

BERNADETTA BZYMEK, ELŻBIETA JAROSIŃSKA\*

## WPŁYW USZCZELNIENIA POWIERZCHNI ZLEWNI NA ODPŁYW WÓD DESZCZOWYCH

### THE EFFECT OF SURFACE SEAL CATCHMENT ON THE SIZE OF STORM WATER RUNOFF

#### Streszczenie

Tereny naturalne często zamieniane są na powierzchnie utwardzone czy uszczelnione. Stopień uszczelnienia powierzchni oraz infrastruktura komunikacyjna i hydrotechniczna w znacznym stopniu wpływają na zmianę relacji opad–odpływ na danym obszarze. Wszystkie te czynniki pociągają za sobą konsekwencje, których skutkiem często są liczne i gwałtowne powodzie. W artykule dokonano oceny wpływu rodzaju powierzchni na wielkość odpływu wód deszczowych z obszaru naturalnego i zurbanizowanego oraz wpływu uszczelnienia terenu na hydrogramy odpływu.

*Słowa kluczowe: odpływ wód deszczowych, zlewnia naturalna, zlewnia zurbanizowana, opad efektywny, bilans wodny*

#### Abstract

Natural areas are often converted into paved or sealed surfaces. The degree of surface sealing, public transport and hydrotechnical infrastructure significantly alter the rainfall-runoff relationship in the area. All these factors entail consequences which often result in numerous and severe floods. The paper assesses the impact of surface conditions on the size of storm water runoff from both natural and urban area and the impact of seals on land runoff hydrographs.

*Keywords: rainwater runoff, natural catchment, urbanized catchment, effective precipitation, water balance*

\* Mgr inż. Bernadetta Bzymek, dr inż. Elżbieta Jarosińska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

W naturalnym środowisku obserwujemy dynamiczną równowagę pomiędzy opadem atmosferycznym a procesami spływu, wsiąkania i transpiracji z określonej powierzchni terenu. Działalność człowieka powoduje zachwianie tej równowagi zwłaszcza przez zwiększanie powierzchni uszczelnionych. Skutkuje to zmniejszaniem się infiltracji wody w głąb gleby i zwiększaniem odpływu z danego terenu. Wzrost terenów uszczelnionych, nieprawidłowe odprowadzanie i gospodarowanie wodami opadowymi, niedrożna lub niedostosowana do spływu powierzchniowego kanalizacja odwodnieniowa, zaniedbania w zakresie eksploatacji i inwestycji urządzeń odwodnieniowych to czynniki, które w ostateczności są przyczyną wielu podtopień, powodujące znaczne straty na terenach zurbanizowanych. Uszczelnienie terenu skutkuje również wzrostem liczby powodzi o gwałtownym przebiegu fali powodzowej z wysokimi stanami wody w ciekach naturalnych.

## 2. Cel i metodyka badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu stopnia uszczelnienia terenu na odpływ powierzchniowy z dwóch zlewni znacząco różniących się stopniem zurbanizowania. Badania analityczne przeprowadzono dla zlewni stanowiącej część gminy Tymbark, oznaczona w dalszej części (ZT), o małym stopniu uszczelnienia powierzchni, oraz zlewni miejskiej, stanowiącej odrębną część miasta Krakowa (ZK), o dużym stopniu uszczelnienia powierzchni.

Dla obu zlewni obliczono metodą uproszczonego bilansu wodnego objętości opadu efektywnego [4], metodą formuły opadowej przepływu maksymalne o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 10\%$  i  $50\%$  [5] oraz metodą unifikacyjną wielkości objętości odpływu wód deszczowych [1]. Wyniki obliczeń posłużyły do dokonania porównania fal wezbraniowych.

## 3. Charakterystyka zlewni badawczych

Gmina Tymbark położona jest w województwie małopolskim, powiecie limanowskim, w kotlinie górskiej między Łopieniem (951 m n.p.m.), Zęzowem (705 m n.p.m.) i Górą Paproć (645 m n.p.m.), na wysokości 427m n.p.m. Jest gminą wiejską, położoną w zlewni górnej Wisły. W całości znajduje się w zlewni rzeki Łososiny, która jest lewostronnym dopływem Dunajca.

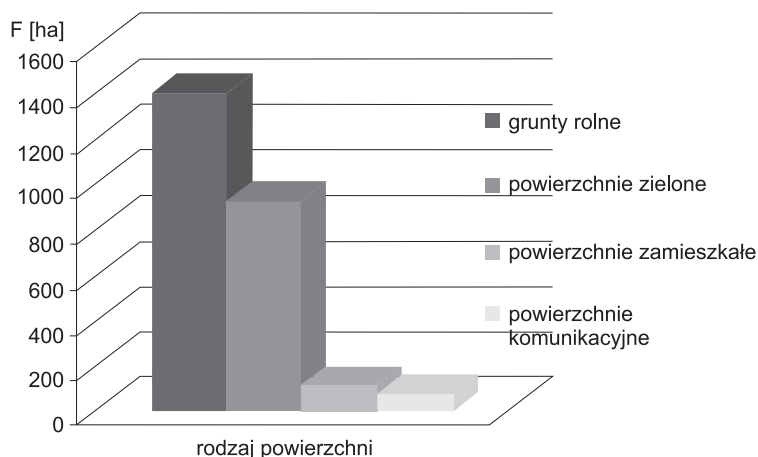
Struktura użytkowania zlewni ZT, stanowiącej część gminy Tymbark, została opracowana na podstawie mapy 1:10 000. W tabeli 1 i na rysunku 1 zestawione zostały wartości powierzchni o różnym sposobie zagospodarowania.

W większości obszar zlewni ZT pokrywają grunty rolne (1401 ha). Na drugim miejscu klasyfikują się powierzchnie zielone (930 ha), a resztę obszaru zajmują tereny zamieszkałe (112 ha) i komunikacyjne (77 ha).

Tabela 1

**Zagospodarowanie terenu w części gminy Tymbark (źródło: opracowanie własne)**

Sposób użytkowania obszaru części gminy Tymbark	Powierzchnia [ha]
grunty rolne $F_1$	<b>1401</b>
powierzchnie zielone $F_2$	<b>930</b>
Lasy $F_{21}$	610
parki, ogrody, sady, łąki $F_{22}$	319
powierzchnie zamieszkałe $F_3$	<b>112</b>
pojedyncze budynki $F_{31}$	56
zabudowa zwarta $F_{32}$	56
powierzchnie komunikacyjne $F_4$	<b>77</b>
drogi, bruki szczelne $F_{41}$	61
aleje spacerowe $F_{42}$	0
bruki zwykłe $F_{43}$	16
inne $F_5$	<b>70</b>
całkowita powierzchnia	<b>2590</b>



Rys. 1. Użytkowanie zlewni ZT stanowiącej część gminy Tymbark (źródło: opracowanie własne)

Fig. 1. Land use in the ZT catchment, part of the Tymbark Municipality (source: own)

Druga zlewnia badawcza stanowi część miasta Krakowa położonego u stóp północnego skraju Podgórze Karpackiego na wysokości 219 m n.p.m. Według informacji GUS [3] Kraków zajmuje powierzchnię 32 680 ha i należy do obszarów silnie uszczelnionych. Użytkowanie terenu na wybranym obszarze zostało opracowane na podstawie mapy 1:10 000 i przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 2.

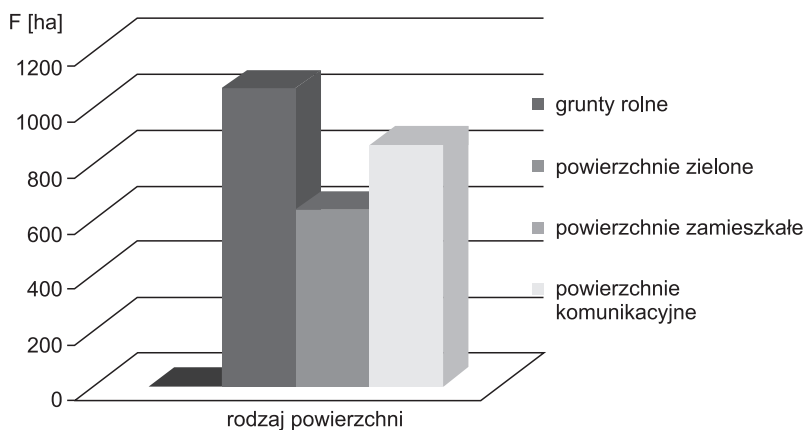
Największy obszar zajmują powierzchnie zielone (1067 ha), takie jak parki, ogrody, trawniki, dalej powierzchnie komunikacyjne (868 ha), a za nimi powierzchnie zamieszkałe (633 ha). Nie odnotowano na tym obszarze gruntów rolnych. Pomimo dużej ilości po-

wierzchni zielonych, większą część zlewni ZK stanowią powierzchnie przekształcone (1051 ha). Oddziałują one na wielkość odpływu. Docierający do nich opad nie ma możliwości wsiąknięcia w grunt, lecz jest odprowadzany do kanalizacji, a w czasie nawalnych opadów może prowadzić do podtopień.

Tabela 2

**Zagospodarowanie terenu na wybranym do analizy obszarze części miasta Krakowa**  
(źródło: opracowanie własne)

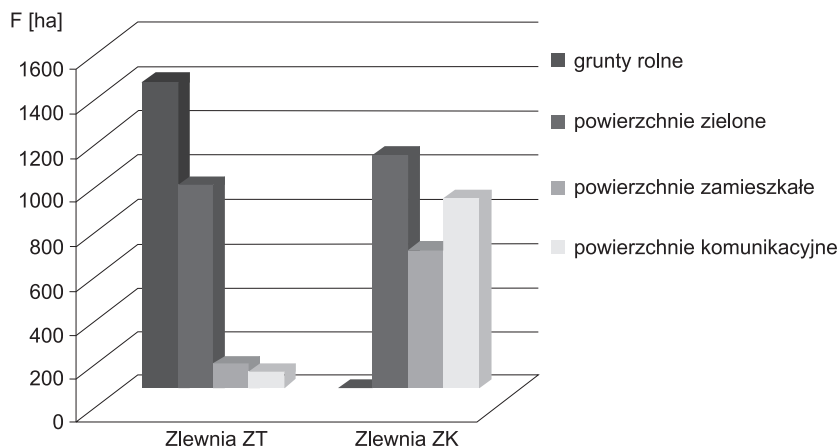
Sposób użytkowania obszaru części miasta Krakowa		Powierzchnia [ha]
grunty rolne $F_1$		<b>0</b>
powierzchnie zielone $F_2$		<b>1067</b>
	lasy $F_{21}$	32
	parki, ogrody, sady, łąki $F_{22}$	1035
powierzchnie zamieszkałe $F_3$		<b>633</b>
	pojedyncze budynki $F_{31}$	316
	zabudowa zwarta $F_{32}$	317
powierzchnie komunikacyjne $F_4$		<b>868</b>
	drogi, bruki szczelne $F_{41}$	352
	aleje spacerowe $F_{42}$	11
	bruki zwykłe $F_{43}$	504
inne $F_5$		<b>23</b>
całkowita powierzchnia		<b>2590</b>



Rys. 2. Struktura użytkowania powierzchni zlewni badawczej ZK (źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Land use in the ZK catchment (source: own)

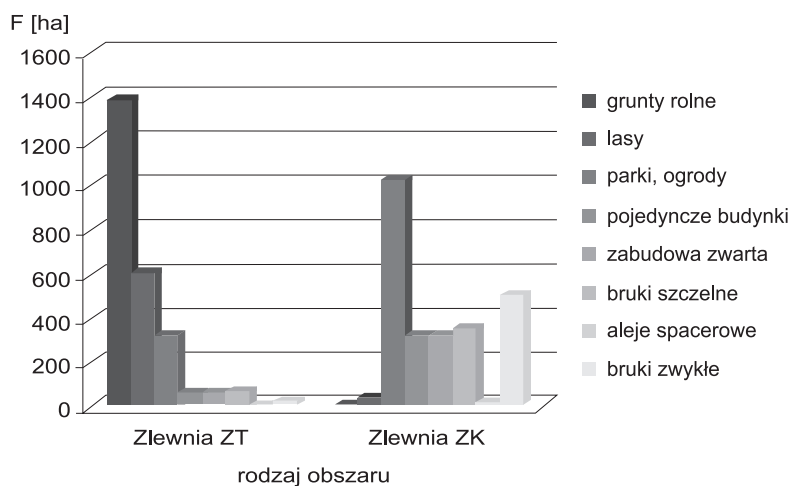
W zlewni ZT dominują grunty rolne (1401 ha), a w zlewni ZK tereny zielone (1067 ha), do których zaliczono m.in. lasy, parki, kłomby i trawniki. Ten rodzaj użytkowania powierzchni w zlewni ZT plasuje się na drugim miejscu i zajmuje 930 ha.



Rys. 3. Porównanie zagospodarowania zlewni ZT (gmina Tymbark) i zlewni ZK (gmina Kraków) (źródło: opracowanie własne)

Fig. 3. Comparison of land development in the ZT and ZK catchments (source: own)

Szczegółowe zestawienie użytkowania obu zlewni doświadczalnych przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Szczegółowe zestawienie zagospodarowania zlewni ZT i zlewni ZK (źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. Detailed statement of the ZT catchment and the ZK catchment (source: own)

Po gruntach rolnych w zlewni ZT dużą powierzchnię zajmują lasy – 610 ha, a w zlewni ZK ten rodzaj powierzchni zajmuje tylko 32 ha. Parki i ogrody zajmują w zlewni ZT powierzchnię rzędu 319 ha, a w zlewni ZK 1035 ha. Powierzchnie zajęte pod budynki w zlewni miejskiej ZK są ponad 5 razy większe niż w zlewni wiejskiej ZT. Bruki zwykłe w wybranej

części Krakowa (504 ha) zajmują powierzchnię ponad 31 razy większą niż bruki zwykle w analizowanej części gminy Tymbark (16 ha). Bruki szczelne, głównie w zlewni ZT, pokrywają 61 ha powierzchni, a w zlewni ZK 504 ha.

Z wykresów zamieszczonych na rysunkach 3 i 4 wynika, że na obszarze zlewni ZK przeważają powierzchnie przeobrażone, natomiast w zlewni ZT przeważają powierzchnie przeznaczone pod uprawy.

#### 4. Opad efektywny

Wysokość opadu efektywnego obliczona została na podstawie uproszczonego bilansu wodnego. Opad ten, nazywany również opadem skutecznym, powoduje spływ powierzchniowy w zlewni, a tym samym przyczynia się do wzrostu stanu wody w rzekach, który często prowadzi do wystąpienia zjawiska powodzi. Otrzymuje się go w wyniku pomniejszenia opadu całkowitego o straty z parowania oraz wsiąkania. Jego wielkość jest uzależniona między innymi od czasu trwania deszczu, wysokości opadu całkowitego, zagospodarowania obszarów oraz warunków hydrologicznych. Ogólnie równanie bilansu wodnego [6] ma postać:

$$Z + P = H + S + R \quad (1)$$

gdzie:

- $Z$  – retencja początkowa, tj. zapas wody zmagazynowanej na obszarze zlewni na początku okresu bilansowania [mm],
- $P$  – opad atmosferyczny [mm],
- $H$  – odpływ ze zlewni [mm],
- $S$  – straty (zwłaszcza na parowanie) [mm],
- $R$  – retencja końcowa, tj. różnica ilości wody w zlewni na początku i końcu okresu bilansowania [mm].

Po przekształceniu równania (1) otrzymamy:

$$P = H + S \pm \Delta R \quad (2)$$

Wielkość  $\Delta R$  może przyjmować wartość ujemną lub dodatnią. Założono, iż retencja początkowa  $Z$  równa jest retencji końcowej  $R$ . W tym przypadku wartość  $\Delta R$  równa jest zero i otrzymuje się uproszczony bilans wodny (3)

$$P = H + S \quad (3)$$

W wyniku podzielenia równania (3) przez opad ( $P$ ) uzyskamy:

$$\frac{H}{P} + \frac{S}{P} = 1 \quad (4)$$

A wprowadzając oznaczenia  $S/P = \beta$  i  $H/P = \alpha$  otrzymamy zależność współczynnika odpływu  $\alpha$  od parametru  $\beta$  – współczynnika strat (5):

$$\alpha = 1 - \beta \quad (5)$$

Stąd wysokość strat  $S$  wynosi:

$$S = \beta \cdot P \quad (6)$$

W wyniku pomniejszenia wielkości opadu całkowitego  $P$  o straty  $S$  oraz przyjmując założenie równości odpływu  $H$  z opadem efektywnym  $P_e$  [1], otrzymamy wysokość opadu efektywnego:

$$P_e = P - S \quad (7)$$

Przez wymnożenie wysokości opadu efektywnego  $P_e$  przez poszczególne powierzchnie  $F$  analizowanych obszarów uzyskano objętość opadu efektywnego  $V_e = V$  w  $m^3$ :

$$V = P_e \cdot F \quad (8)$$

Na podstawie powyższego bilansu wodnego obliczono opad efektywny, jaki wystąpił na obu obszarach w zależności od ich spadku. Uproszczone średni spadek  $R$  w % obu obszarów obliczono według wzoru (9):

$$R = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}} \cdot 100 \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta H$  – deniwelacja terenu tj.  $H_{\max} - H_{\min}$  [m],

$H_{\max}$  – wysokość geograficzna najwyższej położonego punktu w zlewni [m n.p.m.],

$H_{\min}$  – wysokość geograficzna najniższej położonego punktu w zlewni [m n.p.m.],

$A$  – powierzchnia obszaru [ $km^2$ ].

Ustalono, że dla zlewni ZT spadek  $R$  terenu wynosi 8,2%, a dla zlewni ZK 1%.

Wysokości opadu  $P$  dla zadanych wartości prawdopodobieństwa przewyższenia i czasu trwania opadu zostały odczytane z atlasu hydrologicznego i zestawione w tabeli 3.

Tabela 3

**Zestawienie wysokości prawdopodobnego opadu atmosferycznego  $P_p$  [%]  
dla analizowanych obszarów**

Wybrane obszary		Zlewnia ZT	Zlewnia ZK
Prawdopodobieństwo przewyższenia deszczu	czas	wysokość opadu	
$P_p$ [%]	$t$ [h]	$P$ [mm]	
10%	1	35	40
	24	80	70
50%	1	15	20
	24	50	35

Współczynnik strat na parowanie  $\beta$  wyznaczono na podstawie wzoru (5) i równy jest wartości jedności pomniejszonej o współczynnik spływu  $\psi$ ,  $\alpha = \psi$ , ( $\beta = 1 - \psi$ ), który dobrany został z tabeli 4 na podstawie spadku i rodzaju powierzchni.

Dla zlewni ZT współczynnik spływu został określony na podstawie interpolacji. Wartość współczynnika strat  $\beta$  dla tego obszaru przedstawia tabela 5. W tabeli 6 przedstawiono współczynniki strat dla zlewni miejskiej ZK.

Tabela 4

**Wartości współczynnika spływu  $\psi$  zależne od rodzaju i spadku powierzchni [2]**

Rodzaj powierzchni	Spadek powierzchni [%]					
	0,5	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0
	Współczynnik spływu $\psi$					
Dach	0,85	0,90	0,96	0,98	0,99	1,00
Bruki szczelne	0,70	0,72	0,75	0,80	0,85	0,90
Bruki zwykłe	0,50	0,52	0,55	0,60	0,65	0,70
Aleje spacerowe	0,20	0,22	0,25	0,30	0,35	0,40
Parki i ogrody	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30
Grunty rolne	0,05	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25
Lasy	0,01	0,02	0,04	0,06	0,10	0,15
Zabudowa zwarta	0,80	0,82	0,85	0,90	0,95	1,00
Zabudowa luźna	0,60	0,62	0,65	0,70	0,75	0,80
Zabudowa willowa	0,40	0,42	0,45	0,50	0,55	0,60

Tabela 5

**Współczynnik strat  $\beta$  dla zlewni ZT określony na podstawie współczynnika spływu  $\psi$  dla spadku 8,2% (źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 4)**

Rodzaj powierzchni F	Współczynnik strat $\beta$
Grunty rolne	0,78
Powierzchnie zielone	
Lasy	0,88
Parki, ogrody, sady, łąki	0,73
Powierzchnie zamieszkałe	
Pojedyncze budynki	0,01
Zabudowa zwarta	0,03
Powierzchnie komunikacyjne	
Drogi, bruki szczelne	0,13
Bruki zwykłe	0,33
Aleje spacerowe	0,63



Tabela 6

**Współczynnik strat  $\beta$  dla części miasta Krakowa (zlewnia ZK) określony na podstawie współczynnika spływu  $\psi$  dla spadku 1% (źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 4)**

Rodzaj powierzchni $F$	Współczynnik strat $\beta$
Grunty rolne	0,92
Powierzchnie zielone	
Lasy	0,98
Parki, ogrody, sady, łąki	0,88
Powierzchnie zamieszkałe	
Pojedyncze budynki	0,10
Zabudowa zwarta	0,18
Powierzchnie komunikacyjne	
Drogi, bruki szczelne	0,28
Bruki zwykłe	0,48
Aleje spacerowe	0,78

Dane zawarte w tabelach 5 i 6 posłużyły do wyliczenia strat opadu  $S$  i objętości opadu efektywnego  $V$  dla wydzielonych powierzchni analizowanych obszarów. Uzyskane wyniki zestawiono w tabelach 7 i 8.

Tabela 7

**Zestawienie ustalonych wielkości strat opadu  $S$  w bilansie wodnym (źródło: opracowanie własne)**

Rodzaj powierzchni	Uzyskane wielkości strat $S$ [mm]							
	czas trwania opadu 1 [h]				czas trwania opadu 24 [h]			
	WARIANT T		WARIANT K		WARIANT T		WARIANT K	
	$p = 50\%$	$p = 10\%$	$p = 50\%$	$p = 10\%$	$p = 50\%$	$p = 10\%$	$p = 50\%$	$p = 10\%$
zabudowa zwarta	0,15	0,35	2,00	4,00	0,50	0,80	3,50	7,00
bruki zwykłe	0,45	1,05	3,60	7,20	1,50	2,40	6,30	12,60
bruki szczelne	4,95	11,55	9,60	19,20	16,50	26,40	16,80	33,60
aleje spacerowe	1,95	4,55	5,60	11,20	6,50	10,40	9,80	19,60
aleje spacerowe	9,45	22,05	15,60	31,20	31,50	50,40	27,30	54,60
parki i ogrody	10,95	25,55	17,60	35,20	36,50	58,40	30,80	61,60
lasy	13,20	30,80	19,60	39,20	44,00	70,40	34,30	68,60
grunty rolne	11,70	27,30	18,40	36,80	39,00	62,40	32,20	64,40
całkowita suma	52,80	123,20	92,00	184,00	176,00	281,60	161,00	322,00

Zestawienie ustalonych objętości opadu efektywnego  $V$  (źródło: opracowanie własne)

Rodzaj powierzchni	Uzyskane wielkości objętości opadu efektywnego $V$ [m <sup>3</sup> ]							
	czas trwania opadu 1 [h]				czas trwania opadu 24 [h]			
	WARIANT T		WARIANT K		WARIANT T		WARIANT K	
	$p = 50\%$	$p = 10\%$	$p = 50\%$	$p = 10\%$	$p = 50\%$	$p = 10\%$	$p = 50\%$	$p = 10\%$
pojedynczy budynek	8 335	19 449	56 896	113 793	27 785	44 456	99 569	199 137
zabudowa zwarta	8 185	19 098	51 986	103 972	27 282	43 652	90 975	181 950
bruki zwykłe	1 634	3 813	52 449	104 897	5 446	8 714	91 785	183 570
bruki szczelne	7 899	18 432	50 696	101 391	26 331	42 130	88 717	177 435
aleje spacerowe	0	0	495	991	0	0	867	1 734
parki i ogrody	12 938	30 189	24 836	49 671	43 126	69 002	43 462	86 925
lasy	10 988	25 638	129	257	36 625	58 600	225	451
grunty rolne	46 249	107 913	0	0	154 162	246 659	0	0
całkowita suma	96 228	224 531	237 486	474 972	320 759	513 214	415 601	831 201

Z tabeli 7 wynika, iż powierzchnie zmodyfikowane, nieprzepuszczalne powodują niewielkie straty opadu  $S$ , w odróżnieniu od naturalnych powierzchni przepuszczalnych, które powodują znaczne zwiększenie strat.

Na wielkość objętości opadu efektywnego składa się wiele czynników. Zalicza się do nich m.in. czas trwania opadu, wielkość, jak i rodzaj powierzchni, na jaki spada deszcz, współczynnik spływu powierzchniowego, spadek terenu. W przypadku powierzchni nieprzepuszczalnych odnotowuje się istotne zwiększenie wartości współczynnika spływu powierzchniowego, co wpływa na zmniejszenie strat opadu.

W przypadku opadu trwającego przez  $t = 1$  h, przy prawdopodobieństwie przewyższenia deszczu  $p = 50\%$  i  $p = 10\%$ , wielkość objętości odpływu na obszarze zlewni ZT jest ponad dwa razy mniejsza niż w wybranej części miasta Krakowa (zlewnia ZK). Gdy czas trwania opadu się wydłuża i wynosi  $t = 24$  h, wielkości objętości opadu efektywnego dla zlewni ZK jest 1,6 razy większa niż dla zlewni ZT przy  $p = 10\%$  oraz 1,3 razy większa przy  $p = 50\%$ .

Z uzyskanych danych można wyciągnąć wniosek, że spadek zlewni w mniejszym stopniu wpływa na objętość odpływu wód deszczowych niż rodzaj i stopień uszczelnienia powierzchni, na który spada opad. Powierzchnie przepuszczalne wpływają na zmniejszenie odpływu, a zmodyfikowane powodują jego zwiększenie.

## 5. Obliczenie maksymalnych przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia $Q_{\max, p\%}$

W celu określenia hydrogramów fal wezbraniowych, jakie mogłyby wystąpić w analizowanych zlewniach ZT i ZK przy obliczonych wartościach opadu efektywnego, „poprowadzono” sztuczne cieki wodne wraz z dopływami, biegnące zgodnie z ukształtowaniem terenu. Na obszarze zlewni ZT sztuczny ciek ma długość 6,96 km, a na obszarze zlewni ZK osiąga długość 5,45 km. Stosując formułę opadową, obliczono wartość  $Q_{\max, p\%}$ , będącą wartością przepływu kulminacyjnego. Przepływ kulminacyjny  $Q_{\max, p\%}$  oraz objętość fali  $V$  są parametrami opisującymi utworzone fale wezbraniowe.

Do obliczenia maksymalnych przepływów  $Q_p$  w  $m^3/s$ , o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia  $p$ , zastosowano formułę opadową wg Stachy i Fal [6], która ma postać:

$$Q_p = f \cdot F_1 \cdot \varphi \cdot H_1 \cdot A \cdot \lambda_p \cdot \delta_j \quad (10)$$

gdzie:

- $f$  – bezwymiarowy współczynnik kształtu fali, równy 0,45 na pojezierzach i 0,60 na pozostałych obszarach kraju,
- $F_1$  – maksymalny moduł odpływu jednostkowego określony (interpolacja) z tablicy w zależności od hydromorfologicznej charakterystyki koryta rzeki  $\Phi_r$  i czasu spływu po stokach  $t_s$ , wartość bezwymiarowa,
- $\varphi$  – bezwymiarowy współczynnik odpływu przyjmowany w zależności od utworów glebowych według Czarneckiej,
- $H_1$  – maksymalny opad dobowy o prawdopodobieństwie przewyższenia 1%, odczytany z mapy [mm],
- $A$  – powierzchnia zlewni [ $km^2$ ],
- $\lambda_p$  – kwantyl rozkładu zmiennej  $\lambda_p$  dla zadanego prawdopodobieństwa, odczytany w zależności od regionu z tablicy znajdującej się w pracy [6],
- $\delta_j$  – współczynnik redukcji jeziornej w zależności od wskaźnika jeziorności, odczytany z tablicy zamieszczonej w pracy [6].

Hydromorfologiczną charakterystykę koryta cieków określa bezwymiarowy współczynnik  $\Phi_r$  obliczony wzorem (11):

$$\Phi_r = \frac{1000 \cdot (L + l)}{m \cdot I_{rl}^{1/3} A^{1/4} (\varphi \cdot H_1)^{1/4}} \quad (11)$$

gdzie:

- $L + l$  – długość cieku wraz z suchą doliną do działu wodnego [km],
- $m$  – miara szorstkości koryta cieku odczytana z tablicy zamieszczonej w pracy [6],
- $I_{rl}$  – uśredniony spadek cieku w % obliczany wzorem (12):

$$I_{rl} = 0,6 \cdot I_r \quad (12)$$

gdzie:

- $I_r$  – spadek cieku w %, określony za pomocą formuły (13):

$$I_r = \frac{W_g - W_d}{L + l} \quad (13)$$

gdzie:

$W_g$  – wysokość geograficzna działu wodnego w punkcie przecięcia z osią suchej doliny [m n.p.m.],

$W_d$  – wysokość geograficzna przekroju obliczeniowego [m n.p.m.].

Czas w minutach spływu po stokach  $t_s$ , określony na podstawie tablicy zamieszczonej w [6], w zależności od hydromorfologicznego współczynnika charakterystyki stoków:

$$\Phi_s = \frac{(1000 \cdot \bar{l}_s)^{1/2}}{m_s \cdot I_s^{1/4} (\varphi \cdot H_1)^{1/2}} \quad (14)$$

gdzie:

$\bar{l}_s$  – średnia długość stoków w km, obliczona ze wzoru:

$$\bar{l}_s = \frac{1}{1,8 \cdot \rho} \quad (15)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość sieci rzecznej w  $\text{km}^{-1}$ , określona formułą:

$$\rho = \frac{\sum (L+l)}{A} \quad (16)$$

$m_s$  – miara szorstkości stoków,

$I_s$  – średni spadek stoków w ‰, obliczony zależnością:

$$I_s = \frac{\Delta h \cdot \sum k}{A} \quad (17)$$

gdzie:

$\Delta h$  – różnica wysokości dwóch sąsiednich warstw [m],

$\sum k$  – suma długości warstw w zlewni [km],

$A$  – powierzchnia zlewni [ $\text{km}^2$ ].

Wskaźnik jeziorności zlewni wylicza się z zależności:

$$JEZ = \frac{A_{j1} + A_{j2} + \dots + A_{jk}}{A} = \frac{\sum_l^k A_{ji}}{A} \quad (18)$$

gdzie  $A_{ji}$  to powierzchnia zlewni jeziora w  $\text{km}^2$ , którego powierzchnia  $A_x$  stanowi co najmniej 1% powierzchni jego zlewni ( $A_x \geq 0,01A_{ji}$ ) [ $\text{km}^2$ ].

Na obszarze obu zlewni przyjęto współczynnik jeziorności JEZ równy 1.

Wykorzystując wzory od (10) do (18), obliczono przepływy w kulminacji  $Q_{\max,50\%}$  i  $Q_{\max,10\%}$  hydrogramów odpływu dla hipotetycznych cieków w zlewniach ZT i ZK.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 9.

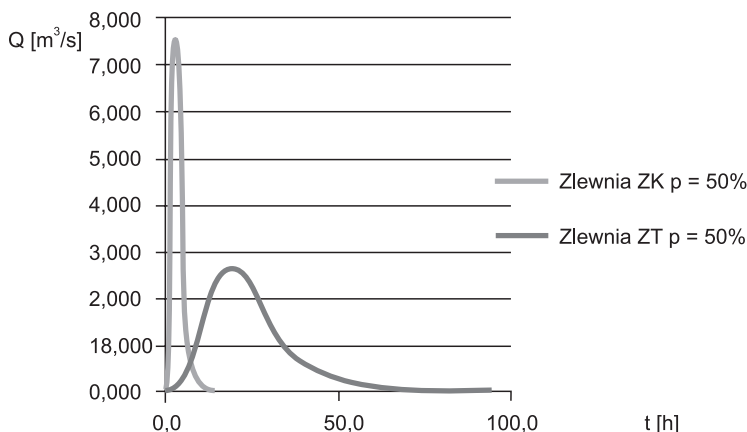
Tabela 9

Wyniki obliczeń przepływów w kulminacji  $Q_{\max,50\%}$  i  $Q_{\max,10\%}$  dla zlewni modelowych  
(źródło: opracowanie własne)

Zlewnia ZT			Zlewnia ZT		
Rodzaj parametru		dane parametru	Rodzaj parametru		dane parametru
oznaczenie	jednostka		oznaczenie	jednostka	
$L + l$	[km]	7,22	$L + l$	[km]	5,68
$m$		7,00	$m$		7,00
$W_g$	[m n.p.m]	427,50	$W_g$	[m n.p.m]	217,50
$W_d$	[m n.p.m]	367,50	$W_d$	[m n.p.m]	200,00
$I_{rl}$	[m/km]	4,99	$I_{rl}$	[m/km]	1,85
$A$	[km <sup>2</sup> ]	25,90	$A$	[km <sup>2</sup> ]	25,90
$\varphi$		0,88	$\varphi$		0,57
$H_1$	[mm]	120,00	$H_1$	[mm]	100,00
$\lambda_{50\%}$		0,1450	$\lambda_{50\%}$		0,13
$\lambda_{10\%}$		0,482	$\lambda_{10\%}$		0,464
$F_1$		0,0320	$F_1$		0,0233
$\delta_j$		1,0000	$\delta_j$		1,0000
$\Phi_r$		83,50	$\Phi_r$		106,73
$\Sigma(L + l)$	[km]	9,15	$\Sigma(L + l)$	[km]	9,32
$\rho$	[km <sup>-1</sup> ]	0,35	$\rho$	[km <sup>-1</sup> ]	0,36
$L_s$	[km]	1,57	$L_s$	[km]	1,54
$m_s$		0,15	$m_s$		0,30
$\Delta h$	[m]	2,50	$\Delta h$	[m]	1,25
$\Sigma k$		13578,98	$\Sigma k$		290,54
$I_s$	[m · km <sup>-1</sup> ]	1310,71	$I_s$	[m · km <sup>-1</sup> ]	14,02
$\Phi_s$		4,28	$\Phi_s$		8,96
$t_s$	[min]	20,00	$t_s$	[min]	30,00
$Q_{\max,50\%}$	[m <sup>3</sup> /s]	<b>7,60</b>	$Q_{\max,50\%}$	[m <sup>3</sup> /s]	<b>2,64</b>
$Q_{\max,10\%}$	[m <sup>3</sup> /s]	<b>25,28</b>	$Q_{\max,10\%}$	[m <sup>3</sup> /s]	<b>9,57</b>

Do utworzenia hydrogramów odpływu fal wezbraniowych (rys. 5-8), jakie mogłyby wystąpić na wybranych obszarach w zlewniach modelowych, wykorzystano metodę unifikacyjną [1]. Hydrogramy odpływu powstały na podstawie znajomości objętości opadu efektywnego oraz wartości prawdopodobnych przepływów maksymalnych  $Q_{\max,p\%}$  w m<sup>3</sup>/s, będącymi kulminacjami tych wezbrań. Objętość opadu efektywnego na hydrogramie przedstawiona została przez pole zawarte pod wykresem, a więc pole, jakie zostaje utworzone przez kształt

wykresu i oś OX. Na podstawie hydrogramów fal wezbraniowych można odczytać czas koncentracji wezbrania, czyli czas potrzebny na to, aby woda opadowa dopłynęła do koryta cieków z najbardziej oddalonych powierzchni.



Rys. 5. Porównanie hydrogramów odpływu dla zlewni ZT i ZK przy opadzie o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 50\%$  i czasie trwania  $t = 1$  h (źródło: opracowanie własne)

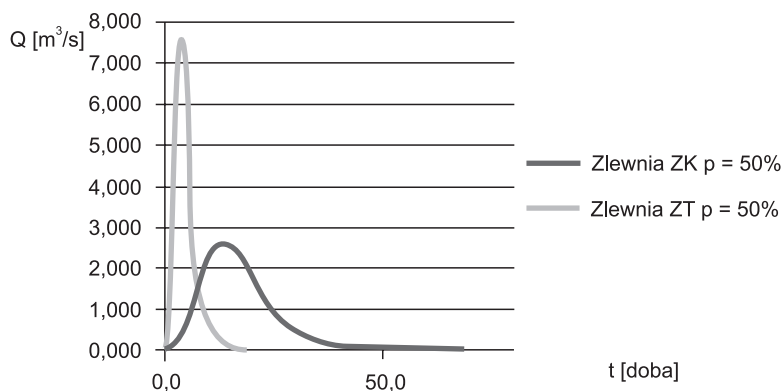
Fig. 5. Comparison of flow hydrographs for the ZT and ZK catchments at exceedance probability of precipitation  $p = 50\%$  and duration of rainfall  $t = 1$  h (source: own)

W przypadku czasu trwania opadu  $t = 1$  h i przy prawdopodobieństwie przewyższenia deszczu  $p = 50\%$  całkowita objętość fali dla zlewni ZT wynosi  $V = 96\,228\text{ m}^3$ , a dla zlewni ZK  $V = 237\,486\text{ m}^3$ . Dla obszaru gminy Tymbark przepływ  $Q_{\max, 50\%} = 7,60\text{ m}^3/\text{s}$ , a dla wybranej części miasta Krakowa  $Q_{\max, 50\%} = 2,64\text{ m}^3/\text{s}$  (rys. 5). Całkowity czas trwania wezbrania dla zlewni ZT wynosi 13 godzin, a dla zlewni ZK 93,5 godziny. Czas wznoszenia fali do osiągnięcia przepływu kulminacyjnego wynosi dla zlewni ZT 2,6 godziny, a czas opadania fali wynosi 10,5 godziny. Dla zlewni ZK czas wznoszenia fali jest dłuższy i wynosi 18,7 godziny, a czas opadania fali równy jest około 75 godzin.

W przypadku czasu trwania opadu  $t = 24$  h i przy prawdopodobieństwie przewyższenia deszczu  $p = 50\%$  całkowita objętość fali dla zlewni ZK wynosi  $V = 320\,759\text{ m}^3$ , a dla zlewni ZT  $V = 415\,601\text{ m}^3$ . Całkowity czas trwania wezbrania dla obszaru zlewni ZT wyniosłby 1,8 doby i dla zlewni ZK 6,8 dób (rys. 6). Przepływ maksymalny osiągnąłby swoją wartość dla zlewni ZT po czasie 0,4 doby, a dla zlewni ZK po prawie 1,5 doby. Czas opadania fali równy byłby w zlewni ZT również 1,5 doby, na obszarze zlewni ZK wyniosłby ponad 5 dób.

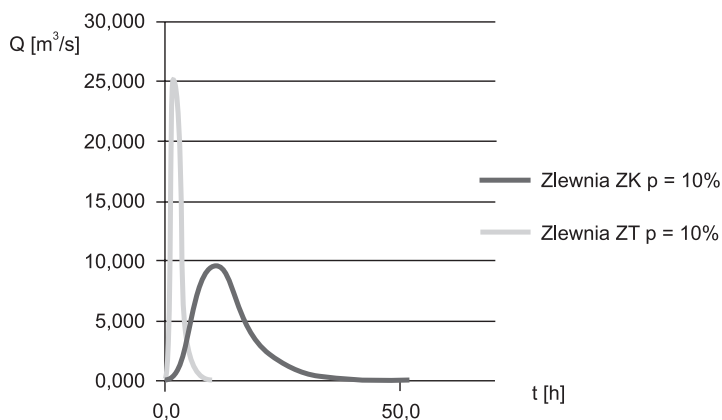
W przypadku czasu trwania opadu  $t = 1$  h i przy prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 10\%$  całkowity czas trwania wezbrania dla zlewni ZT wyniosłby ponad 9 godzin, a dla zlewni ZK równy byłby 51,6 godzin (rys. 7). Całkowita objętość fali wynosi dla zlewni ZT  $V = 224\,531\text{ m}^3$ , a dla zlewni ZK  $V = 474\,972\text{ m}^3$ . Maksymalny przepływ dla zlewni ZT równy jest  $Q_{\max, 50\%} = 25,28\text{ m}^3/\text{s}$ , a dla zlewni ZK  $Q_{\max, 50\%} = 9,57\text{ m}^3/\text{s}$ . Przepływ kulminacyjny zostałby osiągnięty dla zlewni ZT po czasie 1,8 godziny, a dla zlewni ZK po czasie

10,3 godziny. Czas opadania wezbrania na obszarze zlewni ZT równy jest 7,4 godziny, a na obszarze zlewni ZK 41,3 godziny.



Rys. 6. Porównanie hydrogramów odpływu dla zlewni ZT i ZK przy opadzie o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 50\%$  i czasie trwania  $t = 24$  h (źródło: opracowanie własne)

Fig. 6. Comparison of flow hydrographs for the ZT and ZK catchments at exceedance probability of precipitation  $p = 50\%$  and duration of rainfall  $t = 24$  h (source: own)

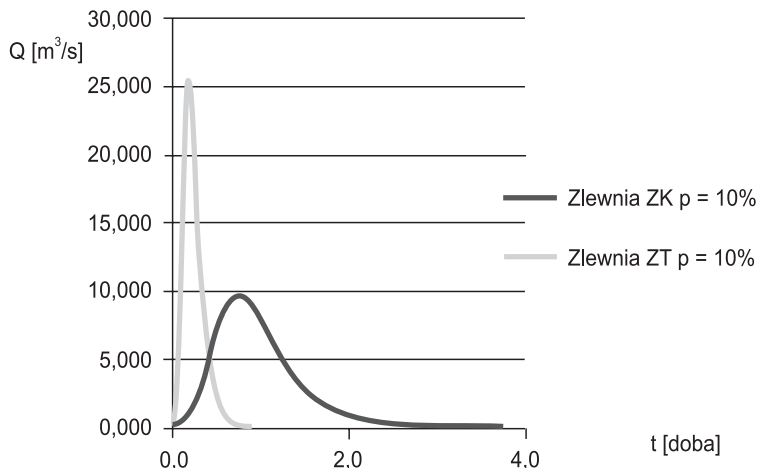


Rys. 7. Porównanie hydrogramów odpływu dla zlewni ZT i ZK przy opadzie o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p=10\%$  i czasie trwania  $t = 1$  h (źródło: opracowanie własne)

Fig. 7. Comparison of flow hydrographs for the ZT and ZK catchments at exceedance probability of precipitation  $p=10\%$  and duration of rainfall  $t = 1$  h (source: own)

Dla prawdopodobieństwa przewyższenia  $p = 10\%$  oraz czasie trwania opadu  $t = 24$  h uzyskane objętości przedstawiają się następująco: dla zlewni ZT  $V = 513\,214$   $\text{m}^3$ , a dla zlewni ZK  $V = 831\,201$   $\text{m}^3$ . Całkowity czas trwania wezbrania równy jest dla zlewni ZT 0,9 do-

by, a dla zlewni ZK 3,8 doby. Czas wznoszenia fali i opadania wynosi dla gminy zlewni ZT odpowiednio 0,2 doby i 0,7 doby. Czas wznoszenia i opadania fali wezbrania dla zlewni ZK wynosi odpowiednio 0,8 i 3 doby (rys. 8).



Rys. 8. Porównanie hydrogramów odpływu dla zlewni ZT i ZK przy opadzie o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 10\%$  i czasie trwania  $t = 24$  h (źródło: opracowanie własne)

Fig. 8. Comparison of flow hydrographs for the ZT and ZK catchments at exceedance probability of precipitation  $p = 10\%$  and duration of rainfall  $t = 24$  h (source: own)

Na formowanie się wielkości i przebiegu wezbrań wpływa wiele czynników, które związane są nie tylko z opadem, ale i z charakterystyką obszarów oraz warunkami panującymi na tych obszarach w momencie wystąpienia opadu.

Wartość maksymalnego przepływu prawdopodobnego, jaką obliczono dla zlewni rolniczej ZK, dla prawdopodobieństwa przewyższenia  $p = 50\%$  oraz  $p = 10\%$ , jest prawie trzy razy większa od maksymalnego przepływu prawdopodobnego, obliczonego dla części miasta Krakowa (zlewnia ZK). Spowodowane jest to m.in. tym, że obszar gminy Tymbark zaliczany jest do terenów górzystych.

Na podstawie zamieszczonych hydrogramów (rys. 5 i 7) i czasu trwania deszczu 1 h widać, iż fala wezbrania dla zlewni ZT jest strzelista i stroma oraz ma krótszy czas całkowitego przebiegu niż fala wezbraniowa dla zlewni ZK.

W przypadku  $t = 1$  h i  $t = 24$  h, dla obu prawdopodobieństw przewyższenia, czas osiągnięcia przepływu kulminacyjnego oraz czas opadania fali w zlewni ZK jest znacznie dłuższy niż ten czas w zlewni ZT.

Wynika z tego, iż dużą rolę w formowaniu fali wezbrania odgrywa rodzaj obszaru oraz jego spadek. Im spadek jest większy oraz powierzchnia bardziej nieprzepuszczalna, tym szybsza jest koncentracja przepływu i szybsze przemieszczanie się kulminacji fali. Na kształt fali wezbraniowej wpływa również długość ciek, gdyż wezbranie nie tworzy się jednocześnie na całej długości ciek, ale przemieszcza się wzdłuż jej biegu.



## 6. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż powierzchnie uszczelnione, charakteryzujące się wysokim współczynnikiem spływu, przyczyniają się do wzrostu wielkości odpływu wód opadowych ze zlewni. Na ilość odpływającej wody deszczowej z danych obszarów znaczący wpływ ma spadek terenu oraz rodzaj powierzchni. Obszary o przepuszczalnych powierzchniach wpływają na zmniejszenie ilości odprowadzanej wody deszczowej ze zlewni.

W artykule przedstawiono prosty analityczny model hydrologiczny zlewni, który może być wykorzystywany w pracach planistycznych na etapie sporządzania planów zagospodarowania przestrzennego terenu i określania wpływu zmian stopnia uszczelnienia powierzchni na bilans wodny obszaru zainwestowania.

## Literatura

- [1] C i e p i e l o w s k i A., D ą b k o w s k i S z. L., *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)*, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz 2006.
- [2] E d e l R., *Odwodnienie dróg*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.
- [3] GUS, Główny Urząd Statystyczny ([http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xchg/gus,http://www.stat.gov.pl/bdr\\_n/app/portret.wyswietl?p\\_nts\\_id=6&p\\_tery\\_id=1787&p\\_czas\\_id=14&p\\_wyjście=0](http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xchg/gus,http://www.stat.gov.pl/bdr_n/app/portret.wyswietl?p_nts_id=6&p_tery_id=1787&p_czas_id=14&p_wyjście=0)) (dostęp: 27 maja 2010).
- [4] L a m b o r J., *Hydrologia inżynierska*, Arkady, Warszawa 1971.
- [5] RZGW, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie, *Załącznik F – Formula opadowa wg Stachy i Fal* ([http://www.wrotamalopolski.pl/NR/rdonlyres/CBC69D33-269A-4666-816F-10E1803F37E3/494645/07\\_Formula\\_opadowa\\_zal\\_F.pdf](http://www.wrotamalopolski.pl/NR/rdonlyres/CBC69D33-269A-4666-816F-10E1803F37E3/494645/07_Formula_opadowa_zal_F.pdf)) (dostęp: 12 grudnia 2010).
- [6] S t a c h y J., *Atlas hydrologiczny Polski*, IMGW, Tom I, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1987.