



## **KRZYWE CZASU PRZEWYŻSZENIA PRZEPŁYWU W ZLEWNI MAŁEJ WISŁY**

*Stanisław Węglarczyk*  
Politechnika Krakowska

### **FLOW DURATION CURVES IN THE MAŁA WISŁA CATCHMENT**

#### **Streszczenie**

Na podstawie 4 serii czasowych przepływów dobowych z okresu 49 lat w zlewni Małej Wisły przeanalizowano dwie metody tworzenia krzywych czasu przekroczenia przepływu (KCPP): metodę tradycyjną, za pomocą której tworzona jest jedna krzywa na podstawie danych przepływów z całego  $N$ -letniego okresu czasu oraz drugą metodę, polegającą na tworzeniu  $N$  rocznych KCPP, uśrednianych następnie do krzywej średniej. Krzywa ta różni się od krzywej  $N$ -letniej szczególnie w obszarze przepływów minimalnych. W obszarze tym (dla założonych procentowych czasów przekroczenia  $p = 60, 70, 80$  i  $90\%$ ) przepływ o gwarancji przewyższenia  $p$  obliczony na podstawie średniej KCPP jest wyższy od przepływu o gwarancji przewyższenia  $p$  obliczonego na podstawie  $N$ -letniej KCPP od około  $10\%$  dla  $p = 60\%$  do nawet ponad  $20\%$  dla  $p = 90\%$ . Fakt wzrostu i jego wielkość mają znaczenie dla wyboru przepływu granicznego definiującego niżówkę oraz dla planowania poboru wody.

Zastosowanie drugiego podejścia oznacza, że zamiast jednej wartości czasu przewyższenia przepływu,  $p\%$  lub  $365p$  dni, i jednej wartości  $X_p$  przepływu, powstaje  $N$ -elementowy zbiór wartości czasu przewyższenia zadanej wartości przepływu oraz  $N$ -elementowy zbiór wartości przepływu  $X_p$  o danym czasie przewyższenia. Zbiory te wskazują na zmienność zarówno gwarancji przepływu jak i przepływu gwarantowanego. Zmienności te zostały zbadane dla 4 badanych stacji i okazały się znaczne.

**Słowa kluczowe:** krzywa czasu przewyższenia przepływu, wieloletnia krzywa czasu przewyższenia przepływu, średnia roczna krzywa czasu przewyższenia przepływu, Mała Wisła

### Summary

*Basing on four 49-year time series of daily flows in the Mała Wisła catchment, two methods of creating flow duration curves (FDCs) were analysed: a traditional method where one FDC is produced (period-of-record FDC) using all flow from N-year period, and mean annual FDC created as the average of N annual FDCs. The latter FDC differs from the former especially in the area of minim flows. In this area, for assumed exceedance durations  $p = 60, 70, 80$  i  $90\%$ , a  $Q_p$  taken from a mean annual FDC is higher from about  $10\%$  for  $p = 60\%$  to even more than  $20\%$  for  $p = 90\%$ . This increase and its amount are of value for selecting threshold flow when defining drought and for water supply design.*

*The application of the second method implies that instead of a single value of exceedance time,  $p\%$  or  $365p$  days, and a single value of flow  $Q_p$ , an N-element set of exceedance times of a fixed flow value, and an N-element set of flows  $Q_p$  for fixed  $p$  are given. These set exhibit the variability of both the exceedance time and the flows  $Q_p$  for fixed  $p$ . Both variabilities were studied and were shown to be considerable.*

**Key words:** flow duration curve, period-of-record flow duration curve, mean annual flow duration curve, Mała Wisła

### WSTĘP

Krzywa czasu przewyższenia przepływu (KCPP) – ciąg wszystkich ustalonych malejąco przepływów, zwykle dobowych, z pewnego, przeważnie kilkudziesięcioletniego, okresu obserwacji – pokazuje ile czasu w ciągu tego okresu przepływ w danym przekroju wodowskazowym przewyższał daną wartość przepływu lub był jej równy. Krzywa ta nosi w literaturze polskiej wiele nazw: krzywa czasu trwania przepływów (Dębski K., 1970), krzywa sumy czasów trwania przepływów wraz z wyższymi (Lambor J., 1971), wykres sumowanych częstości (lub: częstotliwości) przepływów (Byczkowski A., 1996), krzywa sum czasów trwania przepływów (Stachy J., 2009), czy krzywa sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi (Ozga-Zielińska M. i Brzeziński J., 1997).

Krzywa ta daje ważną z punktu szeregu zastosowań informację o średniej częstości przekraczania w okresie obserwacji zadanej wartości przepływu przez przepływ rzeki w danym jej przekroju wodowskazowym. Częstość ta, wyrażana

w procentach czasu obserwacji, nazywana jest gwarancją (czasową) przepływu, a sam przepływ – przepływem gwarantowanym (Słota H., 1997). Przykładowo, przepływ  $Q_{80\%}$  oznacza wartość (najczęściej przepływu dobowego), która była osiągnięta lub przekraczana w ciągu 80% czasu obserwacji. Jeśli przeliczyć 80% na rok 365-dniowy otrzymujemy liczbę 292 dni i  $Q_{80\%}$  można interpretować jako przepływ osiągnięty lub przekraczany (a więc gwarantowany) przez średnio 292 dni w roku. Gwarancję przepływu można też interpretować jako prawdopodobieństwo przewyższenia danej wartości przepływu w roku i ta interpretacja też jest stosowana w niniejszej pracy.

KCPP jest jedną z najbogatszych informacyjnie metod ukazywania całkowitego zakresu zmienności przepływów – od przepływów niskich do zdarzeń powodziowych (Smakhtin V.U., 2001). Z tego powodu znajduje ona szerokie zastosowanie: przy przyznawaniu pozwoleń na pobór wody lub zrzut ścieków, projektowaniu elektrowni wodnych (Gustard A. i in., 1988), czy przy oszacowaniu przepływu nienaruszalnego (Pyrce R. S., 2004; Witowski A. i in., 2008). Stachý (2009) stwierdza, że krzywe takie są wykorzystywane zarówno w pracach badawczych jak i w planowaniu i projektowaniu wszelkich obiektów związanych z wodą, ale w polskiej praktyce hydrologicznej są rzadko wykorzystywane. Niektóre wartości przepływu brane z KCPP ( $Q_{70\%}$ ,  $Q_{80\%}$  itp.) służą jako wartości progowe przy określaniu okresów niżówkowych (Zelenhasić E. i Salvai A., 1987; Tallaksen L. M. i Hisdal H., 1997; Stahl K., 2001; Fleig A., 2004; Jakubowski W., 2011; Kaznowska E. i Banasik K., 2011; Tallaksen L. M., Stahl K., Wong G., 2011; Tomaszewski E., 2011; Tokarczyk T., 2013). Wiele odniesień do szczegółowych zastosowań KCPP można znaleźć m.in. w pracach V.U. Smakhtina (2001) i R. S. Pyrce'a (2004).

Oprócz opisanego wyżej sposobu konstrukcji KCPP (jedna krzywa dla całego wielolecia) nazywanej przez Stachý (2009) krzywą przeciętną, istnieje jeszcze inny sposób (Vogel R. M. i Fennessey N. M., 1994; Węglarczyk S., 2005). Polega on na utworzeniu KCPP dla każdego roku i, na tej podstawie, na stworzeniu krzywej średnich (która może być interpretowana jako w pewnym stopniu odpowiednik krzywej przeciętnej) lub krzywej median, jak również na utworzeniu krzywych definiujących na zadanym poziomie ufności obszar ufności dla przepływów gwarantowanych. Taka interpretacja KCPP pozwala też na obliczanie okresu powtarzalności dla przepływów gwarantowanych. Dodatkową zaletą tego podejścia jest fakt, że jest ono mniej czułe na długość serii danych, szczególnie w zakresie niskich przepływów (Vogel R. M. i Fennessey N. M., 1994).

Celem niniejszej pracy jest analiza obu tych interpretacji KCPP w zlewni górskiej, jaką jest zlewnia Małej Wisły. Analiza obejmuje utworzenie dla każdego wodowskazu KCPP z wielolecia oraz KCPP dla każdego roku z osobna (KCPP rocznych). Na podstawie krzywych rocznych utworzona zostanie roczna krzywa średnich. Krzywa ta zostanie porównana z wieloletnią KCPP.

Przepływ gwarantowany  $Q_p$  o gwarancji  $p$  odczytany z wieloletniej KCPP jest wartością, która przez część  $p$  okresu obserwacji była osiągnięta lub przekraczana. Wartość gwarancji jest zwykle odnoszona do jednego roku i jest wtedy interpretowana jako średnia część roku wyrażona albo przez  $p$  lub  $p\%$  albo jako  $365p$  dni. Inna interpretacja wielkości  $p$ , to prawdopodobieństwo przekroczenia w ciągu roku wartości  $Q_p - Q_p$  może więc być nazywane kwantylem rzędu  $p$ . W każdym z tych przypadków wartość  $Q_p$  jest liczbą. Jeśli tworzone są roczne KCPP dla okresu  $N$ -letniego, dostajemy  $N$  wartości  $Q_p$ , co oznacza, że  $Q_p$  w tej interpretacji staje się zmienną i to zmienną losową. Analogicznie, jeśli ustalona zostanie wartość  $Q_p$  przepływu, zmienną losową staje się też gwarancja  $p$ . Jest to zasadnicza konsekwencja tego drugiego podejścia. Jest ona jest analizowana i ilustrowana w następnych częściach pracy dla przepływów gwarantowanych o gwarancji 60, 70, 80 i 90%. Wybór tych wartości wynika z faktu, że przepływy o tych gwarancjach są wybierane jako przepływy graniczne niżówek, a ponadto wysokie gwarancje są oczekiwane przy analizie problemów zaopatrzenia w wodę.

**Tabela 1.** Wybrane informacje o badanych serii przepływów dobowych  
**Table 1.** Basic information on the investigated time series

Charakterystyka	Rzeka/wodowskaz			
	Wisła/Wisła	Wisła/Ustroń	Brennica/Górki Wielkie	Wisła/Skoczów
Powierzchnia, km <sup>2</sup> (*)	54,6	107,5	81,8	296,1
Kilometraż wodowskazu (*)	94	86,5	73,9	71,1
NNQ, m <sup>3</sup> /s	0,05	0,12	0,04	0,08
SNQ, m <sup>3</sup> /s	0,164	0,351	0,283	0,672
SSQ, m <sup>3</sup> /s	1,36	2,65	1,89	6,21
WWQ, m <sup>3</sup> /s	62,8	123	249	274
Średni spływ jednostkowy, SSq, l/(s×km <sup>2</sup> )	24,9	24,7	23,1	21,0
$C_v$	1,677	1,468	1,969	1,687
$C_s$	8,18	10,14	24,87	9,03

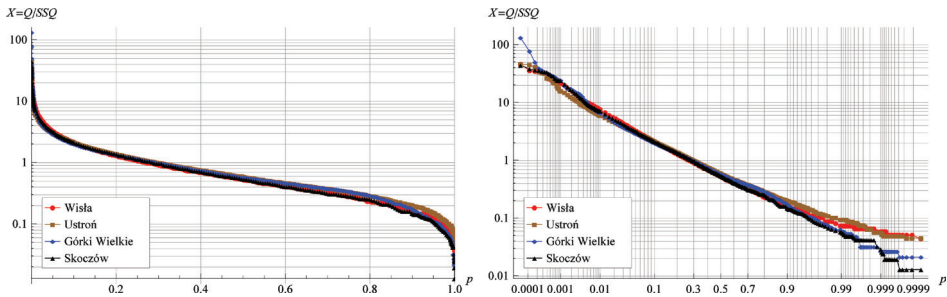
(\*) za: Bojarski A. i in. (2012)

## DANE

Wzięte do analizy dane obejmowały zmierzone przez IMGW przepływy dobowe z okresu od 1.11.1955 r. do 31.10.2004 r. (49 lat hydrologicznych, łącznie 17 898 przepływów), w 4 przekrojach wodowskazowych w zlewni Małej

Wisły: przekroje Wisła, Ustron i Skoczów na Wiśle oraz Górki Wielkie na Brennicy, prawym dopływie Wisły. Powierzchnie zlewni do powyższych przekrojów, kilometrów wodowskazów i niektóre charakterystyki przepływów zamieszczone są w tabeli 1.

Aby móc porównywać krzywe czasu przewyższenia przepływu w analizowanych przekrojach wszystkie przepływy  $Q$  zostały poddane standaryzacji przez podzielenie ich przez ich  $SSQ$  tworząc w ten sposób serie przepływów standaryzowanych  $X$ :  $X = Q/SSQ$ . Każda uszeregowana w kolejności malejącej seria wszystkich standaryzowanych przepływów w danym przekroju wodowskazowym tworzy standaryzowaną KCPP z wielolecia, wszystkie standaryzowane przepływy w kolejnych latach uszeregowane w kolejności malejącej tworzą standaryzowane roczne KCPP. W dalszym ciągu pracy określenie “standaryzowany” jest pomijane i termin “przeptyw” odnosić się będzie do przepływu standaryzowanego.



**Rysunek. 1.** 49-letnie krzywe czasu przewyższenia przepływu (1956-2004) w 4 badanych przekrojach w podziałce półlogarytmicznej i lognormalnej.

**Figure 1.** 49-year FDC curves (1956-2004) for 4 investigated cross-sections in the log-normal and half-logarithmic scales.

## WIELOLETNIE KRZYWE CZASU PRZEWYŻSZENIA PRZEPLYWU

Krzywe czasu przewyższenia przepływu w badanych 4 przekrojach zostały na rys. 1 wykreślone zbiorczo, w podziałce półlogarytmicznej oraz log-normalnej.

Rys. 1 pokazuje wysokie podobieństwo KCPP w przeważającym zakresie prawdopodobieństw przewyższenia. Podobieństwo to jest raczej oczekiwane, ze względu na lokalizację poszczególnych wodowskazów i zamykanych przez nie zlewni. Istniejące różnice dotyczą bardzo małego zakresu najwyższych przepływów, są natomiast wyraźniej widoczne w zakresie niskich przepływów, tj. wysokich prawdopodobieństw przewyższenia, poczynając od około

90%. Jak pokazuje rys. 1, rozchodzenie się krzywych w tym zakresie jest w pewien sposób systematyczne: im niżej z biegiem Wisły znajduje się przekrój wodowskazowy, tym niżej na rysunku leży końcowa część KCPP odpowiadającej temu przekrojowi.

Tabela 2 ilustruje liczbowo podobieństwo i różnice badanych krzywych KCPP w kolejnych przekrojach wodowskazowych. Wartości przedstawionych statystyk są w tych przekrojach bliskie lub bardzo bliskie, może poza statystykami ekstremalnymi, zwłaszcza  $X_{min}$ . Uwagę zwraca prawie identyczność wartości  $X_{max}$  przepływów na trzech wodowskazach na Wiśle kontrastująca z niemal trzykrotnie większą wartością  $X_{max}$  przepływów Brennicy. Być może fakt ten można wytłumaczyć lokalnymi warunkami hydrometeorologicznymi w zlewni Brennicy, innymi niż w jej otoczeniu. Potwierdzenie tego spostrzeżenia można znaleźć w pracy A. Bojarskiego i in. (2012), gdzie autorzy zauważają, że zmienność przepływów Brennicy jest najwyższa w zlewni Małej Wisły zasilającej zbiornik Goczałkowice.

**Tabela 2.** Empiryczne wartości niektórych przepływów gwarantowanych odczytane z wieloletnich KCPP oraz wartości ekstremalne przepływów

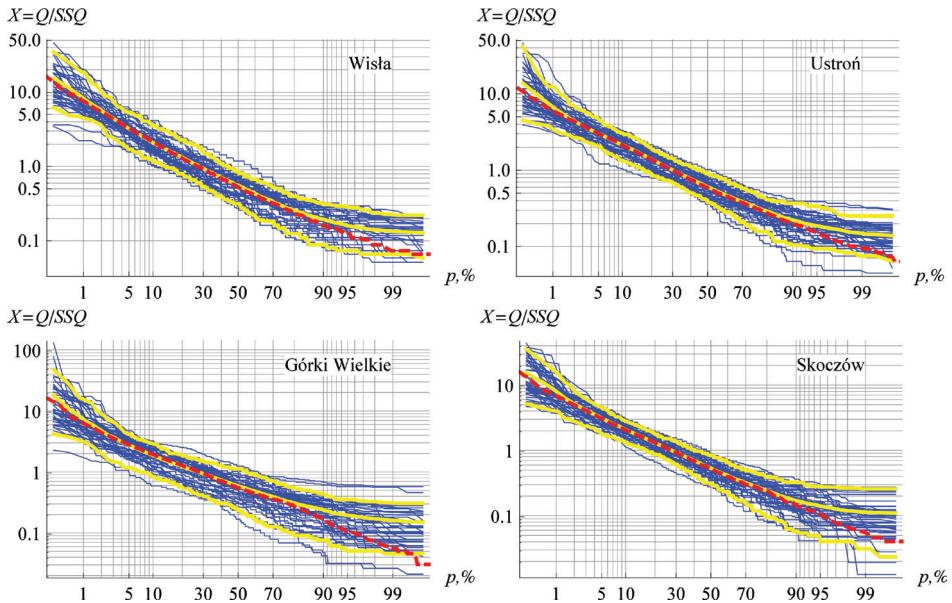
**Table 2.** Empirical values of some period-of-record FDC flows of given exceedance time and extreme flows

Przekrój wodowskazowy	$X_{max}$	$p$											$X_{min}$
		5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	
Wisła/Wisła	46,2	3,24	2,16	1,30	0,91	0,69	0,53	0,41	0,32	0,24	0,16	0,13	0,037
Wisła/Ustroń	46,4	3,05	2,15	1,39	1,00	0,76	0,60	0,47	0,38	0,29	0,20	0,15	0,045
Brennica/Górki Wielkie	131,5	2,91	2,02	1,33	0,97	0,74	0,57	0,45	0,38	0,29	0,17	0,11	0,021
Wisła/Skoczów	44,2	3,19	2,13	1,37	0,97	0,72	0,53	0,40	0,31	0,25	0,15	0,11	0,013

## ROCZNE KRZYWE CZASU PRZEWYŻSZENIA PRZEPIYU

Druga interpretacja KCPP zasada się na tworzeniu KCPP dla każdego roku z  $N$ -letniego okresu z osobna i wykorzystaniu  $N$  takich krzywych do utworzenia średniej KCPP (tj. krzywej średnich) – odpowiednika KCPP z wielolecia – oraz obszaru ufnosci dla przepływów gwarantowanych  $X_p$  (Vogel R. M. i Fennessey N. M., 1994; Węglarczyk S., 2005). Tym razem gwarancja  $p$  nie dotyczy całego okresu pomiarowego, jak w przypadku KCPP z wielolecia, a tylko roku. Rys. 2 ilustruje to podejście dla 4 badanych przekrojów wodowskazowych.





**Rysunek 2.** 49 rocznych KCPP dla badanych wodowskazów (linie niebieskie), ich średnia (środkowa linia żółta) wraz z empirycznymi 90% obszarami ufności dla przepływu  $X_p$  (zewnętrzne linie żółte). Czerwona linia przerywana wyznacza wieloletnią KCPP, zielone punkty – wartości  $X_{60\%}$ ,  $X_{70\%}$ ,  $X_{80\%}$  i  $X_{90\%}$  na tej krzywej.

**Figure 2.** 49 annual FDCs for the investigated cross-sections (blue lines), mean FDC (middle yellow line) and 90% a confidence band for flow  $X_p$  (in between the bottom and top yellow lines). The red dashed line denotes the multiannual FDC, green points denote quantiles  $X_{60\%}$ ,  $X_{70\%}$ ,  $X_{80\%}$  and  $X_{90\%}$ .

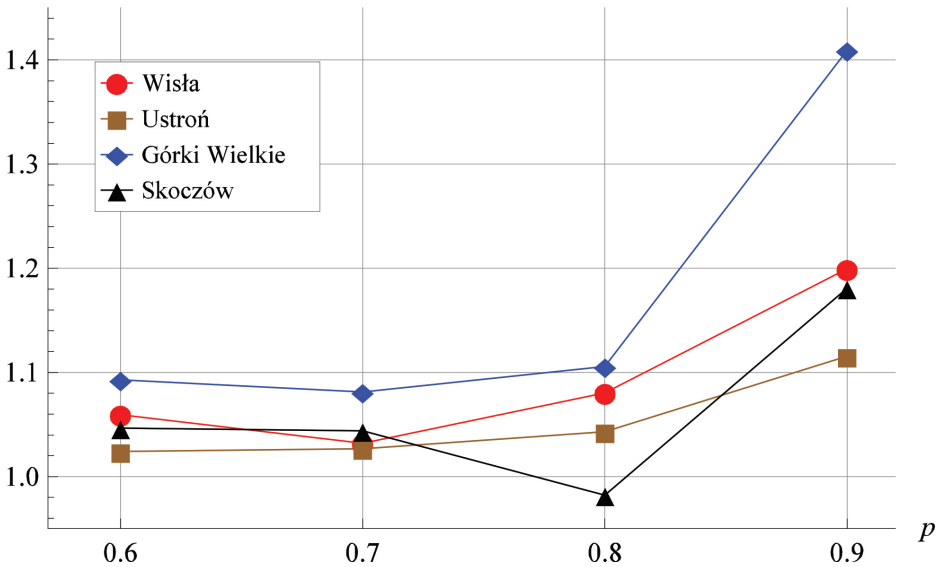
Z punktu widzenia zaopatrzenia w wodę oraz definiowania okresów niżówkowych najważniejszą częścią wieloletniej KCPP jest jej fragment końcowy, o wysokich prawdopodobieństwach przewyższenia (gwarancji). Przy definiowaniu okresów niżówkowych z krzywych tych wybierana jest jedna wartość  $X_{p,w}$  o zadanej wartości  $p$ . Typowe wartości  $p$  to 60, 70, 80 i 90% (np. Zelenhasić E. i Salvai A., 1987; Tallaksen L. M. i Hisdal H., 1997; Stahl K., 2001; Fleig A., 2004; Jakubowski W., 2011; Kaznowska E. i Banasik K., 2011; Tallaksen L. M., Stahl K., Wong G., 2011; Tomaszewski E., 2011; Tokarczyk T., 2013).

Informacja zawarta w rys. 2 umożliwia porównanie wieloletniej KCPP z roczną średnią KCPP. Porównanie to wykazuje wyraźne różnice w niewielkim obszarze najwyższych przepływów i – w znacznie większym zakresie – w obszarze przepływów najniższych. Przyczyna leży w uśrednianiu, co najlepiej można zobaczyć dla przypadku  $X_{min}$  i  $X_{max}$ : wartości te odczytane z wieloletniej

KCPP to odpowiednio  $NNQ/SSQ$  i  $WWQ/SSQ$ , podczas gdy  $X_{min}$  i  $X_{max}$  odczytane z rocznej krzywej średnich to odpowiednio  $SNQ/SSQ$  i  $SWQ/SSQ$ .

Rys. 3 ilustruje te różnice dla wybranych, wspomnianych wyżej, wartości gwarancji  $p$  przepływu pokazując ile razy wartość  $X_{p,r}$  odczytana z rocznej krzywej średnich KCPP jest większa od swojego odpowiednika z krzywej wieloletniej  $X_{p,w}$ . Wzrost wartości  $X_{p,r}$  wynosi ok. 5-10% dla  $p \leq 80\%$  i 10-40% dla przepływów o gwarancji  $p = 90\%$ . Oznacza to przykładowo dla przekroju Wisła i przepływu  $X_{90\%,r}$ , że średni z 49-lecia przepływ o gwarancji 90% jest o 20% wyższy od  $X_{90\%,w}$  z krzywej wieloletniej, albo inaczej, wyrażając powyższy fakt jakościowo, że w tym przypadku krzywa wieloletnia zaniża przeciętną ilość przepływu.

$X_{p,r}/X_{p,w}$



**Rysunek 3.** Stosunek kwantyla  $X_{p,r}$  odczytanego ze średniej rocznej KCPP do kwantyla  $X_{p,w}$  odczytanego z wieloletniej KCPP dla badanych wodowskazów.

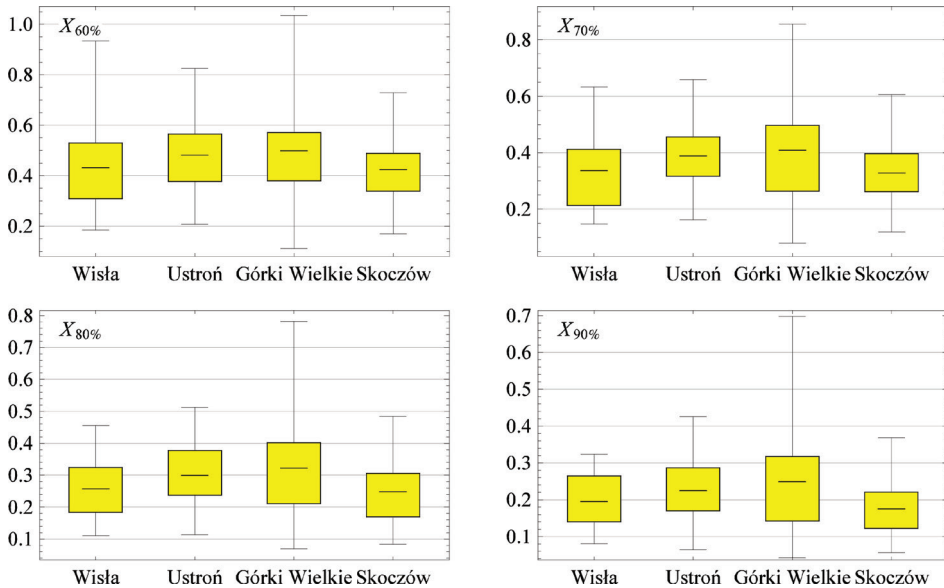
**Figure 3.** Ratio of quantile  $X_{p,r}$  taken from the mean annual FDC to quantile  $X_{p,w}$  taken from the multi-annual FDC for investigated cross-sections.

Kwestię tę należy zbadać bardziej szczegółowo. Na rys. 4 pokazane są schematycznie, za pomocą wykresów “ramka-wąsy”, empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa przepływów (kwantyli)  $X_{p,r}$  dla badanych wodowskazów (*de facto* 5 kwantyli) wraz z przepływem (kwantylem)  $X_{p,w}$  odczytanym z wieloletniej KCPP.



Przedstawione wykresy ilustrują jak dalece zmienne na przestrzeni 49 lat są przepływy  $X_{p,r}$  przewyższane  $p$  procent czasu w ciągu roku w stosunku do przepływu  $X_{p,w}$  przewyższane  $p$  procent czasu w ciągu okresu 49 lat. Z jednej strony wartości  $X_{p,r}$  mogą być nawet 2-3-krotnie wyższe od  $X_{p,w}$ , z drugiej – nawet 2-3-krotnie niższe. W większości przypadków wartość  $X_{p,w}$  leży nieco poniżej mediany rocznych  $p$ -procentowych przepływów  $X_{p,r}$ . Staje się ona znacznie wyraźniejsza dla przepływów 90-procentowych.

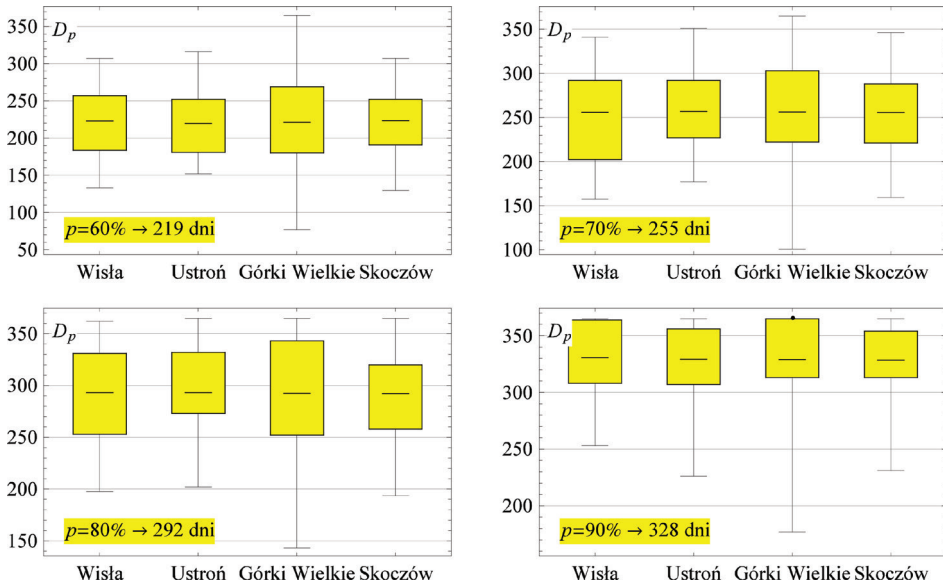
Rys. 4 pokazuje rosnące wartości kwartyla 75% w sekwencji pierwszych trzech wodowskazów; dla Skoczowa kwartyl ten jest zawsze mniejszy od swoich odpowiedników dla pozostałych wodowskazów. Całkowity zakres zmienności kwantyli waha się zależnie od wodowskazu, jednakże wyraźnie największe wahania wykazują przepływy gwarantowane Brennicy w Górkach Wielkich.



**Rysunek 4.** Wykresy “ramka-wąsy” ilustrujące rozkłady prawdopodobieństwa zmiennych losowych  $X_{p,r}$ ,  $p = 60, 70, 80, 90\%$ , tj. przepływów gwarantowanych o gwarancji  $p$  wziętych ze zbioru rocznych KCPP dla badanych wodowskazów. Kolejne poziome linie oznaczają: wartość minimalną, kwantyl 25%, średnia, kwantyl 75%, wartość maksymalną zmiennej  $X_{p,r}$ . Kropka sytuuje wartość kwartyla  $X_{p,w}$  pobranego z wieloletniej KCPP

**Figure 4.** Box-and-whiskers plots of random variables  $X_{p,r}$ ,  $p = 60, 70, 80, 90\%$ , i.e., of the quantiles taken from the annual FDCs, for the investigated cross-sections. The horizontal lines denote from the bottom: the minimum, quantile 25%, mean, quantile 75%, and the maximum of  $X_{p,r}$ . The dot shows the value  $X_{p,w}$  taken from the multi-annual FDC.

Prawdopodobieństwo  $p$  przewyższenia zadanej wartości (gwarancja) przepływu obliczane dla wieloletniej KCPP i odniesione do jednego roku – a taka jest jego najczęstsza interpretacja – jest *de facto* średnim rocznym prawdopodobieństwem  $p_X$  przewyższenia wartości  $X$  przepływu, gdyż jest ilorazem sumy dni z przepływem nie niższym niż  $X$  i całkowitej liczby dni w badanym wieloleciu. Jeśli mianownik w tym ilorazie zostanie zamieniony na liczbę lat wynikiem będzie średnia liczba dni w roku  $D_p$  z przepływem nie niższym niż zadana wartość przepływu  $X$ . Z bardzo dobrym przybliżeniem liczba ta wynosi  $D_p = 365p_X$ . Korzystając z rocznych KCPP można zbadać zmienność  $p_X$  albo, równoważnie, zmienność  $D_p$  dla ustalonej wartości  $X_p$  przepływu. Na rys. 5 pokazano rozkład zmiennej  $D_p$  dla  $X_p = X_{p,w}$ ,  $p = 60, 70, 80$  i  $90\%$ , tj. rozkład liczby dni z przepływem nie mniejszym od wartości  $X_{p,w}$  odczytanej z wieloletniej krzywej czasu przewyższenia przepływu dla ustalonej wartości  $p$  czasu przewyższenia.



**Rysunek 5.** Wykresy “ramka-wąsy” ilustrujące rozkład liczby  $D_p$  dni z przepływem nie niższym niż wartość  $X_{p,w}$ ,  $p = 60, 70, 80, 90\%$ , przepływu odczytanego z wieloletniej KCPP dla badanych wodowskazów. Kolejne poziome linie oznaczają: wartość minimalną, kwantyl 25%, średnia, kwantyl 75%, wartość maksymalną. Kropka sytuje wartość całkowitą iloczynu  $365p$  podaną po lewej u dołu.

**Figure 5.** Box-and-whiskers plots of the number  $D_p$  of days with flow rate not less than the value  $X_{p,w}$ ,  $p = 60, 70, 80, 90\%$ , taken from the multi-annual FDC, for the investigated cross-sections. The horizontal lines denote from the bottom: minimum, quantile 25%, mean, quantile 75% and maximum. The dot shows the integer of  $365p$  given on bottom left.

Rys. 5 pokazuje ile czasu  $D_p$  w ciągu roku przepływ  $X$  przekracza daną wartość  $X_{p,w}$  i jak dalece czas  $D_p$  jest zmienny. Jego średnia jest zgodna z  $365p$ , 50% wartości  $D_p$  waha się od ok. 50 dni do prawie 100 dni. Nie widać jakiegoś wyraźnego wzorca zmian, czy ze względu na zmianę wodowskazu, czy zmianę  $p$ .

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie 4 serii czasowych przepływów dobowych z okresu 49 lat w zlewni Małej Wisły zbadano dwa podejścia do tworzenia krzywych czasu przekroczenia przepływu (KCPP): podejście tradycyjne, w którym tworzona jest jedna krzywa na podstawie danych przepływów z całego  $N$ -letniego okresu czasu z podejściem, w którym tworzy się  $N$  rocznych KCPP i te dopiero są podstawą dalszej analizy. Obejmuje ona przede wszystkim tworzenie krzywej średniej. Krzywa ta różni się od krzywej  $N$ -letniej w obszarze przepływów maksymalnych oraz, jeszcze bardziej, w obszarze przepływów minimalnych. Według podejścia drugiego średni przepływ o gwarancji przewyższenia  $p$  jest w obszarze przepływów minimalnych wyższy od przepływu o gwarancji przewyższenia  $p$  obliczonego na podstawie  $N$ -letniej KCPP. Dla założonych  $p = 60, 70, 80$  i  $90\%$  wzrost ten wynosi od ok.  $10\%$  dla  $p = 60\%$  do nawet ponad  $20\%$  dla  $p = 90\%$ . Fakt wzrostu i jego wielkość mają oczywiste znaczenie dla wyboru przepływu granicznego definiującego niżówkę oraz dla planowania poboru wody.

Zastosowanie drugiego podejścia oznacza, że zamiast jednej wartości,  $p\%$  lub  $365p$  dni, czasu przewyższenia przepływu (czyli jednej gwarancji) i jednej wartości  $X_p$  przepływu, powstaje  $N$ -elementowy zbiór wartości czasu przewyższenia (czyli gwarancji) zadanej wartości przepływu oraz  $N$ -elementowy zbiór wartości przepływu  $X_p$  o zadany czasie przewyższenia. Zbiory te wskazują na zmienność zarówno gwarancji przepływu jak i przepływu gwarantowanego. Zmienności te zostały dla 4 badanych stacji zbadane i okazały się znaczne.

Praca została wykonana w ramach tematu Ś-1/378/2013/DS *Wpływ czynników antropogennych na ilościowe i jakościowe właściwości procesów hydrologicznych w zlewni, zadanie 3: Analiza własności niżówek w obszarze karpacim zlewni Górnej Wisły.*

## LITERATURA

Bojarski A., Gręplowska Z., Nachlik E. (red.) (2012). *Zbiornik Goczałkowice. Analiza przyczynowo-skutkowa DPSIR procesów i zjawisk istotnych z punktu widzenia zarządzania zbiornikiem zaporowym*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, monografia nr 420, seria „Inżynieria Środowiska”.

- Byczkowski A. (1996). *Hydrologia, t. I*, Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Dębski K. (1970). *Hydrologia*, Warszawa: Arkady.
- Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J.M. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*. Institute of Hydrology, Report No. 108, 88 s.
- Jakubowski W. (2011). Rozkłady prawdopodobieństwa w ocenie suszy hydrologicznej, Wrocław: Uniwersytet Przyrodniczy, 177 s.
- Kaznowska E., Banasik K. (2011). Streamflow droughts and probability of their occurrence in a small agricultural catchment, *Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, Land Reclam.* 43 (1), 57-69
- Lambor J., 1971, *Hydrologia inżynierska*, Arkady, Warszawa.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. (1997). *Hydrologia stosowana*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, wyd.II, zmienione.
- Pyrcce, R.S. (2004). *Hydrological Low Flow Indices and their Uses*. WSC Report No.04-2004. Watershed Science Centre, Peterborough, Ontario, 33 p.
- Słota H. (1997). *Zarządzanie systemami gospodarki wodnej*, Warszawa: IMGW.
- Smakhtin V.U. (2001). Low flow hydrology: a review, *Journal of Hydrology*, 240, 147–186.
- Stachý, J. (2009). Krzywe sum czasów trwania codziennych przepływów, *Gospodarka Wodna*, 9, 368-373
- Stahl K. (2001). Hydrological Drought – a Study across Europe, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., Freiburg, 129 s.
- Tallaksen L. M., Hisdal H. (1997). *Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume*, FRIEND '91 — Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management IAI, (Proceedings of the Postojna, Slovenia, Conference, September-October 1997). IAHS Publ. no. 246
- Tallaksen, L. M., Stahl, K., Wong, G. (2011). Space-time characteristics of large-scale droughts in Europe derived from streamflow observations and WATCH multi-model simulations, WATCH Technical Report Number 48, 20 s.
- Tokarczyk T. (2013). Classification of low flow and hydrological drought for a river basin, *Acta Geophysica* 61(2), 404-421
- Tomaszewski E. (2011). Defining the threshold level of hydrological drought in lake catchments, *Limnological Review* 11(2), 81-88
- Vogel, R.M., Fennessey, N.M. (1994). Flow duration curves. I. A new interpretation and confidence intervals. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 120 (4), 485–504.
- Węglarczyk S. (2005). Probabilistyczna interpretacja krzywej czasu przewyższenia przepływu, *Wiadomości IMGW*, tom XXVIII (XLIX), s. 51-63
- Witowski K., Filipkowski A., Gromiec M. J. (2008). *Obliczanie przepływu nienaruszalnego: poradnik*, Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, wyd. II rozszerzone, 123 s.
- Zelenhasić E. Salvai A. (1987). A Method of Streamflow Drought Analysis, *Water Resour. Res.*, 23(1), 156–168

Prof. dr hab. Stanisław Węglarczyk  
Politechnika Krakowska  
Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków  
e-mail: [sweglarc@iigw.pl](mailto:sweglarc@iigw.pl)