



Wyznaczenie wielkości opadu efektywnego i przepływów maksymalnych w małych zlewniach niezurbanizowanych

*Jolanta Kanclerz, Sadzide Murat-Błażejewska, Agnieszka Wolak
Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań*

1. Wstęp

Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dn. 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim obliguje państwa członkowskie do sporządzenia map zagrożenia i map ryzyka powodziowego do grudnia 2013 r. Choć działania te mają być podjęte w ramach wspólnotowej polityki wodnej, kwestie te mają również wpływ na takie sfery jak polityka rolna, ochrona środowiska, planowanie przestrzenne, obrona cywilna i transport. Opracowanie map zagrożenia powodziowego wymaga wyznaczenia wielkości wezbrań powodziowych. Według „Metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych” opracowanej przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich na zlecenie Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej do obliczenia przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w małych (do 50 km²) zlewniach niezurbanizowanych należy stosować formułę opadową, zaś w zlewniach zurbanizowanych należy stosować metodę symulacyjną lub model opad-odpływ (http://www.kzgw.gov.pl/files/file/Wiadomosci/Metodyki_MZP_KH_.pdf).

W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie modelu hydrologicznego Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) do obliczenia wielkości opadu efektywnego i przepływów maksymalnych w małej niezurbanizowanej zlewni cieką Dębina o powierzchni 47,28 km².

2. Funkcjonowanie modelu HEC-HMS

HEC-HMS to system symulacji procesów hydrologicznych zachodzących w zlewni na zasadzie modelu opad-odpływ oraz odpływu rozgałęzioną siecią rzeczna, zarówno naturalnego jak i przekształconego [4]. System umożliwia dobór metod modelowania spośród kilku różniących się stopniem złożoności, a tym samym liczbą wymaganych parametrów i dokładnością oszacowania wyników. HEC-HMS składa się z następujących komponentów:

- opisu opadu – pozwala ona na wprowadzenie wejściowych danych meteorologicznych zarówno w formie serii obserwacji jak i w postaci opadów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia lub szacowanych wartości maksymalnych.
- modeli do szacowania opadu efektywnego (runoff-volume models). Dostępne są cztery modele służące do określania opadu efektywnego podczas poszczególnych zdarzeń opadowych: metoda stałego współczynnika strat, metoda Greena i Ampta, metoda stałego współczynnika strat z deficytem początkowym oraz metoda SCS-CN. W metodach tych zakłada się warunki początkowe występujące w zlewni. Piąta metoda – model SMA (Soil-Moisture Accounting) jest modelem ciągłym wymagającym określenia parametrów poprzez kalibrację.
- modeli odpływu bezpośredniego – służących do wyznaczania hydrogramu odpływu ze zlewni elementarnej. Program pozwala na określenie hydrogramu jednostkowego użytkownika, zastosowanie hydrogramu Clark'a, Snyder'a, SCS UH, a także zmodyfikowanego hydrogramu Clark'a dla zlewni o parametrach rozłożonych lub conceptualnego modelu fali kinematycznej. Ten ostatni wymaga dysponowania pomierzonymi wartościami parametrów takich jak: pola powierzchni, długości drogi spływu wody, szerokości kanałów, spadki, współczynniki szorstkości. Model ten zalecany jest do stosowania w przypadku mniejszych zlewni (do 2,5 km²). Z kolei metoda SCS-UH stosowana może być w zlewniach charakteryzujących się prostym hydrogramem o pojedynczym szczycie.
- modeli przepływu gruntowego. Przepływ gruntowy można przyjąć jako stały w poszczególnych miesiącach lub wykorzystać jeden z dwóch modeli – model wykładniczy oraz model zbiornika liniowego współpracujący z modelem SMA obliczania opadu efektywnego.

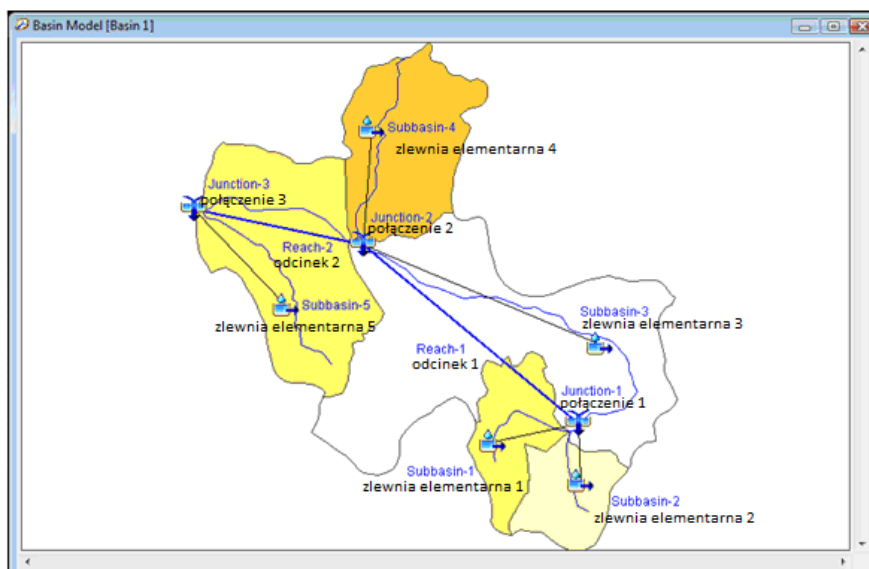
- modeli transformacji fali wezbraniowej – dostępnych jest pięć modeli przepływu w ciekach, w tym model Lag, który jest najprostszym rozwiązaniem uwzględniającym jedynie przesunięcie hydrogramu w czasie.

3. Zastosowanie modelu HEC-HMS

Zlewnia ciek Dębina położona jest na Pojezierzu Wielkopolskim (315.5) w mezoregionie Pojezierze Gnieźnieńskie (315.54) [5]. Ciek Dębina o długości 14,64 km jest ciekim V rzędu, który wpływa do Jeziora Kłęckiego około 17 km na północny-zachód od Gniezna w miejscowości Borzątew. Średnia wysokość zlewni to 110,4 m n.p.m. Spadek podłużny zlewni wynosi 1,17‰, a spadki poprzeczne wahają się w granicach od 1,0 do 17,7‰, średnio 7,7‰. Charakterystykę gleb opracowano na podstawie mapy glebowo-rolniczej w skali 1:100 000 (IUNG Puławy, 1981) oraz informacji uzyskanej w Nadleśnictwie Gniezno. Typy gleb zreinterpretowano w celu ich określenia wg najnowszej Systematyki Gleb Polski [6]. W zlewni ciek dominują gleby płowe wytworzone z materiałów morenowych (ok. 50%) oraz występujące pod lasami gleby rdzawe (ok. 23%). Pozostały obszar pokryty jest glebami hydrogenicznymi i semihydrogenicznymi. W strukturze użytkowania określonej na podstawie bazy danych Corine Land Cover dominują w 77% grunty orne, a ok. 20% stanowi pas terenów leśnych wraz z terenami zielonymi.

Analizowany obszar charakteryzuje się najniższymi w Polsce rocznymi sumami opadów. Pomiar w stacji opadowej w Kiszku, położonej ok. 15 km od profilu Borzątew zamykającego badaną zlewnię wskazują, że średnia roczna suma opadów z wielolecia 2005–2009 wynosiła 516 mm. Wysokość maksymalnych dobowych sum opadów obliczono wykorzystując formułę opadową opracowaną przez Bogdanowicz i Stachy [2]. Obliczone opady o czasie trwania 2 h i prawdopodobieństwie przewyższenia 1% i 10% wynoszące odpowiednio 55,9 mm i 39,4 mm, stanowiły dane wejściowe do obliczeń opadu efektywnego. Z uwagi na niewielką powierzchnię zlewni przyjęto opad jednolicie rozłożony na jej powierzchni.

Wezbrania opadowe rzeki Dębina w profilu Borzątew wywołane deszczem o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% i 10% wyznaczono przy użyciu programu HEC-HMS 3,5. W tym celu zlewnię ciek Dębina podzielono na pięć zlewni elementarnych (Rys. 1).



Rys. 1. Podział zlewni ciek Dębina na zlewnie elementarne

Fig. 1. Subbasins of the Dębina stream catchment

Dla każdej zlewni elementarnej obliczono średnią ważoną wartość parametru CN, czas opóźnienia oraz niezbędne parametry (Tab. 1) dla określenia opadu efektywnego czterema metodami:

- metodą SCS-CN [1], gdzie opad efektywny oblicza się wzorem:

$$P_{ej} = \begin{cases} 0, & P_j - 0,2S \leq 0 \\ \frac{(P_j - 0,2S)^2}{P_j + 0,8S}, & P_j - 0,2S > 0 \end{cases} \quad (1)$$

w którym:

P_j – opad w czasie od t_0 do t_j [mm],

P_{ej} – opad efektywny w czasie od t_0 do t_j [mm],

S – maksymalna potencjalna retencja:

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

w którym:

CN – parametr metody (parametr jednolitej pod względem użytkowania terenu i rodzaju gleb części zlewni).

- metodą Greena i Ampta, która jest modelem infiltracji opadu w obrębie zlewni, będącym w istocie uproszczeniem pełnego równania Richardsa dla nieustalonego przepływu wody w glebie [4]. Opad efektywny obliczany jest jako różnica opadu całkowitego (dane wejściowe) i straty wyznaczonej ze wzoru:

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (3)$$

w którym:

f_t – strata w czasie t ,

K – współczynnik filtracji,

ϕ – zawartość wody w glebie nasyconej,

Θ_i – początkowa zawartość wody w glebie,

S_f – front zwilżania,

F_t – ilość wody zretencjonowanej do czasu t .

- metodą stałego współczynnika strat (Initial and constant rate), która jest prosta i właściwa dla zlewni, dla których brakuje szczegółowych informacji na temat gleb [7]. Wymaga ona określenia straty początkowej, czyli ilość opadu, która zostanie zretencjonowana w zlewni zanim się zacznie odpływ powierzchniowy. Drugim parametrem jest stały współczynnik opisujący szybkość infiltracji, która wystąpi po tym, jak wartość straty początkowej zostanie przekroczona.
- metodą stałego współczynnika strat z deficytem początkowym (Deficit and constant rate) – wykorzystuje ona pojedynczą warstwę gleby do oszacowania ciągłych zmian zawartości wilgoci [7].

W przypadku metod stałego współczynnika strat oraz Greena i Ampta przyjęto wartości parametrów określające warunki początkowe panujące w zlewni odpowiadające zawartości wody w glebie na poziomie połowej pojemności wodnej. Dla określenia współczynnika strat posłużono się współczynnikiem filtracji, który dla poszczególnych rodzajów gleb przyjęto na podstawie wartości określonych przez Rawlsa [4]. Podobnie wyznaczono wartości porowatości gruntów i frontu zwilżania.

Wartości parametrów deficytu początkowego i straty początkowej dla przyjętego poziomu retencji przy połowej pojemności wodnej określono na podstawie krzywych pF sporządzonych dla gleb zlewni.

Tabela 1. Parametry zlewni elementarnych do obliczeń opadu efektywnego czterema metodami zaimplementowanych w modelu HEC-HMS

Table 1. Subbasins parametrs for efective rainfall calculation using four methods included in HEC-HMS model

Parametr	Zlewnia elementarna	1	2	3	4	5
Powierzchnia [ha]		391,12	341,99	2055,98	781,34	1157,31
Obszary nieprzepuszczalne [%]		0	0	0,54	1,02	1,78
SCS CN						
CN (poziom wilgotności II)		74,5	73,0	69,9	71,5	66,4
Metoda stałego współczynnika strat						
Strata początkowa [mm]		15,0	14,9	16,4	14,9	16,5
Współczynnik strat [mm/h]		76,1	61,1	131,0	91,9	129,3
Metoda Greena i Ampta						
Porowatość gleby [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$]		0,440	0,437	0,437	0,437	0,437
Strata początkowa [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$]		0,170	0,167	0,167	0,167	0,167
Współczynnik filtracji [mm/h]		76,1	61,1	131,0	91,9	129,3
Front zwilżania [mm]		151,5	142,0	125,9	135,4	126,4
Metoda deficytu początkowego i stałego współczynnika strat						
Współczynnik filtracji [mm/h]		76,1	61,1	131,0	91,9	129,3
Maksymalna potencjalna retencja [mm]		210,0	208,5	208,6	208,6	208,6
Deficyt początkowy [mm]		125,0	125,0	125,0	125,0	125,0

Wysokość strat początkowych w metodzie stałego współczynnika strat określono na podstawie parametrów zestawionych w instrukcji Flood-Runoff Analysis opracowanej przez Korpus Inżynierów Armii Stanów Zjednoczonych [9].

Wartości opadu efektywnego obliczonego metodą SCS CN były najwyższe i dla opadu $P_{1\%} = 55,9$ mm wyniosły – 8,6 mm, a dla $P_{10\%} = 39,4$ mm – 2,8 mm. Zaś obliczone pozostałymi metodami (Greena i Ampta, deficytu początkowego i stałego współczynnika strat) były znacznie niższe i wynosiły średnio dla $P_{1\%} - 0,47$ mm i $P_{10\%} - 0,33$ mm.

Następnie w każdej zlewni elementarnej zastosowano model transformacji Snyder'a opadu w odpływ [9], który zakłada że szczyt fali wezbraniowej zależy jest od powierzchni zlewni, interwału czasowego i parametru krzywej według równania:

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_p}{t_p} \quad (4)$$

w którym:

U_p – szczyt hydrogramu,

A – powierzchnia zlewni,

C – stały współczynnik równy 2,75,

C_p – parametr krzywej,

t_p – czas opóźnienia odpływu.

Parametr krzywej C_p decyduje o kształcie krzywej hydrogramu. Jego wartość waha się w przedziale 0,4–0,8. Czas opóźnienia odpływu t_p zależy od właściwości zlewni i związany jest z czasem spływu wód opadowych do rozpatrywanego profilu. Na ogół szacowany jest jako 50–75% czasu koncentracji.

Do ustalenia transformacji fali wezbraniowej na poszczególnych odcinkach koryta rzeki zastosowano model opóźnienia odpływu (Lag Model). Jako czas opóźnienia przepływu założono czas koncentracji [3] obliczony ze wzoru:

$$T_c = 0,01947 \frac{L_c^{1,155}}{H_c^{0,385}} \quad (5)$$

w którym:

L_c – długość ciek [m],

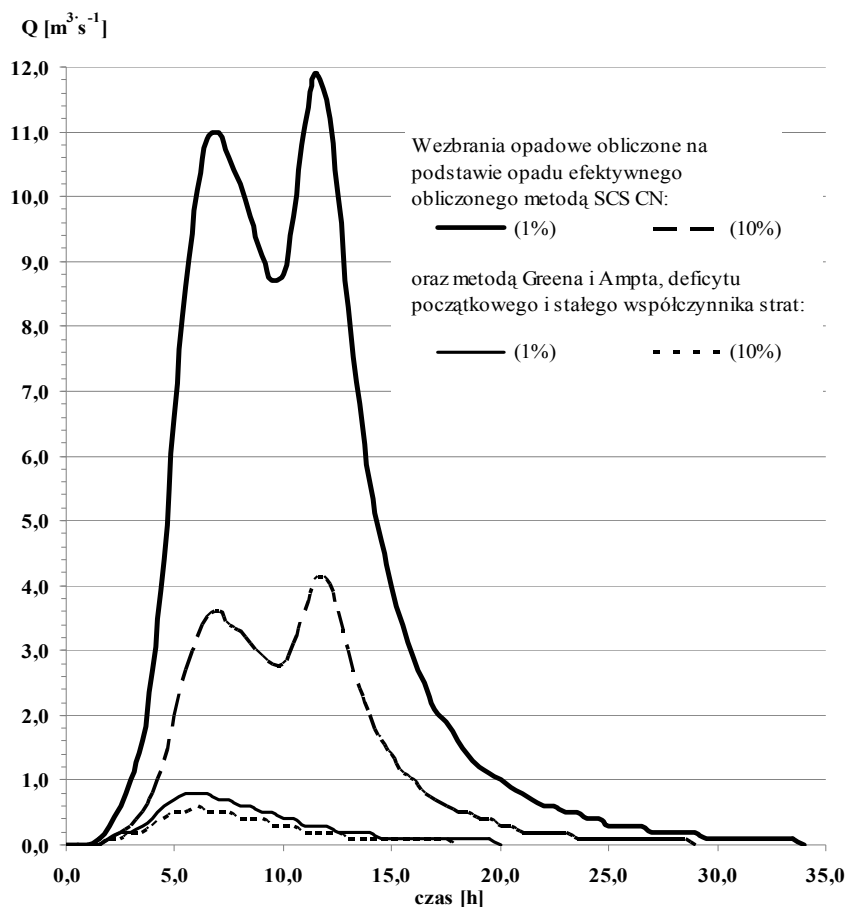
H_c – różnica wysokości na długości ciek [m].

Czas koncentracji dla pierwszego odcinka wyniósł 372 min, a dla drugiego 144 min. Czasy opóźnienia odpływu, przyjęto jako 75% czasu koncentracji [4].

Przepływy maksymalne wezbrań opadowych w profilu Borzątek obliczone na podstawie opadu efektywnego obliczonego metodą SCS CN wynosiły $Q_{1\%} = 11,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q_{10\%} = 4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Rys. 2). Wielkości te były znacznie wyższe od wielkości przepływów maksymalnych obliczonych pozostałymi metodami (Greena i Ampta, deficytu początkowego i stałego współczynnika strat) i wzorami empirycznymi.

Nateżenie przepływów maksymalnych obliczonych na podstawie opadu efektywnego uzyskanego z trzech pozostałych metod wynosiło $Q_{1\%} = 0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q_{10\%} = 0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast wielkości przepływów maksy-

malnych rocznych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% i 10% obliczone dwoma wzorami empirycznymi (Stachy i Fal oraz Dębskiego i Stachy) były zbliżone i wynosiły $Q_{1\%} = 6,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $Q_{10\%} = 3,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 2. Obliczone hydrogramy wezbrań opadowych ciek Dębina w profilu Borzątew

Fig. 2. Calculated rainfall hydrograms in Borzątew cross-section in Dębina stream catchment

4. Podsumowanie

Zastosowanie modelu hydrologicznego HEC-HMS do obliczenia opadu efektywnego i przepływów maksymalnych wezbrań opadowych w małych zlewniach niezurbanizowanych wykazało dużą rozbieżność wyników. W zlewni ciek Dębina wielkość opadu efektywnego obliczonego metodą SCS CN wynosiła $P_{1\%} = 8,6$ mm i $P_{10\%} = 2,8$ mm, a pozostałymi metodami (Greena i Ampta, deficytu początkowego i stałego współczynnika strat) – $P_{1\%} = 0,47$ mm i $P_{10\%} = 0,33$ mm. Przy takich opadach efektywnych przepływy maksymalne wezbrań opadowych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% i 10% wynosiły odpowiednio $11,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a pozostałymi metodami $Q_{1\%} = 0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q_{10\%} = 0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Nateżenia przepływów maksymalnych rocznych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% i 10% obliczone wzorami empirycznymi (Stachy i Fal oraz Dębskiego i Stachy) dla zlewni ciek Dębina wynosiły $Q_{1\%} = 6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q_{10\%} = 3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Uzyskane z modelu hydrologicznego przepływy maksymalne wezbrań opadowych były znacznie wyższe (przy obliczaniu opadu efektywnego metodą SCS CN) lub znacznie niższe (przy obliczaniu opadu efektywnego pozostałymi metodami) od maksymalnych rocznych.

Dobór metod obliczania opadu efektywnego jako składowej modelu hydrologicznym opad – odpływ w zlewni niezurbanizowanej ma istotny wpływ na wynik obliczeń przepływów maksymalnych wezbrań opadowych. Zastosowanie metody SCS CN do obliczania opadu efektywnego może więc skutkować przeszacowaniem wielkości przepływów maksymalnych, a zastosowanie pozostałych metod ich niedoszacowaniem.

Literatura

1. **Banasik K.:** *Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych*. Wydawnictwo SGGW, 40. Warszawa 2009.
2. **Bogdanowicz E. i Stachy J.:** *Maksymalne opady deszczu w Polsce, charakterystyki projektowe*. Mat. Bad. IMGW 23 seria Hydrologia i Oceanologia 85, 1998.
3. **Ciepielowski A., Dąbkowski S.:** *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)*. Oficyna Wydawnicza ProjprzemEKO, 311. Bydgoszcz 2006.

4. **Feldman A.D. (red.):** *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*, USACE, Hydrologic Engineering Center, Davis, 155, 2000.
5. **Kondracki J.:** *Geografia regionalna Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 468. Warszawa 2009.
6. **Mocek A., Drzymala S.:** *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*. Wydawnictwo UP w Poznaniu, 418. Poznań 2010.
7. **Scharffenberg W.A., Fleming M.J.:** *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*, USACE, Hydrologic Engineering Center, Davis, 278, 2006.
8. Ramowa Dyrektywa Wodna 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 r.
9. **USACE:** *Flood-runoff analysis, EM 1110-2-1417*. Office of Chief of Engineers, Washington, DC, 1994.

Determination of Effective Rainfall and Maximum Flows in Small Non-urban Catchments

Abstract

This paper presents application of HEC-HMS model that was used to calculate a peak flow for a small, non-urban catchment. The Debina catchment with 47.8 km² area is located in a central part of Gnieźnieńskie Lakeland region. In this area Luvisol made from moraine materials (50%) and Brunic Arenosol (23%) under forest predominates. The rest of the catchment is covered by Histic Gleysol and Histosol. Obtained data from Corine Land Cover was used to quantify landuse structure in the studied catchment. The results showed that 77% of area is used as an arable land and around 20% as a belt of woodland with greens.

Calculations of the effective rainfall were performed using four methods: SCS curve number (CN), Green and Ampt, initial and constant and deficit and constant method. The scale of the effective rainfall calculated by these four methods implemented in HEC-HMS hydrologic model showed a large divergence.

Significant differences of the effective rainfall values translate into discharges values which are calculated on their basis. The peak flow of probability of exceedance of 10% in the Debina stream may have values which oscillate between 4.1 m³·s⁻¹ and 0.6 m³·s⁻¹ depending on the effective rainfall determination method. In case of 1% rainfall, peak discharges oscillate between 11.9 m³·s⁻¹ and 0.8 m³·s⁻¹. Flows calculated using SCS CN method are comparable to the values of maximum flow calculated using empirical formulas (Stachy and Fal and Debski and Stachy) which amount $Q_{1\%} = 6.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $Q_{10\%} = 3.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Calculations of the peak flows in the Debina catchment indicate that the selection of methods that determine effective rainfall as a component of rainfall-runoff model has a significant influence on the maximum flow values.