

## OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA KRZYWEJ OPADANIA PRZEPIŹYWÓW DO OCENY RETENCJI

Daniel Liberacki<sup>1</sup>, Mariusz Korytowski<sup>1</sup>, Paweł Kozaczyk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Melioracji Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94, Poznań, e-mail: dliber@up.poznan.pl

### STRESZCZENIE

Celem pracy było przedstawienie możliwości zastosowania krzywej opadania przepływów w małej zlewni nizinnej do oceny wielkości retencji odpływowej. Rozpatrywana mikrozwlewnia leśna o powierzchni 0,52 km<sup>2</sup> położona jest w centralnej części Wielkopolski w Puszczy Zielonka. Zlewnia ciekut Hutki ma charakter typowo leśny i charakteryzuje się dużymi zdolnościami retencyjnymi. Zlewnia ciekut Hutka jest w 89% zalesiona, pozostałe 11% powierzchni zajmują głównie zabagnienia i nieużytki. Głównie występują tutaj siedliska boru mieszanego świeżego (BMśw), boru świeżego (Bśw) oraz olsu (Ol). Krajobraz zlewni charakteryzuje się dużą ilością zagłębień bezodpływowych, które wypełnione są częściowo wodami opadowymi lub torfowiskami, ze słabo rozwiniętym naturalnym drenażem. Długość ciekut nie przekracza 1 kilometra, średnia szerokość wynosi około 0,5 m, a średnia głębokość zmienia się w granicach od 0,2 do 0,3 m. Podczas prowadzonych badań w latach hydrologicznych 1997/98–1999/2000, zaobserwowano 35 większych (charakterystycznych) wezbrań w przepływach ciekut Hutki, występujących po znaczących opadach atmosferycznych. Najbardziej zbliżone współczynniki  $\alpha$  i  $n$  do wartości średnich ma krzywa opadania z okresu 18–24 września 2000 roku. Porównując wartości krzywej z modelu i krzywej otrzymanej na podstawie obserwacji przepływów wody w ciekut, można stwierdzić, że obie krzywe są do siebie bardzo podobne i mają bardzo zbliżone wartości rzędnych oraz kształt. Dla pozostałych krzywych opadania maksymalne różnice rzędnych są podobnego rzędu ok. 0,1–0,2 l/s/km<sup>2</sup>. Obliczone wartości  $\alpha$  i  $n$  nie wykazują regularności. Nie występują znaczące statystyczne zależności parametrów modelu Hortona (dla krzywych opadania przepływów)  $\alpha$  i  $n$  np. od przepływów początkowych ( $Q_0$ ) lub podstaw fal wezbraniowych ( $Q_p$ ). W konsekwencji obliczony związek między tymi parametrami, dla oceny całkowitej retencji odpływowej zlewni – retencji w funkcji przepływu ma charakter jedynie orientacyjny.

**Słowa kluczowe:** krzywa opadania, przepływy, retencja odpływowa, mała zlewnia.

### POSSIBLE RECESSION CURVE APPLICATIONS FOR RETENTION EVALUATION

#### ABSTRACT

The objective of the article was to present possible applications of recession flow curve in a small lowland watershed retention discharge size evaluation. The examined woodland micro catchment area of 0.52 sq km is located in Puszcza Zielonka in central Wielkopolska. The Hutka catchment is typically woody with high retention abilities. The catchment of the Hutka watercourse is forested in 89%, the other 11% is covered by swamps and wasteland. The predominant sites are fresh mixed coniferous forest (BMśw), fresh coniferous forest (Bśw) and alder carr forest (Ol). Landscape in catchment is characterized by a large number of interior depressions, filled partly with rainwater or peatbogs, with poorly developed natural drainage. The watercourses do not exceed 1 km in length, the mean width is approx. 0.5 m, while mean depth ranges from 0.2 to 0.3 m. During hydrological research conducted in 1997/1998–1999/2000, 35 major (characteristic) raised water stages were observed in Hutka after substantial precipitation. The recession curve dating from 18–24 September 2000 has the  $\alpha$  and  $n$  rates nearest to average. Comparing the model curve and the curve created by observing watercourse flow, one can notice their resemblance and that they have similar ordinate values as well as shape. In the case of other recession curves, the maximum differences of ordinate values are also about 0.1–0.2 l/s/km<sup>2</sup>. The measured  $\alpha$  and  $n$  rates do not reveal any regularities. There are no significant statistical Horton model parameter (for recession flow curves) dependencies between  $\alpha$  and  $n$  and e.g. initial flows ( $Q_0$ ) or the whole period of high water waves ( $Q_p$ ). Consequently, calculated relation between these parameters is only an approximation for the general evaluation of the retention discharge in the catchment area towards retention with flow function.

**Keywords:** recession curve, initial flows, high water waves, small catchment.

## WSTĘP

Badając zagadnienia intensywności zasilania cieków wodami drenowanych poziomów wodonośnych oraz problemy ruchu wód podziemnych, Boussinesq dowiódł, że związki zachodzące między zasobnością poziomu wodonośnego w przedziale czasu  $\Delta t$  można przedstawić w postaci rodziny funkcji różniczkowalnych względem czasu (pod warunkiem braku zasilania z zewnątrz) [3, 4]. Zakładając, że ruch wody w strefie nasyconej ma charakter laminarny i różniczkując funkcję opisującą objętość wody gromadzonej w drenowanym poziomie wodonośnym, uzyskano dwa równania służące ocenie wydajności poziomu w czasie  $t$ , w funkcji wydatku w czasie  $t_0$  i pewnej stałej, zwanej dalej współczynnikiem opadania-wysychania:

$$Q_t = Q_0 \exp(-at) \quad (1)$$

$$Q_t = Q_0 [(1 + \beta t)^2]^{-1} \quad (2)$$

gdzie:  $Q_t$  – wydajność w czasie  $t$ ,  
 $Q_0$  – wydajność na początku procesu ( $t_0$ ),  
 $t$  – czas, w którym wydatek zmniejsza się od  $Q_0$  do  $Q_t$ ,  
 $\alpha, \beta$  – współczynniki opadania-wysychania.

Obie formuły, a zwłaszcza równanie (1), szybko znalazły zastosowanie do szacowania zasobów gromadzonych w zbiornikach wód podziemnych drenowanych przez źródła, jak i do symulacji wydajności tych źródeł. Równolegle prowadzono badania nad parametryzacją kształtu krzywych opadania fal wezbraniowych rzek i strumieni. Ich wynikiem była formuła opisująca związek między przepływem w czasie  $t$  a przepływem w czasie  $t_0$  (początek fazy opadania przepływów):

$$t = c [(Q_t - b)^{-1} - (Q_0 - b)^{-1}] \quad (3)$$

gdzie:  $t$  – czas opadania od poziomu  $Q_0$  do  $Q_t$ ,  
 $Q_t$  – przepływ w terminie  $t$ ,  
 $Q_0$  – przepływ w terminie  $t_0$ ,  
 $b, c$  – stałe zlewni

Formuła ta, ważna dla okresu posusznego jest próbą analitycznego opisu procesu wyczerpywania się zasobów wodnych zlewni. Parametr  $b$ , we wzorze wskazuję, że pełni on rolę granicy przepływu, do której asymptotycznie zmierza teoretyczna krzywa opadania.

Duże uznanie zdobyła formuła zaproponowana przez Hortona [8]:

$$Q_t = Q_0 \exp(-at^n) \quad (4)$$

gdzie:  $n$  – parametr kształtu krzywej recesji.

Parametr  $n$  charakteryzuje te cechy środowiska geograficznego zlewni, które można uznać za stacjonarne. Jego wartość dla danej zlewni lub całego kraju może być traktowana jako stała. Przykładem takiego rozwiązania są krzywe opadania rzek alpejskich opisane przez Reitza równaniem:

$$Q_t = Q_0 \exp(-at^{0.5}) \quad (5)$$

W wyniku prowadzonych badań nad przebiegiem krzywych opadania przepływów w małych zlewniach nizinnych w okresie bezdeszczowym, Kosturkiewicz [5, 6] oraz Wrześniński [12] stwierdzili, że przebieg ten jest związany ze średnimi temperaturami okresu bezdeszczowego oraz z różnicami między przepływami kulminacyjnymi fal wezbraniowych i średnimi przepływami podstawy tych fal.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania krzywej opadania przepływów w małej zlewni nizinnej do oceny wielkości retencji.

W pracy przedstawiono wyniki badań i obserwacji terenowych przeprowadzonych w latach hydrologicznych 1998–2000, w mikrozelewni ciek Hutka do przekroju Huta Pusta. Zlewnia, położona jest w centralnej części Wielkopolski, około 20 km na północny-wschód od Poznania, w Puszczy Zielonka. Obszar zlewni o powierzchni 0,52 km<sup>2</sup> jest zalesiony w 89%. Szczegółowy opis warunków fizjograficznych zlewni ciek Hutka podano w pracach [9, 10, 11].

Podczas prowadzonych badań szczegółowej analizie poddano krzywe opadania przepływów wody, które zostały wyznaczone na podstawie pomiarów przepływów w cieku Hutka na przelewie Thomsona z limnigrafem usytuowanym w przekroju zamykającym badaną zlewnię. Na podstawie krzywych przebiegu codziennych przepływów oraz przebiegu opadów atmosferycznych w analizowanych latach hydrologicznych wybrano 35 krzywych opadania w różnych porach roku. Jako minimalny okres bezdeszczowy przyjmowano 3 dni. Dla każdej fali określono początek, kulminację i koniec wezbrania. Jako podstawę fali przyjęto średni przepływ przed opadami, powodującymi wezbranie.

Jak wiadomo w okresach bezopadowych przepływy w ciekach stopniowo wraz z upływem czasu maleją. W pracy wykorzystano trzy zależności opisujące ten proces [1, 2, 7]:

- „prawo malejącego postępu geometrycznego”

$$Q_t = Q_0 \cdot q^t, \quad (6)$$

gdzie:  $Q_t$  – przepływ w czasie  $t$ ,  $Q_0$  – przepływ początkowy,  $q < 1$  – iloraz postępu geometrycznego,  $t$  – czas (doby),

- prawo Maillet’a

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}, \quad (7)$$

gdzie:  $Q_t, Q_0, t$  – oznaczenia j.w.,  $\alpha$  – współczynnik recesji krzywej opadania przepływów,

- prawo Hortona

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t^n}, \quad (8)$$

gdzie:  $Q_t, Q_0, t, \alpha$  – oznaczenia j.w.,  $n$  – współczynnik korekcyjny.

Gdy znane są  $Q_0, q, \Delta t$  (krok czasowy, najczęściej = 1 doba) – dla wzoru (6), lub  $Q_0, \alpha$  – dla wzoru (7), względnie  $Q_0, \alpha, n$  – dla wzoru (8), można oszacować  $R_\infty$  – czyli stan retencji w zlewni o powierzchni  $A$ . Odpowiednio:

- dla wzoru (6):

$$V_t = \Delta t \cdot \left[ \frac{Q_0 \cdot (q^{t+1} - 1)}{q - 1} - \frac{1}{2} \cdot (Q_0 + Q_t) \right],$$

gdzie:  $V_t$  – objętość wody odpływającej w czasie  $0 - t$ ,

$$V_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} V_t = \Delta t \cdot Q_0 \cdot \left( \frac{-1}{q-1} - \frac{1}{2} \right) = 0,5 \cdot \Delta t \cdot Q_0 \cdot \frac{1+q}{1-q},$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q_t = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} q^{t+1} = 0, \quad (\text{dla } q < 1)$$

$$R_\infty = \frac{V_\infty}{A} = 0,5 \cdot \frac{\Delta t \cdot Q_0}{A} \cdot \frac{1+q}{1-q}, \quad (9)$$

gdzie:  $R_\infty$  – wskaźnik stanu retencji, ilość wody zdolnej do samoczynnego odpływu ze zlewni,

- dla wzoru (7):

$$V_t = \int_0^t Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau} \cdot d\tau,$$

$$V_\infty = \int_0^\infty Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau} \cdot d\tau = \frac{Q_0}{\alpha},$$

$$R_\infty = \frac{V_\infty}{A} = \frac{Q_0}{A \cdot \alpha}, \quad (10)$$

(oznaczenia j.w.)

- dla wzoru (8): analogicznie j.w.

$$V_t = \int_0^t Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau^n} \cdot d\tau,$$

$$V_\infty = \int_0^\infty Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau^n} \cdot d\tau = Q_0 \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)}{\alpha^{\frac{1}{n}}},$$

$$R_\infty = \frac{V_\infty}{A} = \frac{Q_0}{A} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)}{\alpha^{\frac{1}{n}}}, \quad (11)$$

gdzie:  $\Gamma(\dots)$  – funkcja gamma, pozostałe oznaczenia j.w.

$$\Gamma(x) = \int_0^{Def. + \infty} e^{-t} \cdot t^{x-1} \cdot dt, \quad \text{dla } x > 0, \quad (\text{całka Eulera})$$

(w szczególności dla  $n = 0,5$  mamy

$$V_\infty = \int_0^\infty Q_0 \cdot e^{-\alpha \tau^{0,5}} \cdot d\tau = 2 \cdot Q_0 \cdot \int_0^\infty e^{-\alpha z} \cdot z \cdot dz = \frac{2 \cdot Q_0}{\alpha^2},$$

$$R_\infty = \frac{V_\infty}{A} = \frac{2 \cdot Q_0}{A \cdot \alpha^2}) \quad (12)$$

Obliczone dla co najmniej kilkunastu okresów bezopadowych wartości  $R_\infty$  umożliwiają obliczenie, np. metodą najmniejszych kwadratów, zależności  $R_\infty = f(Q_0)$  (najczęściej w postaci funkcji  $R_\infty = a \times Q_0^b$ ,  $a, b$  – stałe). W konsekwencji używamy możliwość szacowania aktualnej ilości wody zretencjonowanej w zlewni.

Obliczenie  $q$  dla wzoru (6) lub  $\alpha$  dla wzoru (7) jest stosunkowo proste. Można te obliczenia przeprowadzić np. metodą najmniejszych kwadratów po obustronnym zlogarytmowaniu wzorów (6, 7) – sprowadzeniu zależności do postaci liniowej. Dla bardziej ogólnej zależności – wzór (8) znana jest metoda graficzna obliczania  $\alpha$  i  $n$  [4].

Poniżej przedstawiono analityczny sposób wyznaczenia parametrów  $\alpha$  i  $n$  (dla wzoru 8), przy założeniu że  $Q_0$  traktujemy jako wartość dokładną, a pozostałe  $Q_t$  jako zmienne losowe. Założenie takie wydaje się zasadne – dokładną wartość przepływu maksymalnego, poprzedzającego okres bezopadowy można dość łatwo zmierzyć wodowskazem maksymalnym.

Logarytmując obustronnie wzór (8) otrzymujemy:

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - \alpha \cdot t^n, \quad (13)$$

oznaczmy:  $Y_t = \ln Q_t, A = \ln Q_0 - \text{const.}$

Zatem mamy:

$$A - Y_t = \alpha \cdot t^n. \quad (14)$$

Logarytmując obustronnie wzór (14) otrzymujemy:

$$\ln(A - Y_t) = \ln \alpha + n \cdot \ln t, \quad (15)$$

oznaczmy:  $Z_t = \ln(A - Y_t), B = \ln \alpha, X_t = \ln t$ .

Otrzymujemy związek liniowy:

$$Z_t = B + n \cdot X_t. \quad (16)$$

Dla znalezienia poszukiwanych wartości  $n$  i  $\alpha$  ( $\alpha = e^B$ ), metodą najmniejszych kwadratów, określmy funkcję celu:

$$F(B, n) = \sum_{i=1}^{i=M} (Z_i - B - n \cdot X_i)^2 \xrightarrow{n, B(\alpha) \rightarrow opt.} \min. \quad (17)$$

gdzie:  $\{X_i, Z_i\}$  – ciąg par danych,  $M$  – liczebność ciągu.

Korzystając z dwóch warunków koniecznych na ekstremum funkcji  $F$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial B} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^{i=M} (Z_i - B - n \cdot X_i) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial n} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^{i=M} (Z_i - B - n \cdot X_i) \cdot X_i = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

otrzymujemy układ równań (z niewiadomymi  $B, n$ ):

$$\begin{aligned} B \cdot M + n \cdot \sum_{i=1}^{i=M} X_i &= \sum_{i=1}^{i=M} Z_i, \\ B \cdot \sum_{i=1}^{i=M} X_i + n \cdot \sum_{i=1}^{i=M} X_i^2 &= \sum_{i=1}^{i=M} X_i \cdot Z_i, \end{aligned} \quad (19)$$

po rozwiązaniu powyższego układu i po wprowadzeniu pierwotnych oznaczeń otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \alpha &= \exp \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{i=M} \ln(\ln Q_0 - \ln Q_i) \right) \left( \sum_{i=1}^{i=M} (\ln t_i)^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^{i=M} (\ln(\ln Q_0 - \ln Q_i)) (\ln t_i) \right) \left( \sum_{i=1}^{i=M} \ln t_i \right)}{M \cdot \sum_{i=1}^{i=M} (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^{i=M} \ln t_i \right)^2} \right] \\ n &= \frac{M \cdot \left( \sum_{i=1}^{i=M} (\ln(\ln Q_0 - \ln Q_i)) (\ln t_i) \right) - \left( \sum_{i=1}^{i=M} \ln t_i \right) \left( \sum_{i=1}^{i=M} \ln(\ln Q_0 - \ln Q_i) \right)}{M \cdot \sum_{i=1}^{i=M} (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^{i=M} \ln t_i \right)^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

gdzie:  $Q_{ti}$  – przepływ dla czasu  $t_i$ , pozostałe oznaczenia j.w.

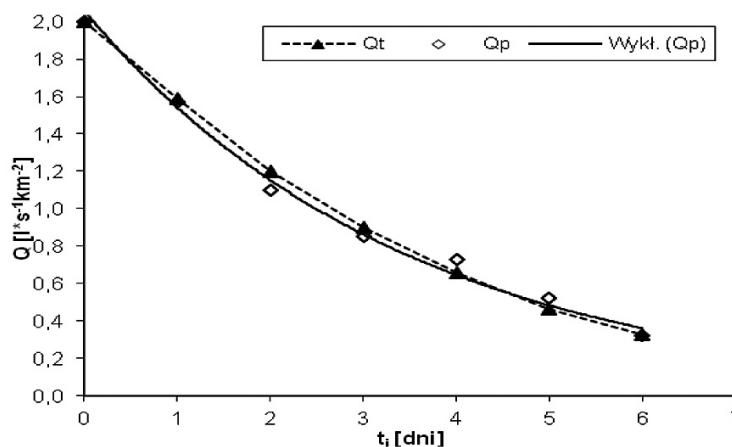
## WYNIKI

Podczas prowadzonych badań w latach hydrologicznych 1997/98–1999/2000, zaobserwowano 35 charakterystycznych wezbrań w prze-

pływach cieką Hutki, występujących po znaczących opadach atmosferycznych. Wezbrania oraz krzywe opadania przepływów (z uwzględnieniem podstawy fali ( $Q_p$ ), początkowej ( $Q_0$ ) i końcowej ( $Q_k$ ) wartości krzywej opadania) zostały syntetycznie opisane w formie tabelarycznej (tab. 1).

W dwóch ostatnich kolumnach zestawiono obliczone wartości współczynników  $\alpha$  i  $n$  dla krzywych aproksymujących wartości pomierzone opadania przepływów. Obliczenia wykonano za pomocą własnego programu numerycznego, w którym wykorzystano algorytm opisany powyżej (prawo Hortona – wzór (3)). Program numeryczny dla efektywnych obliczeń współczynników  $\alpha$  i  $n$  napisany został w języku Pascal. Dobór wartości powyższych współczynników prowadzony jest metodą najmniejszych kwadratów. Program umożliwia także „śledzenie graficzne” rezultatów obliczeń.

Najbardziej zbliżone współczynniki  $\alpha$  i  $n$  do wartości średnich ma krzywa opadania z okresu 18 – 24 września 2000 roku (tab. 1). Przepływ początkowy krzywej opadania (określony jest jednoznacznie jako kulminacja fali wezbraniowej) wynosił 2,0 l/s/km<sup>2</sup>. Jako liczbę dni bezopadowych przyjęto te dni w których, następuje wyraźny odpływ wód wezbraniowych. Dla analizowanej krzywej mamy 6 takich dni, a przepływ w ostatnim dniu wynosi 0,32 l/s/km<sup>2</sup>. Porównując wartości krzywej z modelu Hortona i krzywej otrzymanej na podstawie obserwacji przepływów wody w cieką, można stwierdzić, że obie krzywe są do siebie bardzo podobne i mają bardzo zbliżone wartości rzędnych oraz kształt (rys. 1). Dla pozostałych krzywych opadania maksymalne różnice rzędnych są podobnego rzędu ok. 0,1–0,2 l/s/km<sup>2</sup>. Obliczone wartości



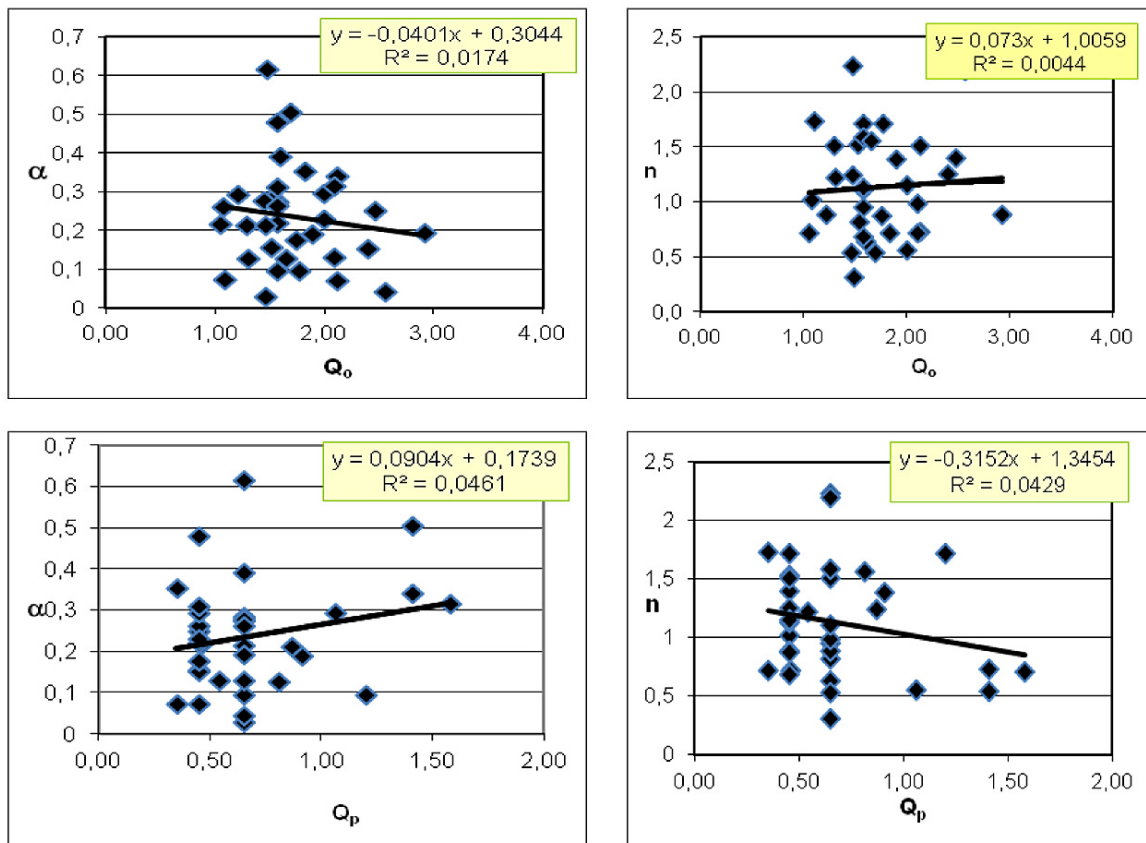
Rys. 1. Krzywe opadania przepływów w okresie 18 – 24.09.2000 roku w cieką Hutka:  $Q_t$  – krzywa z modelu Hortona,  $Q_p$  – krzywa z obserwacji (obliczeń)

Fig. 1. Flow recession curves between 18 and 24 September 2000 in the Hutka watercourse:  $Q_t$  – model curve,  $Q_p$  – curve by observing (accounts) watercourse flow

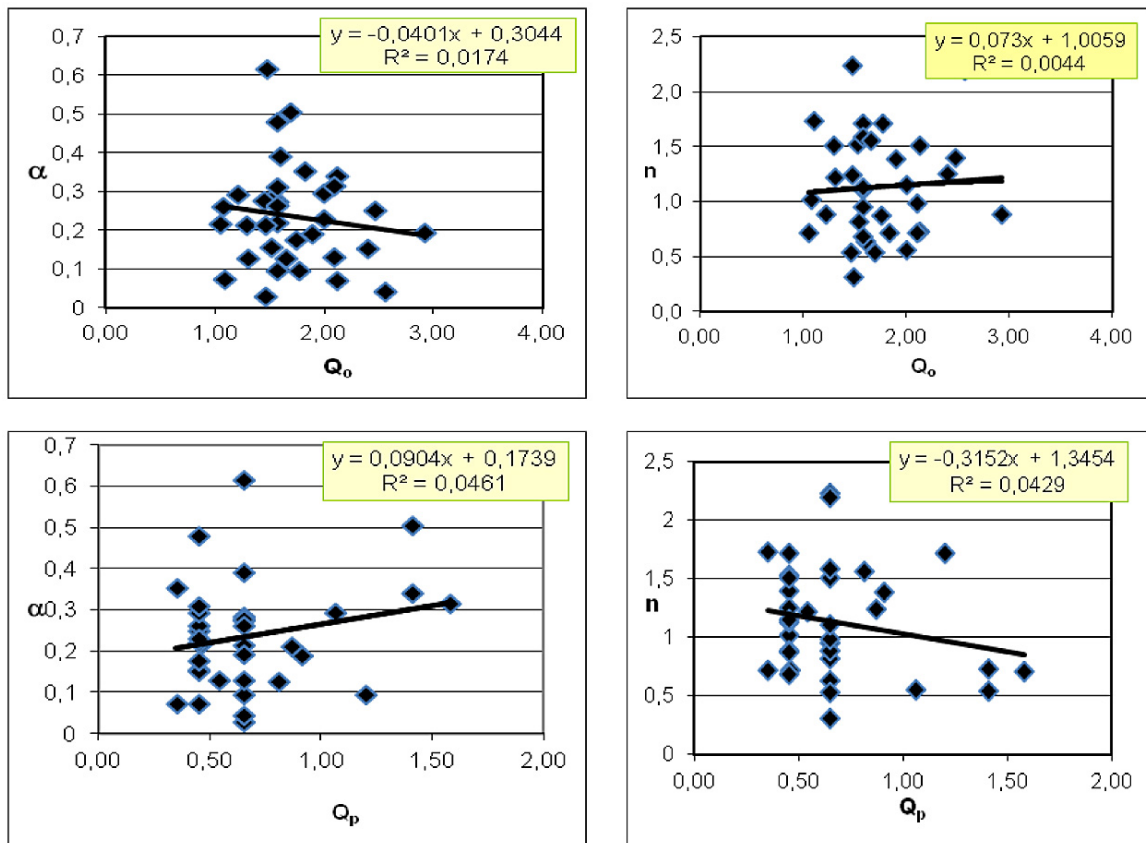
**Tabela 1.** Parametry wybranych krzywych opadania przepływów występujących w analizowanym okresie badań (1997/98 – 1999/2000) w zlewni cieką Hutka**Table 1.** Parameters of flow recession curves selection in the analyzed research period (1997/98 – 1999/2000) in the Hutka catchment area

Lp.	$Q_p$ [l/s/km <sup>2</sup> ]		$Q_o$ [l/s/km <sup>2</sup> ]		$Q_k$ [l/s/km <sup>2</sup> ]		Liczba dni bezopadowych	$\alpha$ [(1/doba) <sup>n</sup> ]	n [-]
	data	$Q_p$	data	$Q_o$	data	$Q_k$			
1	8 XI 1997	0,46	11 XI 1997	1,05	18 XI 1997	0,55	7	0,216152	0,710441
2	30 XI 1997	0,65	3 XII 1997	1,29	6 XII 1997	0,45	3	0,213438	1,509230
3	10 XII 1997	0,54	12 XII 1997	1,31	23 XII 1997	0,31	11	0,127593	1,213647
4	29 XII 1997	0,45	9 I 1998	1,52	15 I 1998	0,31	6	0,155036	1,523624
5	10 II 1998	0,35	16 II 1998	1,10	23 II 1998	0,35	7	0,072974	1,730113
6	26 II 1998	0,45	8 III 1998	2,47	12 III 1998	0,45	4	0,248796	1,396348
7	8 IV 1998	0,45	13 IV 1998	1,08	16 IV 1998	0,48	3	0,259953	1,015711
8	3 V 1998	0,65	5 V 1998	1,60	13 V 1998	0,45	8	0,391416	0,631093
9	31 V 1998	0,65	2 VI 1998	1,58	6 VI 1998	0,65	4	0,272549	0,948815
10	9 VI 1998	1,41	12 VI 1998	2,12	16 VI 1998	0,91	4	0,338919	0,723455
11	9 VII 1998	0,45	14 VII 1998	1,58	17 VII 1998	0,45	3	0,219355	1,710554
12	1 VIII 1998	0,35	3 VIII 1998	1,83	12 VIII 1998	0,45	9	0,35249	0,713891
13	24 VIII 1998	0,65	1 IX 1998	1,54	7 IX 1998	0,45	6	0,283569	0,812012
14	8 IX 1998	0,45	15 IX 1998	2,40	23 IX 1998	0,45	8	0,150262	1,254090
15	9 XI 1998	0,65	12 XI 1998	1,58	16 XI 1998	0,65	4	0,095242	1,584131
16	4 XII 1998	0,65	7 XII 1998	1,48	12 XII 1998	0,65	5	0,615527	0,309037
17	13 XII 1998	0,65	15 XII 1998	2,92	26 XII 1998	0,65	11	0,193040	0,887254
18	2 II 1999	0,65	7 II 1999	1,46	14 II 1999	0,77	7	0,276142	0,531395
19	4 IV 1999	0,81	8 IV 1999	1,65	12 IV 1999	0,77	4	0,124790	1,556153
20	25 IV 1999	1,06	29 IV 1999	2,00	7 V 1999	0,91	8	0,293307	0,553799
21	11 V 1999	1,58	16 V 1999	2,10	21 VI 1999	0,91	5	0,313398	0,709651
22	3 VI 1999	0,65	9 VI 1999	2,10	18 VI 1999	0,45	9	0,130058	0,978941
23	18 VI 1999	0,45	24 VI 1999	1,22	29 VI 1999	0,48	4	0,292639	0,878852
24	12 VII 1999	1,20	14 VII 1999	1,77	20 VII 1999	0,45	6	0,095007	1,710758
25	20 VIII 1999	0,91	22 VIII 1999	1,90	27 VIII 1999	0,45	5	0,188721	1,385413
26	1 XI 1999	0,45	3 XI 1999	1,57	7 XI 1999	0,45	4	0,479019	0,685061
27	7 II 2000	0,65	10 II 2000	1,47	16 II 2000	0,65	6	0,027958	2,231054
28	13 III 2000	1,41	15 III 2000	1,69	24 III 2000	0,45	9	0,504253	0,539511
29	27 III 2000	0,65	30 III 2000	1,58	4 IV 2000	0,40	5	0,261741	1,101040
30	20 V 2000	0,87	22 V 2000	1,47	27 V 2000	0,45	5	0,210944	1,236048
31	15 VI 2000	0,45	16 VI 2000	1,58	21 VI 2000	0,45	5	0,309275	1,124775
32	1 VIII 2000	0,45	5 VIII 2000	2,12	14 VIII 2000	0,45	9	0,070603	1,504008
33	16 VIII 2000	0,45	22 VIII 2000	2,56	28 VIII 2000	0,65	6	0,042009	2,191033
34	15 IX 2000	0,65	18 IX 2000	2,00	24 IX 2000	0,32	6	0,229038	1,151648
35	1 X 2000	0,45	4 X 2000	1,75	10 X 2000	0,91	6	0,175492	0,875896
<b>Średnia</b>	<b>-</b>	<b>0,68</b>	<b>-</b>	<b>1,73</b>	<b>-</b>	<b>0,54</b>	<b>6</b>	<b>0,235163</b>	<b>1,131957</b>

 $Q_p$  – podstawa fali wezbraniowej, $Q_o$  – jednostkowy przepływ początkowy, $Q_k$  – jednostkowy przepływ końcowy, $\alpha$  i  $n$  – obliczone współczynniki. $Q_p$  – high water waves, $Q_o$  – initial flow unit, $Q_k$  – final flow until, $\alpha$  i  $n$  – measured rates.



Rys. 2. Zależności współczynników  $\alpha$  i  $n$  od przepływów początkowych ( $Q_o$ ) i podstaw fali wezbraniowych ( $Q_p$ )  
 Fig. 2.  $\alpha$  and  $n$  rates dependencies from initial flows ( $Q_o$ ) and the whole period of high water waves ( $Q_p$ )



Rys. 3. Związek retencji całkowitej ( $R$ ) z jednostkowym przepływem początkowym ( $Q_o$ )  
 Fig. 3. Relation between overall retention ( $R$ ) and initial flow until ( $Q_o$ )

$\alpha$  i  $n$  nie wykazują regularności (rys. 2). Nie występują znaczące statystyczne zależności parametrów modelu Hortona (dla krzywych opadania przepływów)  $\alpha$  i  $n$  względem przepływów początkowych ( $Q_0$ ) lub podstaw fal wezbraniowych ( $Q_p$ ). Zależności tego typu sugerowali inni badacze [3].

Po obliczeniu retencji całkowitych ( $R_\infty$ ) według wzoru (6), na rysunku 3 zestawiono ich zależności z przepływami początkowymi ( $Q_0$ ). Znaczny „rozrzut” punktów pozwala jedynie na estymację związku liniowego:

$$R_\infty = -0,092 + 0,467 \cdot Q_0 + \varepsilon,$$

gdzie:  $R_\infty$  – retencja całkowita (stan retencji w zlewni) [mm],

$Q_0$  – jednostkowy przepływ początkowy [l/s/km<sup>2</sup>],

$\varepsilon$  – błąd oszacowania.

## PODSUMOWANIE

Podczas prowadzenia badań w różnych porach roku szczegółowej analizie poddano krzywe opadania przepływów wody w cieku Hutka. Dla opisu krzywych opadania przepływów w okresach bezdeszczowych zastosowano metodę Hortona. Równanie wykorzystane w tej metodzie dopasowuje się „dość elastycznie” do analizowanych poszczególnych krzywych opadania. Dotychczas stosowane metody miały charakter graficzno-rachunkowy. W pracy na podstawie otrzymanych wyników badań terenowych opracowano program oraz w pełni analityczną metodę estymacji współczynników równania. Uzyskane aproksymacje obliczonych krzywych opadania okazały się zadowalające dla poszczególnych fal (w zakresie ich opadania) w zlewni cieku Hutka. Obliczone wartości  $\alpha$  i  $n$  dla analizowanych fal wezbraniowych nie wykazały regularności. Próba znalezienia zależności parametrów modelu Hortona dla krzywych opadania przepływów  $\alpha$  i  $n$  względem przepływów początkowych (kulminacji) oraz podstaw fal wezbraniowych nie powiodła się. W konsekwencji obliczony związek między tymi parametrami, dla oceny całkowitej retencji odpływowej zlewni ma charakter jedynie orientacyjny.

## LITERATURA

1. Chałmicki W., Wolski W. 1978. Porównanie i ocena przydatności metod wydzielenia odpływu podziemnego w zlewniach górskich. *Folia Geogr. Ser. Geogr. Phys.* 11, 111–121.
2. Gutry-Korycka M. 1994. Odpływ powierzchniowy jako funkcja retencji podpowierzchniowej. *Przegląd Geofiz.* XXXIX, 4, 359–373.
3. Jokiel P. 1994. Zastosowanie wzorcowej krzywej wysychania do oceny zasobów wodnych wód podziemnych zlewni i ich odnawialności. *Wiadomości IMGW*, t. 17, z. 1, 31–51.
4. Kiciński T. 1962. Krzywe opadania wysychania przepływów. *Zeszyt. Nauk. SGGW, Melioracje Rolne* nr 5.
5. Kosturkiewicz A., Piechocki T. 1979. Krzywa opadania przepływów w okresach bezdeszczowych w małej zlewni nizinnej. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych*, t. XLVIII, 33–38.
6. Kosturkiewicz A., Czopor S., Korytowski M., Stasiak R., Szafranski Cz. 2002. Odpływy i retencja siedlisk leśnych w małych zlewniach. *Rocz. AR Pozn. CCCXLII, Melior. Inż. Środ.* 23, 217–227.
7. Lambor J. 1962. *Metody prognoz hydrologicznych.* WKiŁ, Warszawa.
8. Langbein W.B. 1940. Channel-storage and unit-hydrograph studies. *Am. Geoph. Union Trans.*, 21, Washington.
9. Liberacki D. 2009. Zmienność przepływów w małym cieku leśnym. *Roczniki Ochrony Środowiska*, tom 11, 1201–1211.
10. Liberacki D., Korytowski M. 2010. Zmienność stanów wód gruntowych w wybranych siedliskach leśnych na obszarze Wielkopolski, w latach o różnym przebiegu warunków meteorologicznych. *Współczesne problemy gospodarki wodnej i eksploatacji systemów melioracyjnych. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 548, t. II, 347–358.
11. Stasiak R., Szafranski Cz., Korytowski M., Liberacki D. 2007. Dynamika zmian przepływu w małych ciekach nizinnych. *Międzynarodowa konferencja naukowa ENVIRO 2006, Kraków Dobczyce. Formatio Circumiectus Acta Sci. Pol. S.*, 6(1), 15–25.
12. Wrzesiński D. 1999. Struktura odpływu rzecznoego w dorzeczu Warty na tle sezonowości zjawisk hydroklimatycznych. *PTPN, Poznań*, ss. 155.