t = 1$ :

$$h_i = \frac{A}{3,6} \cdot \bar{u}_i \quad (9)$$

gdzie:

- $A$  – powierzchnia zlewni, km<sup>2</sup>,
- $\bar{u}_i$  – rzędne uśrednionego w czasie  $(t-\Delta t, t)$  hydrogramu jednostkowego  $u(\tau)$ , h<sup>-1</sup>:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t-\Delta t}^t u(\tau) d\tau \quad \text{dla } t = \Delta t \cdot i; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$\Delta t$  – obliczeniowy krok czasowy.

Rzędne  $Q_i$  w m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> hydrogramu odpływu bezpośredniego obliczono z zależności:

$$Q_i = \sum_{j=1}^i h_{i-j+1} \cdot \Delta H_j, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

gdzie:

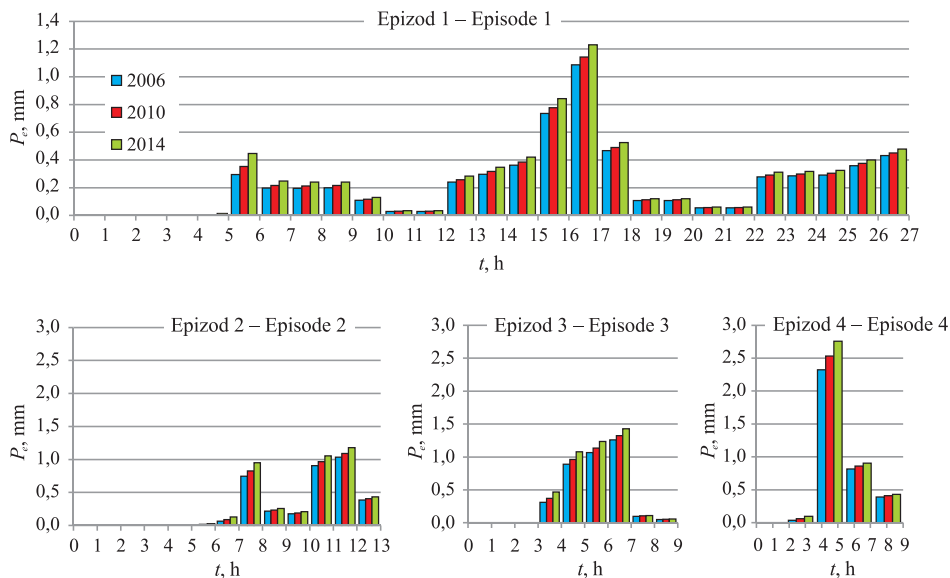
- $\Delta H_j$  – wysokość opadu efektywnego w  $j$ -tym przedziale czasowym, mm.

## WPLYW WZROSTU USZCZELNIENIA TERENU NA OPAD EFEKTYWNY

Ryc. 4 ilustruje zależność pomiędzy uszczelnieniem terenu a opadem efektywnym. Analizowany opad, spadając na obszar charakteryzujący się przewagą gruntów ornych (2006 r.) generuje mniejszy opad efektywny. Natomiast ten sam opad, docierając do zlewni znacznie bardziej uszczelnionej (2010 i 2014 r.), generuje większy opad efektywny, który na dodatek w niektórych przypadkach pojawia się wcześniej.

W przypadku epizodu 1 suma opadu efektywnego dla zagospodarowania z 2006 r. wynosiła 6,21 mm. Opad efektywny zaczął tworzyć się po 5 godzinach od rozpoczęcia epizodu i trwał 22 h. Dla zagospodarowania z roku 2010 nie zanotowano różnicy w czasie





Ryc. 4. Porównanie hietogramów opadu efektywnego dla analizowanej zlewni  
 Fig. 4. Comparison of effective rainfall hyetographs for the analyzed catchment

pojawienia się i czasie trwania opadu efektywnego, jednak nieznacznie wzrosła suma opadu efektywnego (6,6 mm). W przypadku zagospodarowania z 2014 r. opad efektywny pojawił się godzinę wcześniej, a jego suma wzrosła do 7,22 mm.

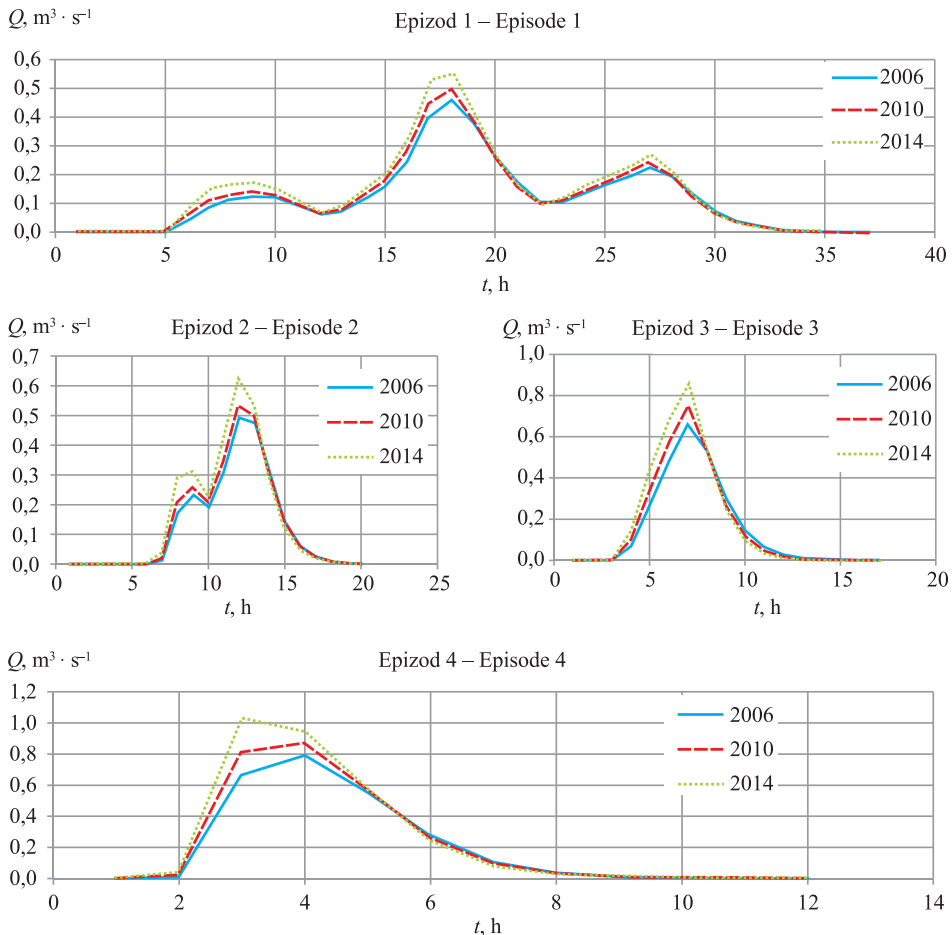
W przypadku epizodu 2, dla zagospodarowania z roku 2006 opad efektywny pojawił się w 7 godzinie od rozpoczęcia epizodu, jego suma wynosiła 3,52 mm, a czas trwania 7 h. Przy zagospodarowaniu z roku 2010 opad efektywny wystąpił godzinę wcześniej (w 6 godzinie), jego suma wzrosła do 3,79 mm, a czas trwania wydłużył się o godzinę. Dla zagospodarowania z roku 2014 opad efektywny wytworzył się również w 6 godzinie, jego suma wynosiła 4,21 mm, a czas trwania 8 h.

Podobna zależność występuje dla epizodu 3. W przypadku zagospodarowania z roku 2006 opad efektywny zaczął tworzyć się w 4 godzinie od rozpoczęcia epizodu, jego suma wynosiła 3,67 mm, a czas trwania 6 h. Dla zagospodarowania z roku 2010 opad efektywny zaczął pojawiać się również w 4 godzinie, jego suma wzrosła do 3,95 mm, a czas trwania pozostał bez zmian (6 h). Dla zagospodarowania z roku 2014 opad efektywny zaczął pojawiać się również w 4 godzinie, jego suma wynosiła 4,39 mm, a czas trwania 6 h.

W przypadku epizodu 4 sytuacja jest nieco odmienna gdyż wcześniejsze opady spowodowały zmianę warunków wilgotnościowych na wysokie. Ponieważ zlewnia była już wcześniej nasycona, dla zagospodarowania z roku 2006 opad efektywny pojawił się już po 1 godzinie od rozpoczęcia epizodu, jego suma wynosiła 3,56 mm, a czas trwania 4 h (czyli opad efektywny występował prawie przez cały czas trwania epizodu). Dla zagospodarowania z roku 2010 opad efektywny zaczął pojawiać się również po 1 godzinie od rozpoczęcia epizodu, jego suma wzrosła do 3,87 mm, a czas trwania równał się 4 h. Dla zagospodarowania z roku 2014 opad efektywny zaczął pojawiać się również po 1 godzinie od rozpoczęcia epizodu, jego suma wynosiła 4,19 mm, a czas trwania 4 h.

## WPLYW WIELKOŚCI USZCZELNIENIA TERENU NA CZAS OPÓŹNIENIA ODPŁYWU

Rycina 5 pokazuje, że zlewnia bardziej uszczelniona reaguje szybciej. Niskie wejściowe sumy opadów powodują, że w analizowanych przypadkach różnica jest niewielka, natomiast można zauważyć, że wraz ze wzrostem uszczelnienia rośnie suma opadu efektywnego, czas opóźnienia odpływu  $LAG$  definiowany jako odległość mierzona w skali czasu między środkiem ciężkości hietogramu opadu efektywnego a hydrogramu odpływu bezpośredniego [Sikorska i Banasik 2010], rozumiany zaś jako średni czas pozostawiania odpływu bezpośredniego w zlewni [Banasik 2009] skraca się, a objętość fali wzrasta. W przypadku epizodu 1 dla zagospodarowania z 2006 r.  $LAG$  wynosił 2,35 h. Po uwzględnieniu zagospodarowania z 2014 r. skrócił się o 40 min. Podobnie w przypadku epizodu 2, wzrost uszczelnienia terenu o 14% skutkuje skróceniem czasu opóźnienia



Ryc. 5. Porównanie hydrogramów odpływu bezpośredniego dla analizowanej zlewni  
Fig. 5. Comparison of direct runoff hydrographs for the analyzed catchment

odpływu o 28 minut. Analogicznie w przypadku epizodu 3 kulminacja przepływu dla większego stopnia uszczelnienia wystąpi o 32 minuty wcześniej niż w przypadku obszaru mniej uszczelnionego (2006 r.). Natomiast epizod 4 obrazuje skrócenie *LAG* o 28 minut.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie rzeczywistych danych opadowych z roku 2014 oraz danych o zagospodarowaniu terenu z lat 2006, 2010 i 2014, zbadano wpływ wielkości uszczelnienia terenu na charakterystyki hydrogramu odpływu bezpośredniego ze zlewni w przekroju ją zamykającym. Wykazano, że oprócz innych czynników takich jak uwilgotnienie zlewni w okresie poprzedzającym opad, rodzaj gruntu oraz forma jego uprawy, istotny wpływ na reakcję zlewni ma stopień jej uszczelnienia, którego wzrost wynika z postępującej urbanizacji. Wpływ ten przejawia się już na poziomie opadu efektywnego tworzącego spływ powierzchniowy, następnie przekłada się na hydrogram odpływu ze zlewni (ryc. 4, ryc. 5). Wykazano zależność pomiędzy uszczelnieniem terenu a wybranymi charakterystykami hydrogramu odpływu bezpośredniego ze zlewni. Im większe uszczelnienie terenu tym krótszy czas opóźnienia odpływu, większa objętość fali i krótszy czas osiągnięcia kulminacji.

\*

Praca została wykonana w ramach tematu Ś-1/200/2016/DS Współczesne metody projektowania i zarządzania w inżynierii i gospodarce wodnej, zadanie 2: Zastosowanie analizy DPSIR do oceny stanu i prognozy zmian koryta i dynamiki przepływu rzeki Wisły i jej dopływów na obszarze aglomeracji krakowskiej.

## PIŚMIENNICTWO

- Banasik, K. (2009). Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Carter, R. (1961). Magnitude and frequency of floods in suburban areas. U.S. Geological Survey, Professional Paper 424-B.
- Espey, W.H., Morgan, C.W., Masch, F.D. (1966). A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed. Report No. 23, Texas Water Development Board, Austin, Texas.
- Ignar, S. (1993). Metodyka obliczania przepływów wezbraniowych w zlewniach nieobserwowanych. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Kanclerz, J., Murat-Błażejewska, S., Dragon, K., Birk, S. (2016). Wpływ urbanizacji w strefie podmiejskiej na stosunki wodne w zlewniach małych cieków. Inżyn. Ekol., 46, 94–99.
- Krajewski, A., Banasik, K. (2013). Czas reakcji zlewni zurbanizowanej na opady wywołujące wezbrania, *Acta Sci. Pol., Architectura*, 12(4), 135–146.
- Kolerski, T. (2014). Praktyczne aspekty gospodarki wodnej w projektowaniu zbiorników retencyjnych. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk (wersja dostępna online).
- Mishra, K.S., Singh, P.V. (2003). Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Water Science and Technology Library, 42. Springer, Dordrecht.
- Nash, J.E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. [W:] *Surface Water, Precipitation, Evaporation*. International Association of Sciences and Hydrological Publications, 45. IAHS Press, Wallingford, UK, 114–121.

- Okoński, B., Miler, A.T. (2010). Adaptacja metody SCS-CN dla obliczania opadu efektywnego w zlewniach leśnych. Monogr. Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 68. Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej, t. 1. Red. B. Więzik. Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Warszawa, 143–152.
- Ozga-Zielińska, M., Brzeziński, J. (1997). Hydrologia stosowana. Wyd. 2 zmienione. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Pociask-Karteczka, J. (red.) (2006). Zlewnia – właściwości i procesy. Wyd. Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Rao, R.A., Delleur, J.W., Sarma, S.P. (1972). Conceptual hydrologic models for urbanizing basins. J. Hydraulics Division, ASCE (HY7), 1205–1220.
- Sarma, P.B.S., Delleur, J.W., Rao, A.R. (1969). A Program in Urban Hydrology. Cz. II. An Evaluation of Rainfall-Runoff Models for Small Urbanized Watersheds and the Effect of Urbanization on Runoff. Technical Report No. 9. Purdue Water Resources Center, Purdue University, Lafayette.
- Sikorska, A., Banasik, K. (2010). Parameter identification of a conceptual rainfall-runoff model for a small urban catchment. Ann. Warsaw University of Life Sciences. Land Reclamation, 42(2), 279–293.
- Van Sickle, D. (1962). The effects of urban development on storm runoff. The Texas Engineer, 32(12).
- Wiitala, S.W. (1961). Some aspects of the effect of urban and suburban development upon runoff. U.S. Geological Survey open-file report.  
<http://miip.geomalopolska.pl/imap/> data dostępu 10 lipca 2016

## AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE SIZE OF SURFACE SEAL ON THE RUNOFF HYDROGRAPH

**Abstract.** The influence of the size of surface seal on direct runoff hydrograph from the catchment observed at the catchment outlet was analysed. The analysis based on 10-seconds rainfall data obtained from the rain-gauging station Zawila, land use data and information from agricultural soil map. The study was conducted in the Wróblowicki Stream catchment, located in Cracow area. The CN-SCS procedure was used to calculate the effective rainfall. The direct runoff hydrograph was established on the basis of instantaneous unit hydrograph and unit hydrograph for Nash's model parameters. The calculations were performed for four selected rainfall events, for different sealing degree of the catchment, calculated on the basis of the land use data.

It was shown, that the response of the catchment to the same precipitation differs depending on the degree of urbanization. The differences include the amount of effective rainfall, time of its appearance, lag-time, volume of the flood wave and the time of occurrence of flood peak. The bigger sealing degree of the catchment, the shorter lag-time, larger volume of the flood wave and shorter time to peak.

**Key words:** urban catchment, urbanization, CN-SCS procedure, effective rainfall, lag-time, Nash's model

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2016*

Do cytowań – For citation: Kołodziejczyk, K. (2016). Analiza wpływu wielkości uszczelnienia terenu na hydrogram odpływu ze zlewni. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 15(4), 103–114.