



## Wieloletnie zmiany przepływów Wisły i Bugu (1951–2015)

### *Long-term (1951–2015) changes in runoff along Poland's Rivers Vistula and Bug*

Marek Górnik

Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej  
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków  
marek4891@poczta.fm

**Zarys treści.** Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie wieloletniej (1951–2015) zmienności przepływów średnich, maksymalnych i minimalnych rocznych i półrocznych oraz przepływów średnich miesięcznych Wisły (Tczew, Zawichost) i Bugu (Wyszków). Z wykorzystaniem testu Manna-Kendalla przeprowadzono wielowariantową analizę, na podstawie której określono kierunek, istotność i siłę trendów przepływów oraz wskazano okresy, w których doszło do zmiany kierunku trendów. W badanym okresie do zmiany takiej doszło dwukrotnie (ok. 1965 i 1980 r.). W przypadku przepływów maksymalnych stwierdzono przewagę tendencji malejących, a w przypadku przepływów minimalnych tendencji rosnących.

**Słowa kluczowe:** hydrologia, przepływy rzek, test Manna-Kendalla, wielowariantowa analiza trendów, dorzecze Wisły, zlewisko Morza Bałtyckiego

### Wstęp

Dorzecze Wisły obejmuje ponad połowę terytorium Polski (54%), przy czym ok. 13% znajduje się poza granicami kraju (Słowacja, Ukraina, Białoruś). Mimo że Wisła pod względem długości jest 11 rzeką w Europie (1047 km), to w skali zlewiska Morza Bałtyckiego zajmuje pierwsze miejsce pod względem długości i powierzchni dorzecza. W przypadku średniego odpływu rocznego plasuje się na drugim miejscu, za Nową (Pociask-Karteczka, 2017). Wskaźnik odpływu w dorzeczu Wisły wynosi ok. 175 mm, co czyni Polskę jednym z najuboższych pod względem zasobów wodnych krajów w Europie (Jokiel i Stanisławczyk, 2012). Ponadto, ze względu na położenie Polski w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego, wskaźnik ten jest bardzo zróżnicowany w czasie (Fal, 1993). Takie warunki hydrologiczne powodują, że zdefiniowanie wielkości i dynamiki zasobów wodnych w części kraju, w której znajdują się największe aglomeracje oraz zlokalizowane są najważniejsze ośrodki przemysłowe – a takim obszarem jest dorzecze Wisły – jest niezmiernie ważne.

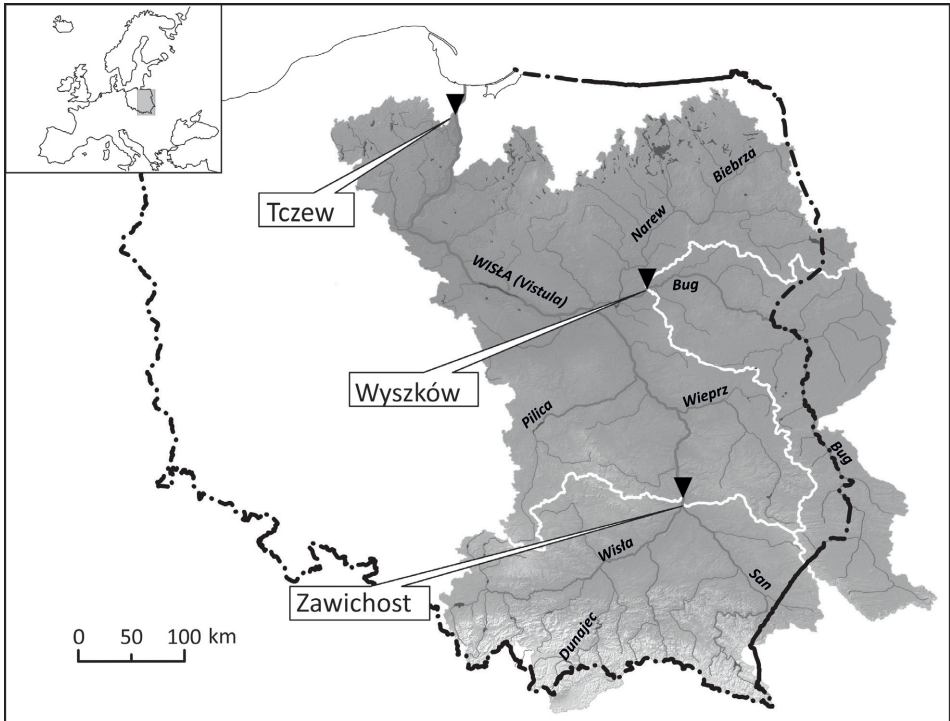
Dotychczasowe wyniki badań nad wieloletnimi zmianami odpływu rzek w Polsce nie pozwalają na jednoznaczne wyciągnięcie wniosków dotyczących czasowej zmienności odpływu. Analizy prowadzone przez J. Stachy'ego (1968, 1969, 1970, 1984a, 1984b) w odniesieniu m.in. do Wisły i Odry wykazały tendencje malejące odpływu w latach 1901–1965 i tendencje rosnące w latach 1971–1980. Wzrost przepływów Wisły i Odry w latach 1901–1980 potwierdził P. Jokiel i K. Kożuchowski (1989). Dla Wisły na posterunku w Tczewie wynik był istotny statystycznie, jednak wydłużenie serii przepływów o 10 lat (1901–1990) spowodowało brak istotności statystycznej trendu (Fal, 1993). Badania prowadzone w latach 1901–2000 wykazały brak stałej tendencji w przepływach Wisły na tym posterunku (Fal i Bogdanowicz, 2002). Zmiany przepływów rzek w drugiej połowie XX w. analizował m.in. A. Bartnik i P. Jokiel (1997), P. Jokiel i A. Bartnik (2001), D. Wrześniński (2009), D. Wrześniński i L. Sobkowiak (2018) oraz M. Piniewski i inni (2018). Autorzy stwierdzili brak stałej tendencji przepływu rzek oraz wskazali na nagłą zmianę w przepływach (spadek przepływów) w latach 70. i 80. XX w.

Przyczyn okresowych zmian w tendencjach przepływów nie udało się jednoznacznie wyjaśnić. Jako główną zmienną podaje się zmiany opadów i temperatury powietrza związane ze zmianami cyrkulacji powietrza, zwłaszcza Oscylacji Północnoatlantyckiej (Pociask-Karteczka i inni, 2002–2003; Styszyńska i Tamulewicz, 2005; Pociask-Karteczka, 2006; Wrześniński, 2011; Wrześniński i Paluszkiwicz, 2011) oraz wiążącą się z nią cyrkulacją termohalinową w obrębie północnego Atlantyku (Marsz i inni, 2016).

Celem opracowania jest analiza wieloletnich zmian przepływów w dorzeczu Wisły z uwzględnieniem dwóch zlewni cząstkowych wpływających w największym stopniu na odpływ całkowity z dorzecza Wisły (po Tczew). Są to: zlewnia Wisły po ujście Sanu (posterunek Zawichost) oraz zlewnia Bugu (posterunek Wyszaków).

## Obszar badań

Dorzecze Wisły zajmuje powierzchnię 193,9 tys. km<sup>2</sup> (po posterunek Tczew), przy czym na obszarze Polski znajduje się 168,8 tys. km<sup>2</sup>. Do największych dopływów należą: prawobrzeżne: San (16 877 km<sup>2</sup>) oraz Narew (74 527 km<sup>2</sup>) i lewobrzeżne: Pilica (9258 km<sup>2</sup>) i Bzura (7764 km<sup>2</sup>) (Pociask-Karteczka, 2017). Bug jest lewobrzeżnym dopływem Narwi, a jego zlewnia zajmuje powierzchnię 39 420 km<sup>2</sup>, tj. 2,34 razy więcej niż dorzecze Sanu. Dorzecze Wisły jest bardzo zróżnicowane pod względem fizycznogeograficznym. Położone jest w obrębie pięciu prowincji: Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem Zachodnim i Północnym, Karpaty Wschodnie z Podkarpaciem Wschodnim, Wyżyny Polskie, Niż Środkowoeuropejski i Niż Wschodniobałtycko-Białoruski (Kondracki, 2002). Analizie poddano przepływy na dwóch posterunkach hydrologicznych na Wiśle, tj. w Zawichoście i Tczewie oraz na jednym posterunku na Bugu w Wyszakowie (ryc. 1).



**Ryc. 1.** Obszar badań z lokalizacją posterunków hydrologicznych

*The research area with the locations of water level gauges shown*

Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny i tabela / *Author's own elaboration, like remaining figures and table.*

Posterunek Zawichost zamyka najzasobniejszą w wodę górną część dorzecza Wisły. Obejmuje ono Karpaty, kotliny podkarpackie i wyżyny południowopolskie. Odpływ całkowity z tego obszaru stanowi 41% całkowitego odpływu z dorzecza Wisły przy zaledwie 26% udziale w powierzchni całkowitej dorzecza Wisły. Odpływ z dorzecza Bugu, którego powierzchnia stanowi 20% całkowitej powierzchni dorzecza Wisły, stanowi zaledwie 15% odpływu Wisły w Tczewie (tab. 1). Tak duże dysproporcje w udziale odpływu wynikają głównie ze zróżnicowanej ilości opadów oraz możliwości retencyjnych zlewni. Obszary te mają odmienne typy reżimów hydrologicznych: 1) w obrębie dorzecza Bugu jest to reżim niwalny słabo i średnio wykształcony o udziale zasilania podziemnego od 40 do 60%, 2) w zlewni górnej Wisły nad reżimem pluwialno-niwalnym i niwalnym o różnym stopniu wykształcenia przeważa reżim niwalno-pluwialny. Wielkość zasilania podziemnego jest bardzo zróżnicowana i wynosi od ok. 40 do powyżej 60% (Dynowska, 1971, 1994; Wrzesiński, 2017).

**Tabela 1.** Wybrane charakterystyki analizowanych zlewni (dane o odpływie z lat 1951–2015)  
*Selected characteristics of the catchments analysed (data for 1951–2015 river runoff)*

Rzeka – posterunek wodowskazowy <i>River – water gauge</i>	Powierzchnia <i>Area</i>		Średnia wysokość <i>Mean altitude</i>	Średni spadek zlewni <i>Mean catchment slope</i>	SSQ	Warstwa odpływu <i>Runoff</i>	Udział przepływu Wisły w Tczewie <i>Share of the Vistula runoff at the Tczew gauge</i>
	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[m n.p.m.]	[°]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[mm]	[%]
Wisła – Tczew	193 727	100	206	1	1044	170	100
Wisła – Zawichost	50 621	26	355	4	426	266	41
Bug – Wyszków	38 348	20	176	2	154	127	15

## Materiały i metodyka badań

W opracowaniu wykorzystano dane dobowe o przepływach rzek pochodzące z sieci obserwacyjno-pomiarowej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Analizie poddano przepływy średnie, maksymalne i minimalne roczne i półroczne oraz przepływy średnie miesięczne z dwóch posterunków hydrometrycznych na Wiśle (Zawichost i Tczew) i jednego na Bugu (Wyszków) (tab. 1) w latach 1951–2015. Średnią wysokość oraz spadek analizowanych zlewni obliczono na podstawie numerycznego modelu terenu SRTM 3 o rozdzielczości 3 sekund (90 x 90 m) opracowanego przez agencje kosmiczne Stanów Zjednoczonych (NASA), Niemiec (DLR) oraz Włoch (ASI; [www: dds.cr.usgs.gov/srtm/](http://www.dds.cr.usgs.gov/srtm/)).

Do prześledzenia zmian w tendencjach przepływu rzek wykorzystano nieparametryczny test Manna-Kendalla (Mann, 1945; Kendall, 1975), który jest powszechnie stosowany w analizach hydrologicznych (Węglarczyk, 2010). Statystykę  $Z$  Manna-Kendalla oraz współczynnik kierunkowy  $\beta$  wyrażony estymatorem Theil-Sena (Theil, 1950; Sen, 1968) obliczono dla okresów obejmujących każdą możliwą kombinację roku początkowego i końcowego dla badanego wielolecia. Za minimalną długość okresu obliczeniowego przyjęto okres 20-letni za J. Hannafordem i jego zespołem (2013). Takie podejście w analizie hydrologicznych ciągów długookresowych zastosowali m.in. G. J. McCabe i D.M. Wolock (2002), J. Hannaford i inni (2013), V. Ruiz-Villanueva i inni (2014, 2016).

Statystykę  $S$  Manna-Kendalla obliczono korzystając ze wzoru:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{gdy } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{gdy } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$x_j$  i  $x_i$  – wartości zmiennej w poszczególnych latach  $j$  i  $i$ , gdzie  $j > i$ ,  
 $n$  – liczebność ciągu (liczba lat).

Statystyka  $S$  wykazuje tendencje do szybkiego dążenia do normalności, i dla  $n > 10$  statystyka ta ma w przybliżeniu rozkład normalny ze średnią 0 i wariancją opisaną wzorem:

$$\operatorname{Var}(S) = n(n-1)(2n+5) / 18 \quad (3)$$

Dla powtarzających się danych stosuje się poprawkę:

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} - \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (4)$$

gdzie:

$t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  jest liczbą grup o  $k$  powtarzających się elementach;  
 $n$  – liczebność ciągu.

Znormalizowaną statystykę testową  $Z$  obliczono korzystając ze wzoru:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{gdy } S > 0 \\ 0 & \text{gdy } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{gdy } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

W przypadku, gdy wartość znormalizowanej statystyki testowej  $Z$  przyjmuje wartości dodatnie, trend jest rosnący, natomiast gdy wartości są ujemne – trend jest malejący. Jeżeli obliczone prawdopodobieństwo dla znormalizowanej statystyki testowej  $Z$  jest mniejsze od przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , to analizowany trend jest istotny statystycznie.

Współczynnik kierunkowy  $\beta$  wyrażony estymatorem Theil-Sena ( $\beta$ ) obliczono ze wzoru:

$$\theta = \text{med} \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (6)$$

gdzie:

$X_j$  i  $X_i$  – wartości zmiennej w poszczególnych latach  $j$  i  $i$ , gdzie  $j > i$ .

Do usunięcia autokorelacji z ciągów hydrologicznych wykorzystano metodę TFPW (Yue i inni, 2002). Obliczenia i graficzną prezentację wyników wykonano z wykorzystaniem oprogramowania Microsoft Excel 2010, CorelDRAW 12 oraz QGIS 2.18.

## Wyniki

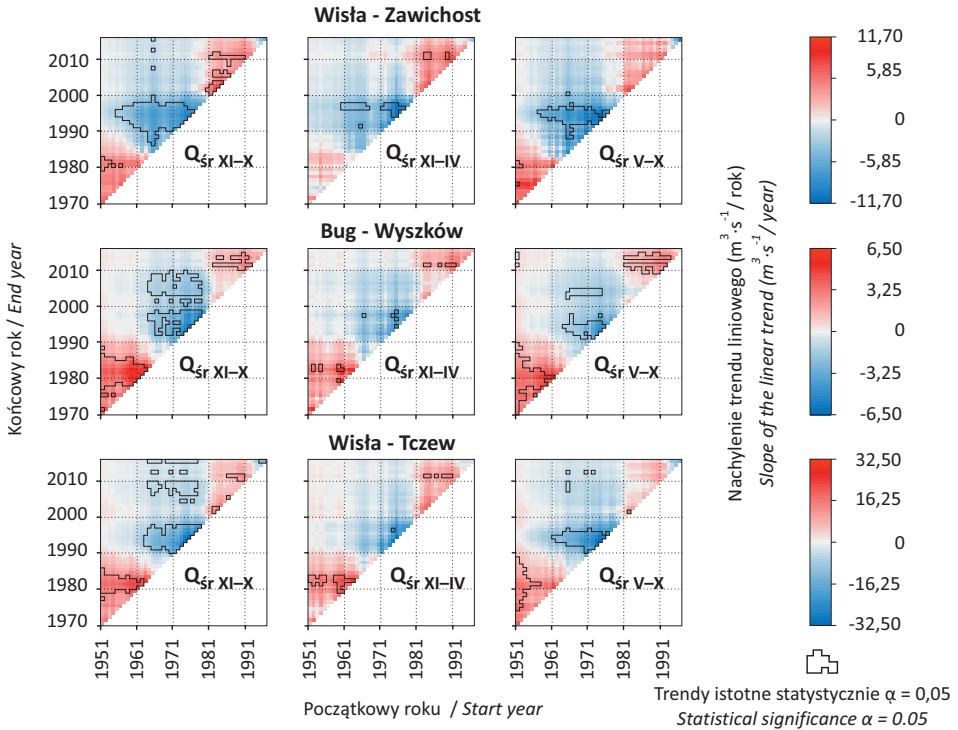
### Przeptywy średnie

Na podstawie wielowariantowej analizie trendów w seriach średnich przepływów rocznych i półrocznych Wisły i Bugu ukazano wyraźne podokresy z tendencjami rosnącymi i malejącymi, co świadczy o występowaniu fluktuacji przepływów. Od lat 50. do końca lat 90. XX w. dominowały trendy rosnące, najsilniejsze na przełomie lat 70. i 80. XX w. (ryc. 2). Najsilniejsze i obejmujące najdłuższy okres trendy zaznaczają się w przepływach średnich rocznych Bugu, a najłabsze – w przepływach średnich półrocza zimowego Wisły w Zawichoście. Kolejny okres, tym razem z trendami malejącymi, rozpoczął się w drugiej połowie lat 60. i trwał do drugiej połowy lat 90. XX w. z bardzo silnymi tendencjami malejącymi w latach 90. Spadki przepływu najwyraźniej są widoczne w przypadku przepływów średnich rocznych, a najłabiej – w przypadku średnich przepływów półrocza zimowego. Trzeci okres – z dominującymi tendencjami rosnącymi rozpoczął się na początku lat 80. XX w. i trwał do końca analizowanego okresu, tj. do 2015 r., przy czym po 2010 r. pojawiły się trendy malejące.

Najmniej trendów istotnych statystycznie stwierdzono w odniesieniu do średnich przepływów półrocza zimowego. Zaznacza się duże podobieństwo kierunków dominujących tendencji dla trzech badanych posterunków. Różnice odnoszą się głównie do siły obliczonych trendów. Najsilniejsze trendy wystąpiły w stosunkowo krótkich podokresach: w latach 1960–1980 – rosnące, natomiast w latach 1970–1995 – malejące.

Na podkreślenie zasługuje brak trendów lub występowanie trendów o bardzo niewielkim nachyleniu w średnich przepływach rocznych i półrocznych hydrologicznych w okresie 1951–2015 (ryc. 2).

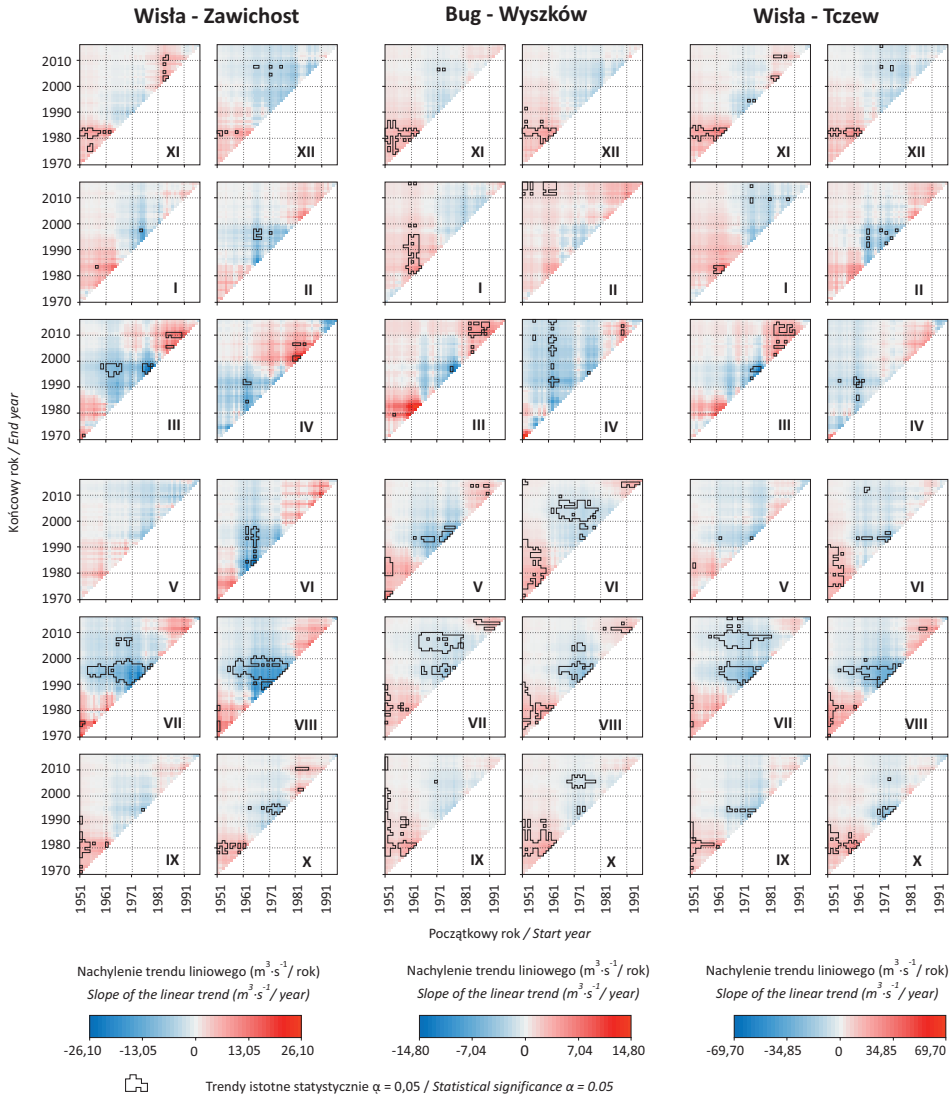
Wyniki analizy średnich wartości rocznych i półrocznych odpływu nie pozwalają na wykrycie ewentualnych zmian, jakie zachodzą w odniesieniu do wartości średnich z krótkiego okresu, np. miesiąca. Toteż analizie poddano również prze-



**Ryc. 2.** Kierunek, siła i istotność w seriach średnich przepływów rocznych i półrocznych Wisły (Zawichost, Tczew) i Bugu (Wyszaków)  
*Direction, strength and significance in a series of mean annual and semi-annual flows along the Vistula (Zawichost and Tczew) and Bug (Wyszaków)*

prępy średnie miesięczne, co pozwoliło uszczegółowić analizę zmian przepływów do struktury odpływu w ciągu roku w ujęciu wieloletnim. Stwierdzono – podobnie jak w przepływach rocznych i półrocznych – fluktuacje średnich przepływów miesięcznych, co objawia się m.in. zmianą znaku trendu (ryc. 3).

Zmianie podlegał nie tylko kierunek, ale również siła poszczególnych trendów, przy czym na analizowanych posterunkach wykazywała ona duże zróżnicowanie w przypadku poszczególnych miesięcy. Można jednak wyróżnić okres z dominującymi tendencjami rosnącymi do lat 80. i 90. XX w. Wyjątki stanowią Zawichost i Tczew (Wisła), gdzie w kwietniu przeważają trendy malejące do końca lat 90. XX w. Spośród analizowanych miesięcy najwyraźniej wyróżnia się luty i kwiecień w Wyszakowie na Bugu. W przypadku lutego obserwuje się bardzo wyraźną przewagę trendów dodatnich, natomiast dla kwietnia – trendy ujemne, lecz większość z nich jest nieistotna statystycznie. Warto zauważyć, że w przypadku Wisły, w Zawichoście w maju wszystkie analizowane trendy są nieistotne statystycznie, co świadczy o stabilności odpływu w tym miesiącu.

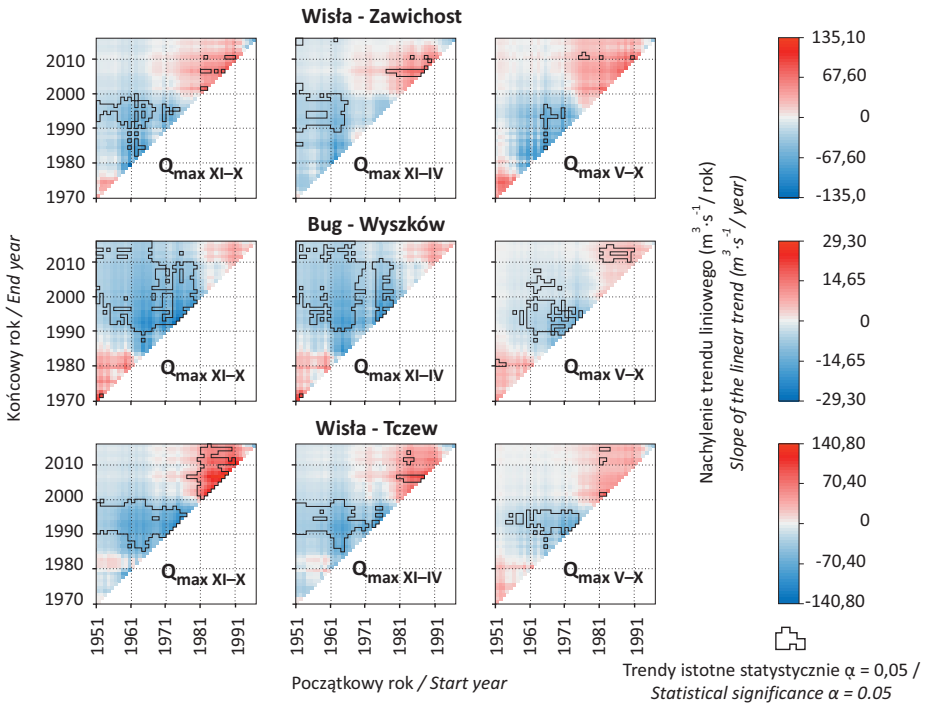


**Ryc. 3.** Kierunek, siła i istotność w seriach średnich przepływów miesięcznych Wiśły (Zawichost, Tczew) i Bugu (Wyszaków)  
*Direction, strength and significance in a series of mean monthly flows along the Vistula (Zawichost and Tczew) and Bug (Wyszaków)*

### Przepływy maksymalne

Na podstawie analizy przepływów maksymalnych rocznych Wiśły i Bugu stwierdzono, że na badanych posterunkach występują różnice w tendencjach przepływów. Dotyczy one zarówno kierunku, siły, jak i istotności poszczególnych trendów





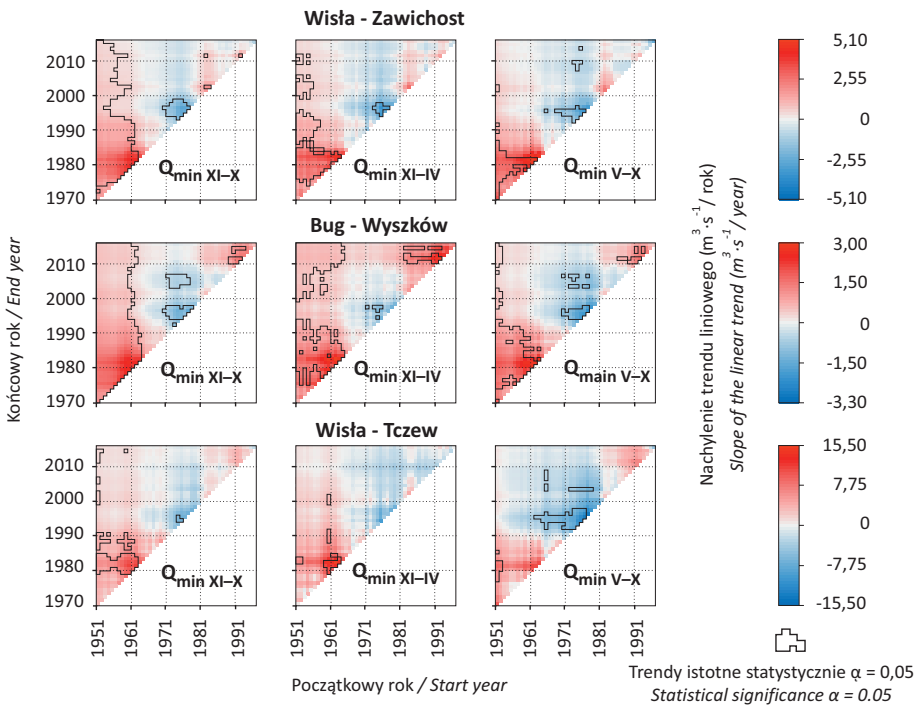
**Ryc. 4.** Kierunek, siła i istotność w seriach przepływów maksymalnych rocznych i półrocznych Wisły (Zawichost, Tczew) i Bugu (Wyszaków)  
*Direction, strength and significance in a series of maximum annual and semi-annual flows along the Vistula (Zawichost and Tczew) and Bug (Wyszaków)*

(ryc. 4). W porównaniu z przepływami średnimi, obserwuje się większe różnice pomiędzy okresami w których nastąpiło odwrócenie trendu.

Poczynając od lat 50., a kończąc na latach 70 i 80. XX w. w większości badanych serii przeważają trendy rosnące (wyjątkiem jest Wisła w Zawichoście). Wraz z wydłużeniem ciągu, trendy rosnące ustępują miejsce trendom malejącym. Te zaś największe nachylenie osiągają w latach 90., po czym zaczynają słabnąć. Kolejny okres, tym razem z dominującymi trendami malejącymi, rozpoczyna się mniej więcej od lat 60. i trwa do drugiej połowy lat 90. XX w. Trzeci okres rozpoczynający się na początku lat 80. i trwający do końca badanego wielolecia, charakteryzuje się w większości przypadków trendami rosnącymi, przy czym najwięcej trendów istotnych statystycznie odnosi się do przepływów maksymalnych rocznych Wisły w Tczewie. Można stwierdzić, że w omawianym okresie w przepływach maksymalnych Bugu, zarówno rocznych jak i półrocza zimowego, występują trendy malejące istotne statystycznie. W półroczu zimowym liczba i siła trendów są większe niż w półroczu letnim.

## Przepływy minimalne

Kierunek i siła analizowanych trendów przepływów minimalnych rocznych Wisły i Bugu w latach 1951–2015 są – podobnie jak w przypadku przepływów średnich i maksymalnych – bardzo zróżnicowane. W przypadku przepływu minimalnego rocznego, do lat 80. XX w., trendy rosnące są coraz silniejsze, przy czym na Wiśle w Zawichoście i Bugu w Wyszkowie przeważają trendy istotne statystycznie (ryc. 5). Wraz z wydłużaniem się ciągu hydrologicznego o kolejne lata, po 1980 r., trendy, pomimo że są rosnące, zaczynają słabnąć. Szczególnie widoczne jest to w przypadku przepływów Wisły w Tczewie w półroczu letnim. Okresy te kończą się między 2000 a 2010 r. W następnym okresie ponownie zaczynają przybierać na sile trendy rosnące z wyjątkiem Wisły w Zawichoście. Najmniej istotnych statystycznie trendów stwierdzono w seriach przepływów minimalnych półrocza letniego oraz na Wiśle na posterunku w Tczewie. Na uwagę zasługuje fakt, że pomimo zmian trendów w poszczególnych okresach, badane wielolecie charakteryzuje się trendem rosnącym. Wyjątek stanowią przepływy minimalne półrocza letniego Wisły w Tczewie.



**Ryc. 5.** Kierunek, siła i istotność w seriach przepływów minimalnych rocznych i półrocznych Wisły (Zawichost, Tczew) i Bugu (Wyszków)

*Direction, strength and significance in a series of minimum annual and semi-annual flows along the Vistula (Zawichost and Tczew) and Bug (Wyszków)*

## Podsumowanie

Na podstawie wielokierunkowej analizy trendów ciągów przepływów średnich, maksymalnych i minimalnych rocznych, w półroczach hydrologicznych zimowym i letnim oraz średnich przepływów miesięcznych Wisły (w Tczewie i Zawichoście) i Bugu (w Wyszku) można stwierdzić, że w latach 1951–2015 wystąpiły okresy charakteryzujące się trendami rosnącymi, malejącymi oraz okresy przejściowe bez wyraźnych tendencji. Natomiast w całym badanym okresie nie obserwuje się stałej tendencji w przepływach, na co zwracał uwagę w swoich pracach D. Wrzesiński (2009). Stwierdzono również, że dwukrotnie nastąpiła zmiana kierunku trendów w przypadku przepływów średnich rocznych i średnich półrocza zimowego i letniego Wisły i Bugu. Pierwsza zmiana wystąpiła ok. 1965 r., czyli pięć lat wcześniej niż na to wskazują badania prowadzone przez D. Wrzesińskiego (2009), natomiast druga zmiana wystąpiła ok. 1980 r. W pozostałych analizowanych seriach przepływów, rok, w którym nastąpiło odwrócenie tendencji zmienia się, co może być spowodowane czynnikami nieklimatycznymi (m.in. rzeźbą, budową geologiczną, antropopresją).

W przypadku przepływów minimalnych rocznych, półroczy letniego i zimowego, w latach 1951–2015 przeważają trendy rosnące. Najsilniejsze trendy występują na Bugu, a naj słabsze – na Wiśle w Tczewie. W przypadku przepływów maksymalnych przeważają trendy malejące. Wyjątkiem jest półrocze letnie na Wiśle w Zawichoście (dorzecze górnej Wisły), gdzie trendy są bardzo słabe lub nie występują. Otrzymane wyniki są zgodne z wynikami, jakie otrzymał R. Soja (2002) dla rzek karpaccich, W. Marszelewski i M. Dąbrowski (2010) dla Biebrzy oraz D. Wrzesiński (2009) i Z. Michalczyk (2009) dla większości rzek znajdujących się na terenie Polski. Wielokierunkowa analiza trendów przepływów w przekrojach zamykających zlewnie górnej Wisły oraz Bugu pozwala prześledzić wpływ tych dwóch zlewni cząstkowych na kształtowanie się trendów przepływu w ujściowym odcinku Wisły do morza (zob. posterunek w Tczewie). Szczególnie dobitnie widać „przeniesienie” trendów średnich przepływów półrocza letniego z dorzecza górnej Wisły na średnie przepływy półrocza letniego w przekroju Tczew (ryc. 2 i 3). Niewielki wpływ Bugu ma zapewne związek z zaledwie 15% udziałem jego wód w odpływie całkowitym Wisły, przy znacznie większym 41% udziale dorzecza górnej Wisły (tab. 1). Wpływ Bugu uwidacznia się natomiast w trendach przepływów minimalnych półrocza letniego (ryc. 5).

Porównanie trendów średnich przepływów w półroczach hydrologicznych z trendami przepływów średnich rocznych umożliwia ocenę wpływu poszczególnych półroczy na kształtowanie się trendów przepływu średniego rocznego. W przypadku Wisły, posterunek Zawichost, można zauważyć przeważający wpływ półrocza letniego. Trendy średnich rocznych przepływów maksymalnych Bugu kształtowane są w znacznej mierze przez średnie przepływy maksymalne półrocza zimowego, natomiast trendy średnich rocznych przepływów minimalnych przez

średnie przepływy minimalne półrocza letniego (ryc. 4, 5). Najmniejsze podobieństwo w rozkładzie czasowym trendów wartości średnich rocznych i półroczny hydrologicznych widać w przypadku Wisły (posterunek Tczew). Prawdopodobnie ma to związek z zaburzeniem naturalnego reżimu dolnej Wisły gospodarką wodną na zbiorniku we Włocławku. Skomplikowanym obrazem cechuje się układ trendów w poszczególnych miesiącach. O ile za pozytywny można uznać niewielki udział trendów istotnych statystycznie, o tyle niepokojem napawa przewaga w ostatnich latach trendów rosnących zwłaszcza w miesiącach wiosenno-letnich o znacznym potencjale powodziowym (marzec, maj – sierpień, ryc. 3). Wpływ dorzecza górnej Wisły na kształtowanie średnich odpływów miesięcznych Wisły w Tczewie uwidacznia się szczególnie w lipcu i sierpniu oraz październiku, natomiast wpływ zlewni Bugu – w listopadzie, grudniu, marcu, lipcu i sierpniu (ryc. 3).

Zastosowana metoda statystyczna pozwoliła na porównanie tendencji przepływów rzek w seriach o różnej długości (<20 lat) w ciągu ponad pół wieku. Zidentyfikowano kierunki oraz siłę trendów w poszczególnych okresach oraz całym badanym wieloleciu. Takie podejście badawcze daje możliwość prześledzenia wpływu długości serii pomiarowej na znak i siłę trendu oraz wskazuje czas, w którym następuje zmiana trendu na przeciwny.

Reasumując można stwierdzić, że przeprowadzone badania pozwalają prześledzić bardzo szczegółowo tendencje przepływów Wisły i Bugu. Zmiany obserwowane w przepływach średnich miały charakter fluktuacyjny i w dużej części były statystycznie nieistotne. Wydaje się, że uzupełnienie ich o studia na temat trendów wybranych czynników klimatycznych (sum opadów, średniej temperatury powietrza i pokrywy śnieżnej) umożliwiłyby częściowe wyjaśnienie ich przyczyn.

## Piśmiennictwo

ASl, [www: dds.cr.usgs.gov/srtm/](http://www.dds.cr.usgs.gov/srtm/)

Bartnik A., Jokiel P., 1997, *Zmiany odpływu na obszarze Polski w latach 1971–1990 w świetle analiz jednorodności szeregów przepływów rzek*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 4, s. 67–85.

Dynowska I., 1971, *Typy reżimów rzecznych w Polsce*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne, 28, s. 1–133.

Dynowska I., 1994, *Reżim odpływu rzecznego*, plansza 32.3. *Odpływ rzeczny*, [w:] *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Główny Geodeta Kraju, PPWK, Warszawa.

Fal B., 1993, *Zmienność odpływu w obszarze Polski w bieżącym stuleciu*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 3, s. 3–20.

Fal B., Bogdanowicz E., 2002, *Zasoby wód powierzchniowych Polski*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 2, s. 3–38.

- Hannaford J., Buysl G., Stahl G.K., Tallaksen L.M., 2013, *The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records*, Hydrology and Earth System Sciences, 17, s. 2717–2733.
- Jokiel P., Bartnik A., 2001, *Zmiany w sezonowym rozkładzie odpływu w Polsce środkowej w wieloletniu 1951–1998*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 2, s. 3–16.
- Jokiel P., Kożuchowski K., 1989, *Zmiany wybranych charakterystyk hydroklimatycznych Polski w bieżącym stuleciu*, Dokumentacja Geograficzna, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, 6, Warszawa.
- Jokiel P., Stańsławczyk B., 2012, *Roczne odpływy maksymalne i minimalne w dorzeczu Odry i Wisły w przekroju wieloletnim*, Czasopismo Geograficzne, 83, 3, s. 133–143.
- Kendall M.G., 1975, *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London.
- Kondracki J., 2002, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Mann H.B., 1945, *Non-parametric test against trend*, Econometrica, 13, s. 245–259.
- Marsz A.A., Styszyńska A., Krawczyk W.E., 2016, *Długookresowe wahania przepływów rocznych głównych rzek w Polsce i ich związek z cyrkulacją termohalinową Atlantyku Północnego*, Przegląd Geograficzny, 88, 3, s. 295–316.
- Marszelewski W., Dąbrowski M., 2010, *Wieloletnie tendencje zmian odpływu Biebrzy*, [w:] D. Wrzeński (red.), *Odpływ rzeczny i jego regionalne uwarunkowania*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 109–127.
- Michalczyk Z., 2009, *Średnie i skrajne odpływy z obszaru Polski*, [w:] R. Bogdanowicz, J. Fac-Beneda (red.), *Zasoby i ochrona wód. Obieg wody i materii w zlewniach rzecznych*, Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, s. 37–46.
- McCabe G.J., Wolock D.M., 2002, *A step increase in streamflow in the conterminous United States*, Geophysical Research Letters, 29, s. 38-1–38-4.
- Piniński M., Marcinkowski P., Kundzewicz Z. W., 2018, *Trend detection in river flow indices in Poland*, Acta Geophysica, 66, 3, s. 347–360.
- Pociask-Karteczka J., Limanówka D., Nieckarz Z., 2003, *Wpływ oscylacji północnoatlantycznej na przepływy rzek karpaccich (1951-2000)*, Folia Geographica, Series Geographica Physica, 33–34, s. 89–104.
- Pociask-Karteczka J., 2006, *River hydrology and the North Atlantic Oscillation: A general review*, AMBIO: A Journal of the Human Environment, 35, 6, s. 312–314.
- Pociask-Karteczka J., 2017, *Położenie hydrograficzne Polski na tle Europy*, [w:] P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 15–20.
- Ruiz-Villanueva V., Stoffel M., Wyźga B., Kundzewicz Z.W., Czajka B., Niedźwiedz T., 2014, *Decadal variability of floods in the northern foreland of the Tatra Mountains.*, Regional Environmental Change, 16, 3, s. 603–615.
- Ruiz-Villanueva V., Wyźga B., Kundzewicz Z.W., Niedźwiedz T., Łupikasza E., Stoffel M., 2016, *Variability of Flood Frequency and Magnitude During the Late 20th and Early 21st Centuries in the Northern Foreland of the Tatra Mountains*, [w:] Z.W. Kundzewicz, M. Stoffel, T. Niedźwiedz, B. Wyźga (red.), *Flood risk in the Upper Vistula Basin*, GeoPlanet: Earth and planetary sciences. Springer, Berlin, s. 231–256.

- M. Stoffel, T. Niedźwiedź, B. Wyżga (red.), *Flood risk in the Upper Vistula Basin*, GeoPlanet: Earth and planetary sciences. Springer, Berlin, s. 231–256.
- Sen P.K., 1968, *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau*, Journal of the American Statistical Association, 63, s. 1379–1389.
- Soja R., 2002, *Hydrologiczne aspekty antropopresji w polskich Karpatach*, Prace Geograficzne, 186, s. 7–130.
- Stachý J., 1968, *Zmniejszanie się odpływu rzek polskich w bieżącym stuleciu*, Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, 95, s. 3–13.
- Stachý J., 1969, *Wieloletnia prognoza odpływu rzek polskich*, Wiadomości Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, 5, 1, s. 5–64.
- Stachý J., 1970, *Wieloletnia zmienność odpływu rzek polskich*, Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, 97, s. 1–42.
- Stachý J., 1984a, *Odpyw rzek polskich w latach 1971–1980 na tle danych wieloletnich*, Gospodarka Wodna, 5, s. 138–141.
- Stachý J., 1984b, *Odpyw rzek polskich w latach 1971–1980 na tle danych wieloletnich*, Gospodarka Wodna, 6, s. 163–167.
- Styszyńska A., Tamulewicz J., 2005, *Warta river discharges in Poznań and atmospheric circulation in the North Atlantic region*, Quaestiones Geographicae, 23, s. 63–81.
- Theil H., 1950, *A rank-invariant method of linear and poly-nomial regression analysis*. Netherlands Academy Wetenschappen Proces, 53, s. 386–392 (cz. 1), 521–525 (cz. 2), 1397–1412 (cz. 3).
- Węglarczyk S., 2010, *Statystyka w inżynierii środowiska*, Wydawnictwo Politechnika Krakowska, Kraków.
- Wrzesiński D., 2009, *Tendencje zmian przepływu rzek Polski w drugiej połowie XX wieku*, Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, seria A – Geografia Fizyczna, 60, s. 147–162.
- Wrzesiński D., 2011, *Regional differences in the influences of the North Atlantic Oscillation on seasonal river runoff in Poland*, Quaestiones Geographicae, 30, 3, s. 127–236.
- Wrzesiński D., Paluszkiwicz R., 2011, *Spatial differences in the impact of the North Atlantic Oscillation on the flow of rivers in Europe*, Hydrology Research, 42, 1, s. 30–39.
- Wrzesiński D., 2017, *Reżimy rzek Polski*, [w:] P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 215–222.
- Wrzesiński D., Sobkowiak L., 2018, *Detection of changes in flow regime of rivers in Poland*, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 66, 1, s. 55–64.
- Yue S., Pilon P., Phinney B., Cavadias G., 2002, *The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series*, Hydrological Processes, 16, s. 1807–1829.

## Summary

The drainage basin of the River Vistula accounts for more than half (54%) of the territory of Poland, though about 13% of it is located beyond the country's borders (in Slovakia, Ukraine and Belarus). River runoff in the Vistula basin reaches about 175 mm, ensuring Poland's status as one of the countries in Europe with water-availability problems. The Vistula basin is an area in which the largest agglomerations and industrial centers of Poland are located, hence the particular importance of defining the magnitude and dynamics of water resources in this part of the country.

While long-term (1951–2015) changes in amounts of river runoff in Poland have been investigated previously, it has remained difficult to develop unambiguous conclusions as regards the temporal variability characterising this runoff. It has thus been the aim of the work described here to analyse long-term changes in (average, maximum and minimum) annual, half-yearly and monthly river runoff along the Vistula (at the Tczew and Zawichost gauges), as well as along the Bug (at the Wyszaków gauge). The data involved were obtained from the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMGW-PIB). The Mann-Kendall test and the directional coefficient  $\beta$  expressed by the Theil-Sen estimator, a multi-temporal trend analysis, were applied in the study. This allowed for determinations of the directions, significances and strengths of trends for river runoff, with identification of time periods over which the directions to trends reversed. The minimum duration of the calculation period is 20 years.

There has been no constant trend for flows along the Vistula during the whole period considered. Trends for average annual river runoff mostly fail to attain statistical significance. However, it is downward trends that prevail for maximum flows, while those for minimal flows are upwards. In contrast, there are numerous statistically significant trends for flows along the Bug, albeit with two inflection points across the 1951–2015 period – around 1965 and 1980.

The multi-directional analysis of flow trends in the upper Vistula and Bug catchments allows for the tracking of the impact of these two sub-basins on flow trends in the lower course of the Vistula (at the Tczew gauge). The upper Vistula basin influences this part of the Vistula significantly – especially in the summer half-year. The much weaker influence exerted by the Bug might be related to the small (15%) share of total runoff it accounts for, as set against the 41% contribution made by the upper Vistula. Nevertheless, the impact of the Bug is reflected in the trends noted for the Vistula's minimum summer half-year flows.

Trends for river runoff in particular months are complex. Recent years have brought a predominance of upward trends in the spring and summer months in particular, with this looking unsettling, given the significant potential for (March and May – August) flooding it denotes. The influence of upper Vistula

runoff on average monthly runoff along the Vistula at Tczew is particularly noticeable in July, August and October, whereas the impact of runoff from the Bug is most tangible in November, December, March, July and August.

Major factors responsible for changes in river runoff trends are precipitation and air temperature, which are controlled by supra-regional air circulation patterns. This part of Europe is influenced by the North Atlantic Oscillation. A full explanation of changing trends for river runoff thus needs to consider such climatic factors as precipitation totals, air temperature and snow cover.

