

Paweł Jokiel

Uniwersytet Łódzki, Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, email: pawel.jokiel@geo.uni.lodz.pl

Przepływy i odpływy maksymalne w środkowej Polsce

Maximum discharges and maximum outflows in central Poland

Abstract: In the article presented above the seasonal and multiannual variation and spatial differentiation of a few parameters were studied. These specifications were obtained on the basis of maximum discharges registered for 71 water-gauges in central Poland in the second half of the 20th century (1951-2002) (Table 1). In particular, seasonal and spatial regularities of maximum outflows, maximum discharges (WWQ_s and WWQ_k) and Françou-Rodier Flood Ratings (K) appearance were established. The greatest number of WWQ_s (WWQ_k) in central Poland was registered during the cold half-year (months: January and March) and in the summer (July and August). In autumn and early winter months (from September till December) maximum outflows were not registered. In central Poland the maximum unit runoffs are not very differentiated as they range from 23 to 228 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. These values can be assumed as the representatives of the regional extremes.

Regression equations between catchment surface areas and maximum discharges (unit runoffs) were also calculated – equation 1 (Fig. 4) and equation 2 (Fig. 6). In the catchments of the region, the maximum unit runoffs values (WWQ) decrease very slowly with increasing catchment areas (compare with Fig. 6). Spatial differentiation of Françou-Rodier Flood Indexes (K , equation 3) was under investigation.

Moreover, the regional equation of the relationship between WWQ and K (equation 4, Fig. 8) was computed. Due to the Françou-Rodier Flood Indexes (K), the risk of precipitation and snowmelt/rainfall floods in the small and large central Poland river valleys is of minor importance. In general, some previously identified patterns, which describe the relationships between WWQ , WWQ , K and A in the global, continental and national scale are also visible considering the regional scale (central Poland area).

The aim of this study was also to investigate the multiannual variability of the Flood Indexes (IWW_K) – equation 5 and Fig. 9, which were calculated for central Poland area. In the second half of the 20th century the IWW indexes, which were determined in this region were continuously declining. It proves that the scale and the frequency of floods in the rivers of the particular area are getting reduced. The relationships and linkages between annual North Atlantic Oscillation Indexes (NAO) and Flood Indexes (WWQ) were also studied, and it can be stated that they are unclear and statistically insignificant (Fig. 10) and cannot be treated as simple statistical correlations.

Keywords: maximum discharge, maximum outflow, central Poland, Françou-Rodier Flood Index, Flood Rating, frequency of floods

1. Uwagi wstępne

Dotychczasowy stan wiedzy na temat zasobów wodnych i odpływu rzecznoego w środkowej Polsce, w ich różnych aspektach, odmianach i formach, jest bardzo szeroki i trudny do krótkiego usystematyzowania. W ogólności, odpływ rzeczny jest w tej części Polski bliski średniej krajowej i mierzony odpływem jednostkowym wynosi ok. $5,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Jest on jednak bardzo zróżnicowany przestrzennie (od

poniżej $2,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ do ok. $9,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) i zmienny w czasie – średni współczynnik zmienności odpływu rocznego w tej części Polski wynosi ok. 27% (Jokiel, 2004). Największe odpływy występują na południu obszaru; w zlewniach górnej i środkowej Pilicy oraz górnej Warty, średnie odpływy jednostkowe przekraczają tam przeważnie $6,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Najmniejsze odpływy jednostkowe występują

zaś w zlewniach lewych dopływów Bzury i rzek zasilających równoleżnikowy odcinek środkowej Warty. Nie przekraczają tam one $3,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Bardzo zróżnicowany i interesujący jest „wnętrze” środkowej Polski (m.in. Wzniesienia Łódzkie). Odpływy mogą tu być lokalnie dużo wyższe od typowych dla nizin Wielkopolski i Mazowsza, np.: średnie w prawobrzeżnych zlewniach górnej i środkowej Bzury oraz w zlewniach środkowej Warty i Pilicy przekraczają często $5,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ i dochodzą nawet do $7,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Mogą tu być też bardzo niskie, np. z obszarów drenowanych przez Ner i jego dopływy oraz z lewobrzeżnych zlewni systemu Bzury odpływa średnio w roku mniej niż $3,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

W środkowej Polsce mamy do czynienia z niewielką przewagą odpływu podziemnego nad powierzchniowym – średni współczynnik zasilania podziemnego wynosi ok. 53%. Jest on bliski wartości przeciętnej dla Polski. Na większości obszaru, oprócz zlewni środkowej Prosnicy i Baryczy na zachodzie i zlewni regionu świętokrzyskiego na wschodzie, udział zasilania podziemnego przekracza 50%, sięgając lokalnie 70% (górną Wartę, górną i środkową Pilicę, Wzniesienia Łódzkie). Średni odpływ podziemny w środkowej Polsce wynosi ok. $2,85 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ i jest także bardzo zróżnicowany przestrzennie; od powyżej $4,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ na południu do poniżej $1,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ na północy (Jokieli, 1994).

Pochodne współczynniki i miary odpływu są także bliskie przeciętnym dla całej Polski. Średni współczynnik odpływu wynosi ok. 28%, a współczynnik odpływu podziemnego – 18%. Przeciętny, roczny deficyt odpływu jest jednak o ok. 20% wyższy od średniej krajowej i wynosi 475 mm, a średni wieloletni wskaźnik klimatycznego bilansu wodnego (KBW) jest lekko

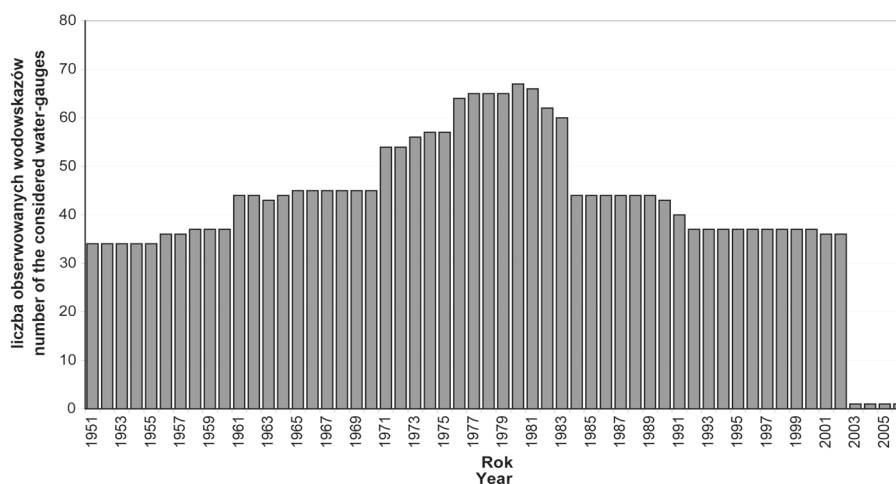
dodatni – 18,3 mm, przy czym rozstęp w wieloleciu jest tu bardzo duży i przekracza 450 mm (od -234 mm w latach suchych do prawie 223 mm w wilgotnych). Uwilgotnienie obszarowe jest natomiast mniejsze od przeciętnej dla Polski i wynosi ok. 570 mm. Stanowi ono ok. 90% opadu skorygowanego (627 mm). Zatem warunki dla formowania odpływu powierzchniowego i wysokich wezbrań, są w tej części Polski niezbyt sprzyjające, choć oczywiście bardzo zróżnicowane przestrzennie (Jokieli, 2004).

Dynamika w czasie i zróżnicowanie przestrzenne odpływu w środkowej Polsce są wyraźnie większe od wieloletniej zmienności opadów atmosferycznych i ich zróżnicowania przestrzennego. Wzmocnienie to, jest nie tylko wynikiem czasowych i przestrzennych zmian innych elementów klimatu i pogody (cyrkulacji atmosferycznej, temperatury i wilgotności powietrza, itd.), ale stanowi również skutek dużego zróżnicowania przestrzennego, szeroko pojmowanych warunków środowiska geograficznego w regionie i związanej z nimi retencji. W tej części Polski, notuje się też coraz silniejszy rozwój kontrastów. Po roku wilgotnym pojawia się wyjątkowo suchy. W obrębie tego samego roku, występują w rzekach okresy głębokich niżówek i wysokich wezbrań. Na stosunkowo niewielkim obszarze, a takim przecież jest terytorium środkowej Polski, nawet w tym samym roku, można wskazać obszary dotknięte równocześnie suszą i powodzią. Sezonowe zróżnicowanie odpływu staje się też coraz większe, nawet w zlewniach sąsiadujących z sobą (Jokieli, Tomalski, 2015). Wszystko to sprawia, że monitoring różnych faz i form odpływu w tej części Polski jest potrzebny, zwłaszcza w odniesieniu do zjawisk ekstremalnych i procesów hydrologicznych wywołujących problemy gospodarcze.

2. Materiał i metody badawcze

Maksymalne przepływy (WWQ – Wysoki Wielki Przepływ) pojawiające się w kulminacjach, zwykle największych wezbrań polskich rzek i odpowiadające im odpływy jednostkowe (WWQ) są wielokrotnie mniejsze od rejestrowanych na świecie i w Europie (Bartnik, Jokieli 2012a). Jednocześnie te, które są notowane w rzekach środkowej Polski, należą w Polsce

do najmniejszych (Bartnik, Jokieli, 2012b). Na obszarze tym zanotowane maksima odpływu, mierzone WWQ, zawierają się zwykle w przedziale od 50 do $150 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, a tylko sporadycznie zdarzają się wezbrania, w których w kulminacjach odpływa więcej niż $200 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Liczne są natomiast maksima mniejsze od $50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Średni WWQ i jego współczyn-



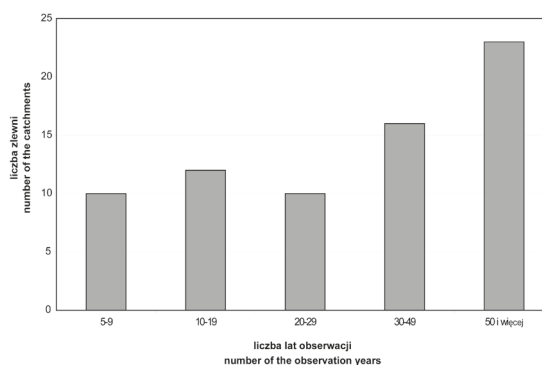
Rycina 1. Liczba uwzględnionych wodowskazów na rzekach środkowej Polski w poszczególnych latach wielolecia
Figure 1. The number of the considered water-gauges in the river of central Poland in the observation period

nik zmienności przestrzennej na Nizinie Południowej wynoszą odpowiednio: $67,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ i 61,8%. Zatem odpływy w kulminacjach wezbrań są w tej części Polski niskie, ale bardzo zróżnicowane przestrzennie.

Materiałem badawczym przeanalizowanym w pracy były, pozyskane z IMiGW-PIB, różnej długości serie codziennych przepływów pochodzące ze wszystkich 71 przekrojów wodowskazowych, na 38 rzekach środkowej Polski, obserwowanych w drugiej połowie XX wieku (Tab. 1). Długość i horyzont czasowy serii były jednak bardzo zróżnicowane: od 6 do 52 lat. Fakt ten utrudnił przeprowadzenie w pełni obiektywnych analiz statystycznych, ale jednocześnie, możliwie duża liczba serii obserwacyjnych, pozwoliła na pełne wykorzystanie istniejących danych hydrometrycznych i zidentyfikowanie różnego rodzaju prawidłowości regionalnych.

Najwięcej wodowskazów działało w środkowej Polsce w latach 70. XX wieku (ponad 50). Na początku i pod koniec drugiej połowy ubiegłego stulecia, ich liczba była wyraźnie mniejsza (od 35 do 45) – Ryc. 1. Ponad połowa wziętych pod uwagę serii (39) miała długość powszechnie akceptowaną dla tego typu analiz (30 i więcej lat), a tylko 10 serii obejmowało okres krótszy niż 10 lat (Ryc. 2). Wielkość rzek, a zwłaszcza powierzchnie ich zlewni (A) były także bardzo zróżnicowane od ok. 66 km^2 (Warta-Kręciwilk) do 25 911 km^2 (Warta-Poznań). Było to o tyle ważne, że merytoryczna wartość przeprowadzonych analiz regresji bardzo zależy od możliwie szerokiego rozstępu tej charakterystyki zlewni w próbce.

W przeprowadzonych analizach wieloletniej zmienności oraz sezonowego i przestrzennego zróżnicowania maksimów odpływu w środkowej Polsce wykorzystano wspomniany wcześniej przepływ maksymalny z okresu obserwacji – *WWQ* oraz dwie jego miary pochodne: maksymalny odpływ jednostkowy – *WWQ* oraz indeks powodziowości Franço-rodiera – *K* (Franço, Rodier, 1969; Bartnik, Jokiel, 2007). Charakterystyki te zbadano w zakresie zróżnicowania przestrzennego, zmienności



Rycina 2. Długość serii obserwacyjnych na uwzględnionych wodowskazach środkowej Polski
Figure 2. The length of the record series in the considered water-gauges of central Poland

czasowej i wzajemnej korelacji stosując pakiet podstawowych miar i procedur statystycznych: zmienności, korelacji i regresji (Jokiel red., 2015) zawartych w pakietach EXCEL i STATISTICA. Do prezentacji wyników zastosowano diagramy możliwe do wykonania w wymienionych programach.

Tabela 1. Podstawowe informacje o badanych rzekach i zlewniach
Table 1. Basic information about examined rivers and catchments

Rzeka River	Wodowskaz Water-gauge	Pow. A [km ²] Catchment area	Okres obserwacji Observation period	Liczba lat obserwacji Length of the series	WWQ [m ³ ·s ⁻¹]	Rok WWQ WWQ year	Miesiąc WWQ WWQ months	WWQ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ²]	K
Warta	Kręciwilk	66,2	1971-1983	13	9,70	1972	VIII	146,53	1,89
Warta	Korwinów	550,0	1951-1960	10	45,00	1955	VI	81,82	1,74
Warta	Poraj	390,0	1961-2002	46	26,80	1985	VIII	68,72	1,55
Warta	Mstów	988,0	1971-1983	13	51,50	1972, 1977	VIII; VIII	52,13	1,43
Warta	Bobry	1 822,0	1951-1970	20	116,00	1953	I	63,67	1,70
Warta	Działoszyn	4 088,0	1951-2002	52	272,00	1997	VII	66,54	1,88
Warta	Burzenin	5 437,0	1971-1983	13	214,00	1979	III	39,36	1,40
Warta	Sieradz	8 140,0	1951-2002	52	378,00	1997	VII	46,44	1,63
Warta	Konin	13 351,0	1951-1983	33	820,00	1979	III	61,42	2,03
Warta	Nowa Wieś Podgórna	20 763,0	1965-1983	19	795,00	1979	III	38,29	1,58
Warta	Poznań	25 911,0	1951-2002	52	832,00	1979	III	32,11	1,41
Liswarta	Niwki	218,0	1951-2002	52	17,60	1965	VI	80,73	1,60
Liswarta	Zawady	1 109,0	1971-1983	13	71,00	1977	VIII	64,02	1,63
Liswarta	Kule	1 557,0	1951-1965, 1976-1983	22	75,00	1977	VIII	48,17	1,42
Kocanka	Kuźnica	249,0	1971-1991	21	11,80	1979	III	47,39	1,21
Oleśnica	Niechmirów	592,0	1951-2002	52	70,00	1953	I	118,24	2,05
Widawka	Słok	426,0	1966-1983	18	24,20	1967	II	56,81	1,40
Widawka	Szczerców	721,0	1971-2002	32	60,60	1982	I	84,05	1,80
Widawka	Rogoźno	1 268,0	1951-2002	52	129,00	1953	I	101,74	2,06
Widawka	Podgórze	2 354,0	1951-2002	52	179,00	1953	I	76,04	1,90
Grabia	Łask	472,0	1971-2002	32	44,20	1997	VII	93,64	1,82
Grabia	Grabno	811,0	1951-2002	52	100,00	1953	I	123,30	2,14

Nieciecz	Widawa	242,0	1974-2002	29	30,80	1997	VII	127,27	1,97
Pichnia	Rożdżały	119,0	1971-1989	19	6,88	1982	I	57,82	1,29
Pichnia	Pęczniew	370,0	1956-1981	26	13,30	1980	VIII	35,95	1,02
Ner	Chocianowice	120,0	1951-1965	15	12,50	1962	V	104,17	1,72
Ner	Dąbie	1 712,0	1951-2002	52	87,00	1979	III	50,82	1,48
Kiełbaska	Kościelec	476,0	1951-2002	52	18,90	1979	III	39,71	1,13
Powa	Posoka	332,0	1976-1983	8	42,60	1980	VII	128,31	2,02
Czarna Struga	Trąbczyn	423,0	1966-2002	37	42,60	1985	VIII	100,71	1,87
Meszna	Kąty	249,0	1956-1983	28	9,38	1980	VII	37,67	1,03
Wrześnica	Samorzewo	360,0	1961-2002	42	18,00	1980	VII	50,00	1,28
Prosna	Gorzów Śląski	164,0	1971-2002	32	37,40	1982	I	228,05	2,35
Prosna	Mirków	1 255,0	1951-2002	52	117,00	1953	I	93,23	1,98
Prosna	Piwonice	2 938,0	1951-1983	33	152,00	1953	II	51,74	1,58
Prosna	Bogusław	4 304,0	1951-2002	52	237,00	1953	I	55,07	1,70
Prosna	Robaków	4 712,0	1976-1981	6	298,00	1979	III	63,24	1,85
Pomianka	Opatów	128,0	1951-1991	41	14,10	1985	VIII	110,16	1,77
Niesób	Kuźnica Skakawska	246,0	1951-2002	52	33,60	1953	I	136,59	2,02
Łużyca	Kraszewice	232,0	1971-1975, 1980	6	22,60	1973	III	97,41	1,75
Ołobok	Ołobok	447,0	1951-2002	52	32,00	1985	VIII	71,59	1,60
Śwędrnia	Dębe	492,0	1961-1981	21	46,90	1979	III	95,33	1,84
Lutynia	Raszewy	534,0	1951-1990	40	33,90	1985	VIII	63,48	1,52
Pilica	Szczekociny	352,8	1961-62, 1964-70, 1981-1991	20	34,00	1970	VII	96,37	1,80
Pilica	Przedbórz	2 536,3	1951-2002	52	311,00	1960	VIII	122,62	2,37
Pilica	Sulejów	3 909,0	1976-1983	8	161,00	1979	III	41,19	1,39
Pilica	Spała	5 955,0	1958-2002	45	396,00	1960	VII	66,50	1,95
Pilica	Nowe Miasto	6 717,0	1951-2002	52	420,00	1960	VII	62,53	1,91

Pilica	Białobrzegi	8 664,0	1951-2002	52	471,00	1967	II	54,36	1,81
Żebrówka	Bonowice	1 29,0	1973-2002	30	12,70	2001	VII	98,45	1,69
Czarna Włoszcz.	Januszewice	589,0	1973-2002	30	53,20	2001	IV	90,32	1,83
Czarna Mal.	Dąbrowa	941,7	1951-2002	52	130,00	1960	VII	138,05	2,27
Luciąża	Kłudzice	505,4	1961-2002	42	87,80	1966	VII	173,72	2,34
Wolbórką	Zawada	616,2	1951-2002	52	81,00	1953	I	131,45	2,15
Drzewiczka	Odrzywół	1 004,9	1951-2002	52	179,00	1967	II	178,13	2,50
Bzura	Łęczycą	343,0	1951-1983	33	30,70	1962	V	89,50	1,74
Bzura	Orłów	1 219,2	1961-75, 1980	16	74,10	1962	V	60,78	1,59
Bzura	Łowicz	3 447,8	1951-1983	33	197,00	1979	III	57,14	1,70
Bzura	Sochaczew	6 281,0	1951-2002	52	480,00	1962	V	76,42	2,10
Ochnia	Kutno	465,0	1961-1990	30	75,40	1982	I	162,15	2,27
Ochnia	Łęki Kościelne	560,0	1976-1982	7	61,40	1982	I	109,64	1,98
Moszczenica	Gieczno	223,0	1977-2002	26	10,20	1997	VII	45,74	1,17
Mroga	Bielawy	467,4	1961-2002	42	32,30	1962	V	69,11	1,57
Bobrówka	Chušlin	180,0	1976-1983	8	13,50	1982	I	75,00	1,52
Rawka	Kamion	990,0	1976-1981	6	41,10	1979	III	41,52	1,24
Rawka	Kęszycę	1 191,0	1951-2002	52	101,00	1962	V	84,80	1,89
Sucha	Sucha Nowa	193,0	1976-1983	8	21,60	1977	VIII	111,92	1,84
Pisia	Duranów	495,0	1971-1991	20	47,50	1971	III	95,96	1,85
Utrata	Utrata	544,0	1976-1983	8	42,90	1982	I	78,86	1,70
Utrata	Krubice	715,0	1951-2000	50	80,10	1962	V	112,03	2,04
Łasica	Władysławów	363,0	1951-2002	52	8,36	1958	IV	23,03	0,67

Objaśnienia: A – powierzchnia zlewni; WWQ – maksymalny przepływ [m³-s⁻¹]; WWQ – maksymalny odpływ jednostkowy [dm³-s⁻¹.km⁻²]; K – indeks powodziowości François-Rodiera, Źródło: opracowanie własne.

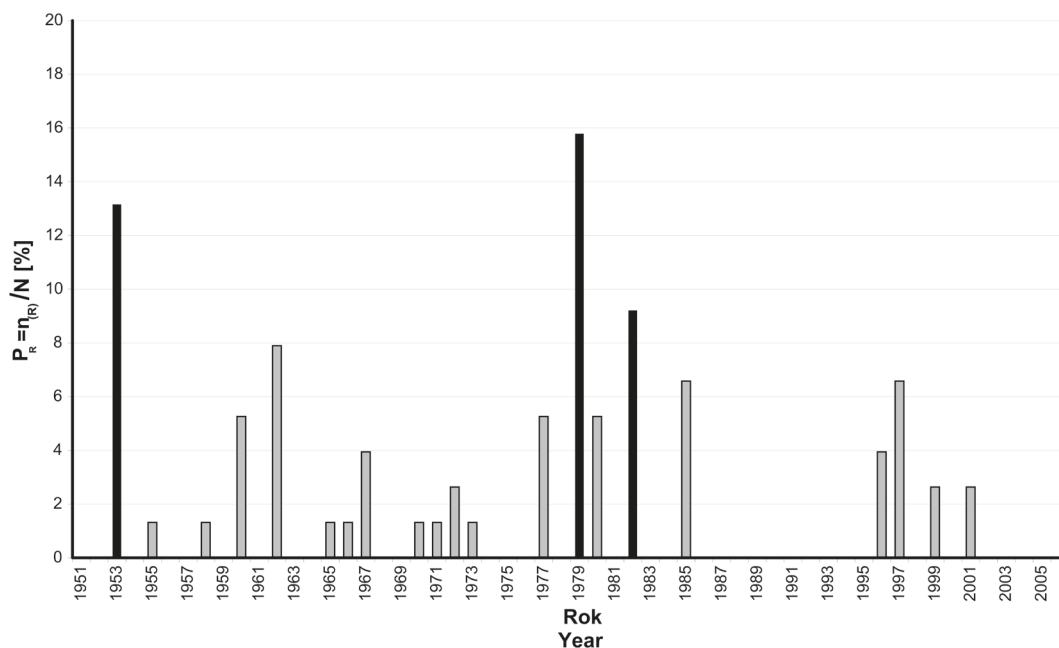
Explanation: A – catchment area [km²]; WWQ – maximum river runoffs [m³-s⁻¹]; WWQ – maximum specific outflow [dm³-s⁻¹.km⁻²]; K – François-Rodier flood index, Source: author own work.

3. Wyniki analiz i dyskusja

Analiza WWQ

Biorąc pod uwagę wartości bezwzględne i względne, najczęściej WWQ wystąpiło w tej części Polski w latach: 1979, 1953, 1982, 1972 (Ryc. 3, Tab. 2). Jednocześnie, w 37 latach wielolecia w żadnej z rzek środkowej Polski nie zanotowano absolutnego maksimum przepływu. Stosunek liczby WWQ zanotowanych w danym roku (n_R) do całkowitej liczby WWQ we wszystkich przekrojach wodowskazowych rzek środkowej Polski, w badanym okresie, (N) był bardzo zróżnicowany w czasie – P_R . Analizując poszczególne dekady wielolecia dostrzegamy, że szczególnie wyraźnie zaznaczyły się lata 70. i 50. Łącznie zanotowano w nich ponad połowę wszystkich WWQ. Porównując jednak otrzymany obraz z analizami wykonanymi dla całej Polski (Fal, 1993; Jokieli, Stanisławczyk, 2012), można dostrzec kilka istotnych różnic. W skali Polski da się wyodrębnić kilka wyraźnie zaznaczonych okresów charakteryzujących się zwiększoną częstością maksymalnych odpływów. Obejmują one lata: 1967-1982, 1988-

1989, 1994-2005 (Jokieli, Stanisławczyk, 2012). Natomiast w środkowej Polsce, widoczne są tylko dwa takie okresy i co ciekawe niezbyt zbliżone czasowo ze wskazanymi wyżej. Pierwszym jest długi okres obejmujący lata 1953-1985. Przepływy WWQ notowano wtedy stosunkowo często, ale częste były też lata, w których maksima nie występowały w żadnej z rzek regionu. Drugim był krótki okres lat 1996-2001, w którym niemal co roku w rzekach tej części Polski notowano kilka WWQ. Warto też dostrzec wielolecie 1951-1966, w którym w skali całej Polski maksima odpływu notowano rzadko, natomiast w środkowej Polsce, w tym właśnie piętnastolecu, zanotowano ponad 45% wszystkich WWQ. Biorąc też pod uwagę fakt, iż w tej części Polski był to także czas częstych, długich i głębokich niżówek oraz susz hydrologicznych (Stachy i in., 1979; Fal, 1993, 1997; Stachy, 2011; Jokieli, Stanisławczyk, 2012), okres ten można uznać w regionie za bardzo „kontrastowy” w stosunku do lat późniejszych.



Rycina 3. Liczebność względna występowania WWQ w przekrojach wodowskazowych rzek środkowej Polski
 Objaśnienia: P_R – roczny indeks częstości WWQ [%]; n_R – liczba WWQ w danym roku; $N=71$ – liczba wszystkich WWQ w środkowej Polsce

Figure 3. The frequency of the maximum multiannual runoffs (WWQ) in the water-gauges in central Poland
 Explanation: P_R – frequency index [%]; n_R – number of the WWQ in the year; $N=71$ – number WWQ on the all water-gauges in central Poland

W układzie sezonowym, najczęściej WWQ wystąpiło w miesiącach półrocza chłodnego (styczeń, marzec) oraz w dwu miesiącach letnich (lipiec i sierpień) – Tab. 2. Warto podkreślić, że maksima przepływu rzadko notowano w lutym, a sporadycznie w kwietniu. W miesiącach jesiennych i wczesnozimowych

(od września do grudnia), WWQ nie wystąpiły natomiast ani razu. Odnotujmy tym samym, iż sezonowe rozmieszczenie WWQ potwierdza śnieżno-opadowy reżim rzek regionu i małe prawdopodobieństwo pojawienia się ekstremalnie wysokich wezbrań jesienią.

Tabela 2. Sezonowe i wieloletnie rozmieszczenie WWQ w rzekach środkowej Polski
Table 2. Seasonal and multiannual distribution of the WWQ in the river of central Poland

Miesiące/Months	I	III	VII	VIII	IX, X, XI, XII
<i>n</i>	16	15	14	12	0
Lata/Years	1979	1953	1982	1972	37
<i>N</i>	12	10	7	7	0

Objaśnienia: *n* – liczba WWQ w miesiącach; *N* – liczba WWQ w poszczególnych latach

Źródło: opracowanie własne

Explanation: *n* – number of WWQ in the months; *N* – number of WWQ in the separate years

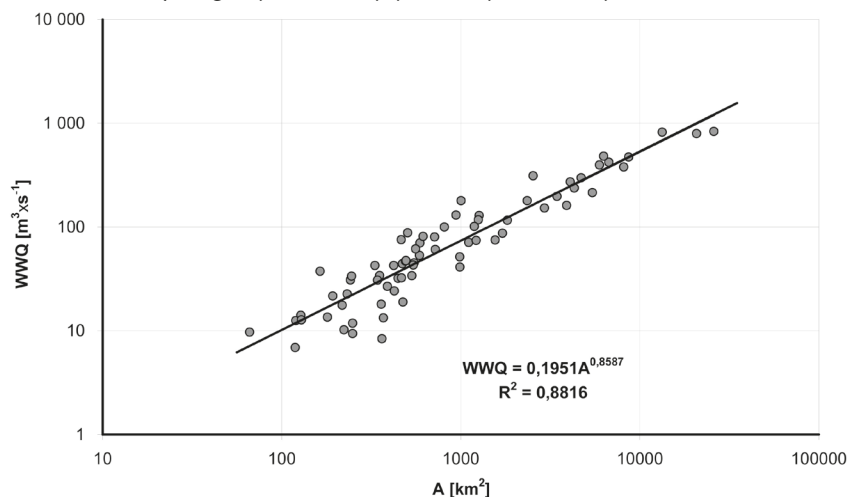
Source: author own work

Analizowany zbiór danych ze środkowej Polski pozwolił zidentyfikować regresyjną zależność WWQ od powierzchni zlewni (Ryc. 4). Podana formuła (eq. 1) ma bardzo wysoki współczynnik determinacji (0,88), jest statystycznie istotna ($\alpha=1\%$; test F-Snedecora), ma mały błąd standardowy regresji i choć jej

ważność należy ograniczyć do zlewni o powierzchni większej od 100 km², to na obszarze środkowej Polski może być użyteczna do szacowania przepływów maksymalnych w przekrojach niekontrolowanych.

$$WWQ = 0,1951 \times A^{0,8587} \quad (1)$$

Objaśnienia jak w Tab. 1.



Rycina 4. Przepływy maksymalne (WWQ) rzek środkowej Polski w funkcji powierzchni ich zlewni (A). Dodano linię regresji i jej równanie

Objaśnienia jak w Tab. 1

Figure 4. Maximum discharges (WWQ) as related to catchment areas (A) of the rivers in central Poland. Regression curve and its equation are shown

Explanation in the Table 1

Analiza WWQ

Zanotowane w drugiej połowie XX wieku, maksymalne odpływy jednostkowe są w środkowej Polsce niezbyt zróżnicowane: od 23 dm³·s⁻¹·km⁻²

(Łasica-Władysławów) do 228 dm³·s⁻¹·km⁻² (Prosna-Gorzów Śl.). Zauważmy też, że serie z których pochodzą maksima są długie;

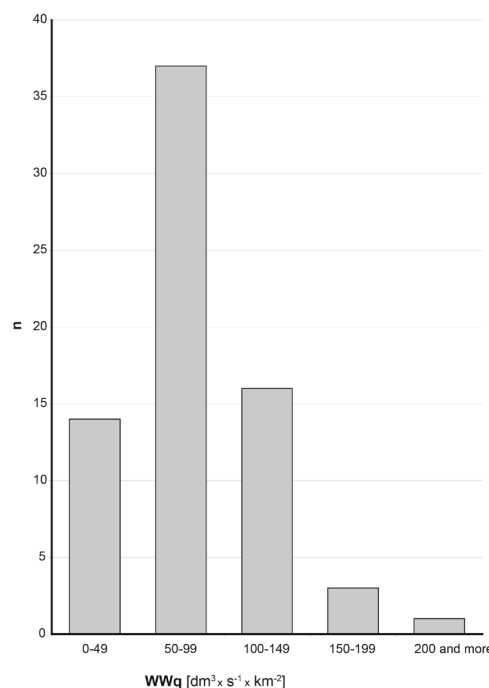
odpowiednio: 52 i 32 lata. Można zatem uznać podane wyżej liczby za reprezentatywne ekstrema regionalne. W porównaniu z rozstępem notowanym w skali Polski, Europy, czy świata przedział zróżnicowania WWQ w tej części Polski należy uznać za bardzo wąski (por. Bartnik, Jokiel, 2012).

Rozkład liczebności WWQ w badanej próbie zlewni jest lekko skośny prawostronnie, a jego przedział dominanty jest bardzo liczny (37 przypadków – ponad 50%) – Ryc. 5. Bardzo małe odpływy maksymalne ($<50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) są charakterystyczne dla dużych i małych zlewni Wielkopolski i niektórych przekrojów małych rzek Mazowsza (Tab.1). Bardzo wysokie WWQ zanotowano zaś w zlewni górnej Prosnys oraz w dwu zlewniach „świętokrzyskich” (Drzewiczka i Czarna Maleniecka.).

$$WWQ = 195,07 \times A^{-0,1413} \quad (2)$$

Objaśnienia jak w Tab. 1.

Związek korelacyjny między WWQ i A (Ryc. 6, eq. 2) jest wyraźnie słabszy od ustalonego dla WWQ (eq. 1) i obliczonego wcześniej dla Europy i Polski (Bartnik, Jokiel 2007, 2012). Równanie regresji, choć jest statystycznie istotne na poziomie 5% (test F-Snedecora), to procent wyjaśniania nie przekracza tu 17%, a błąd regresji jest bardzo duży. Wskutek tego, równanie 2 ma raczej charakter informacyjny, bez możliwości wykorzystania go w modelach inżynierskich i zadaniach

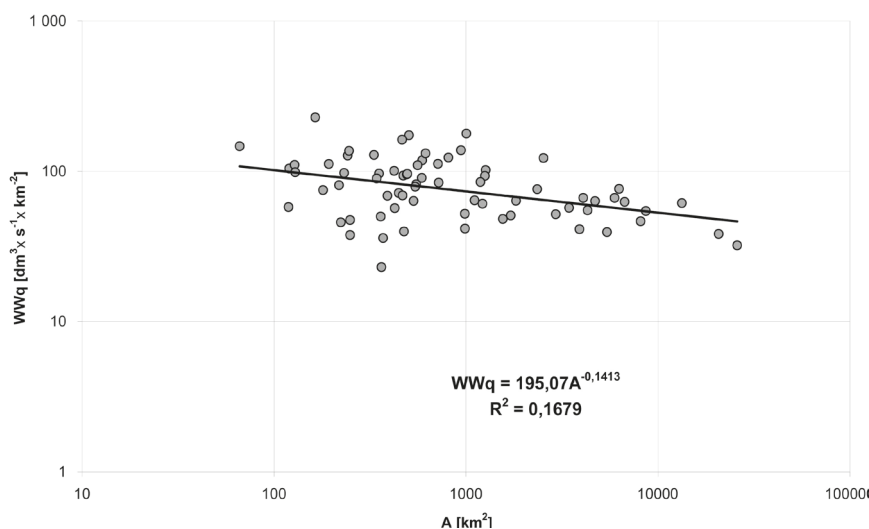


Rycina 5. Maksymalne odpływy jednostkowe (WWQ) w rozpatrywanych przekrojach wodowskazowych rzek środkowej Polski

Objaśnienia jak w Tab. 1

Figure 5. Maximum specific runoffs (WWQ) of the investigated rivers water gauges in central Poland
Explanation in the Table 1

prognostycznych. Należy jednak zauważyć, że postać formuły (funkcja potęgowa) jest identyczna z uzyskanymi wcześniej dla różnych kontynentów i obszarów (np.: Abrahamson, 2010; Bartnik, Jokiel, 2009; Biondić i in., 2007; Bryndal i in., 2009; Ciepiewski, 1973.). Jednocześnie porównując „nachylenia” krzy-



Rycina 6. Odpływy maksymalne (WWQ) ze zlewni środkowej Polski w funkcji powierzchni ich zlewni (A).
Objaśnienia jak w Tab. 1

Figure 6. Maximum specific runoffs (WWQ) as related to catchment areas (A) of the rivers in central Poland.
Explanation in the Table 1

wych podanych przez w/w autorów i formuły 2, łatwo dojdziemy do wniosku, że w środkowej Polsce maksymalny odpływ jednostkowy

bardzo wolno maleje wraz ze wzrostem powierzchni zlewni, a ponadto jest mało zróżnicowany przestrzennie.

Analiza indeksów powodziowości K

Zależność między maksymalnym odpływem ze zlewni, którego miarą jest maksymalny odpływ jednostkowy (WWQ) i powierzchnią zlewni (A) wynika z prostej empirycznej zależności podanej przez J. Françou i J. Rodiera (1969) na podstawie analiz 1200 ekstremalnych wezbrań rzecznych – eq. 3.

$$WWQ = \frac{10^{0,8K-2}}{A^{0,1K}} \quad (3)$$

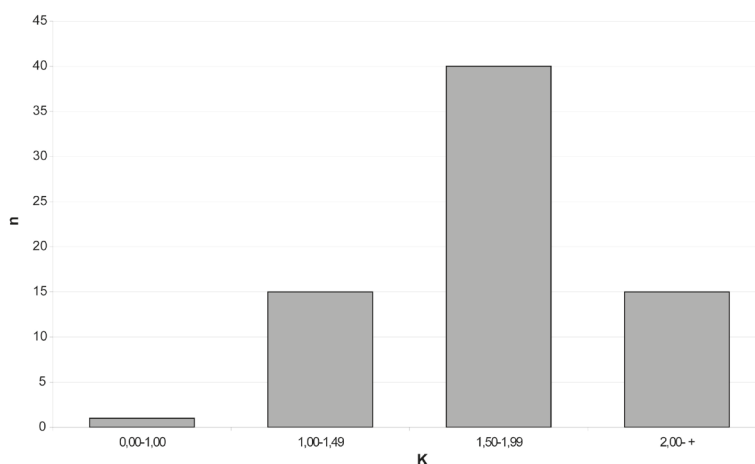
gdzie:

K –zależny od powierzchni zlewni wskaźnik redukcji WWQ – por. P. Jokiel (red.) (2015)

Pozostałe objaśnienia jak w Tab. 1.

Indeks K jest wielkością niemianowaną, która pozwala porównywać rozmiary kulminacji wezbrań (WWQ) w zlewniach o różnej powierzchni i uniezależnić się od związku, jaki występuje między WWQ i A (por. eq. 2). Jest on zatem estymatorem i miarą warunków

fizycznogeograficznych w jakich funkcjonuje zlewnia. Zdaniem wielu autorów, im wyższy jest ten wskaźnik, tym większa jest podatność zlewni (rzeki) na występowanie powodzi (Bartnik, Jokiel 2012a). Jest on więc miarą powodziowości rzeki. Indeks wyższy od 6,0 (zwykle wielkie rzeki i zlewnie) świadczy o ogromnej podatności rzeki i zlewni na formowanie wielkich powodzi. Indeksy wyższe od 4,0 wskazują rzeki groźne, których powodzie mogą przynosić znaczne szkody (indeksy takie uzyskano zarówno dla rzek dużych i bardzo dużych, jak i dla bardzo małych cieków). Indeksy mniejsze od 2,0 świadczą natomiast o stosunkowo małym zagrożeniu powodziowym, jakie stwarza dana rzeka. Teoretycznie, w regionie gdzie występuje reżim śnieżno-deszczowy lub deszczowo-śnieżny, w małych rzekach, maksymalne WWQ winny być odnotowane w czasie wezbrań opadowych, a w dużych – w czasie wezbrań roztopowych lub mieszanych.



Rycina 7. Indeksy Françou-Rodiera (K) w przekrojach wodowskazowych rzek środkowej Polski
Objaśnienia jak w Tab. 1

Figure 7. Françou-Rodier indexes (K) of the central Poland rivers
Explanation in the Table 1

Indeksy powodziowości K rzek środkowej Polski są relatywnie małe i w ogromnej większości nie przekraczają 2,0. Tylko w 15 przekrojach, zamykających głównie górne (wyżynne) fragmenty zlewni, są one wyraźnie większe od 2,0 (np. Drzewiczka, Pilica, Czarna

Maleniecka, Prosna) – por. Tab. 1. Pozostałe rzeki należy uznać za powodziowo mało aktywne, a Łasicę, której K jest mniejsze od 1, za skrajnie mało aktywną. W ogólności, zagrożenie powodziowe w dolinach dużych i małych rzek środkowej Polski jest niewielkie, przy

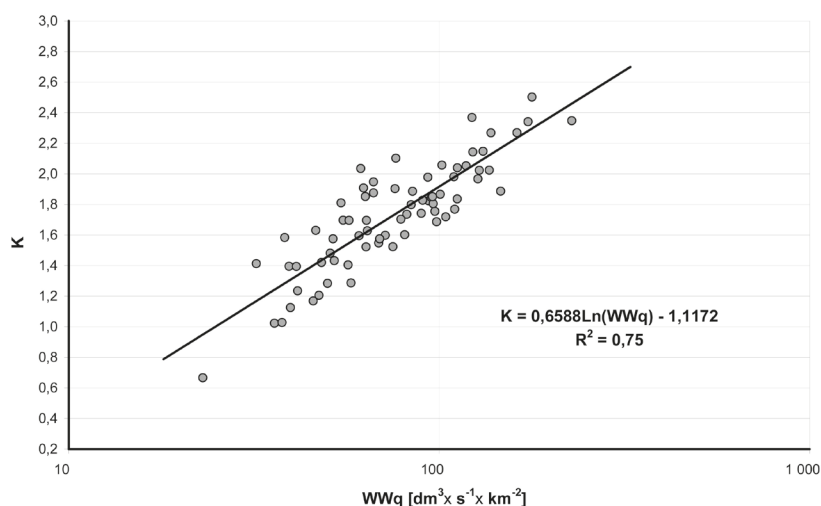
czym odnosi się to przede wszystkim do wzebrań opadowych i mieszanych.

Związek regresyjny między maksymalnym odpływem jednostkowym, a indeksem powodziowości jest krzywoliniowy i opisuje go najlepiej funkcja logarytmiczna (por.: eq. 4 i Ryc. 8).

$$K = 0,6588Ln(WWQ) - 1,1172 \quad (4)$$

gdzie:

$Ln(WWQ)$ – logarytm naturalny WWQ



Rycina 8. Indeksy Françou-Rodiera (K) w funkcji odpływów maksymalnych (WWQ) ze zlewni środkowej Polski
Objaśnienia jak w Tab. 1

Figure 8. Françou-Rodier indexes (K) as related to maximum specific runoffs (WWQ) of the central Poland catchments

Explanation in the Table 1

Analiza indeksów IWW

Dla danego obszaru (np. kontynent, kraj, region) i dla danego roku (np. 2000) można obliczyć względną, w stosunku do liczby obserwowanych wówczas wodowskazów, liczbę zdarzeń WWQ (Bartnik, Jokiel 2008). Miarę tę nazwano *wskaźnikiem wysokiej wody* dla roku „ k ” (WW_k). Jeśli wyrazimy ją w procentach, to pokazuje ona w jakim procencie rzek obserwowanych na danym obszarze i w danym roku zdarzyło się absolutne maksimum przepływu. Każde WWQ opisuje też porównywalny i niemianowany indeks K wskazujący na skalę tego zdarzenia. Zatem, iloczyn wskaźnika wysokiej wody dla roku „ k ” (WW_k) oraz sumy indeksów K_j ustalonych dla maksymalnych przepływów, które na danym obszarze wystąpiły w tymże roku, pozwala na ocenę nie tylko względnej skali „powodziowości” danego

Pozostałe objaśnienia jak w Tab. 1.

Równanie to jest dobrze uwarunkowane i statystycznie istotne ($\alpha=1\%$; test F-Snedecora). To zaś dowodzi, iż prawidłowości w relacjach między: WWQ , WWQ , K i A , zidentyfikowane w skali globalnej i kontynentalnej, są również istotne w skali regionalnej. Należy dodać, że formuła powyższa jest ważna wyłącznie w przedziale WWQ : 20-300 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ i dla K od 0,5 do 2,5.

roku na danym obszarze (tu w środkowej Polsce), ale także na zbadanie jej zmienności w skali wielolecia (Bartnik, Jokiel, 2012b). Formuła indeksu wysokiej wody przedstawia się następująco:

$$IWW_k = W_k \times \sum_{j=1}^N K_{jk} \quad (5)$$

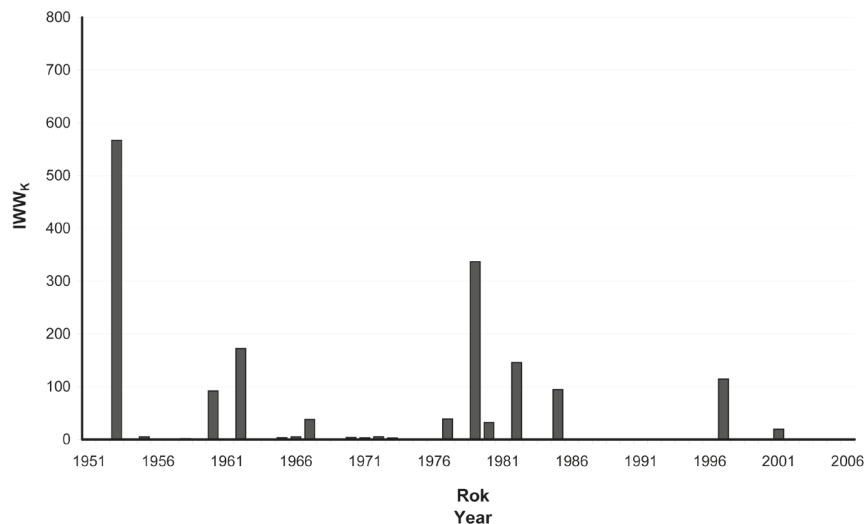
gdzie:

IWW_k – indeks wysokiej wody dla roku „ k ” i danego obszaru (tu: środkowej Polski),

W_k – wskaźnik wysokiej wody dla roku „ k ” w środkowej Polsce,

K_{jk} – indeks powodziowości Françou-Rodiera w rzece „ j ” i roku „ k ”,

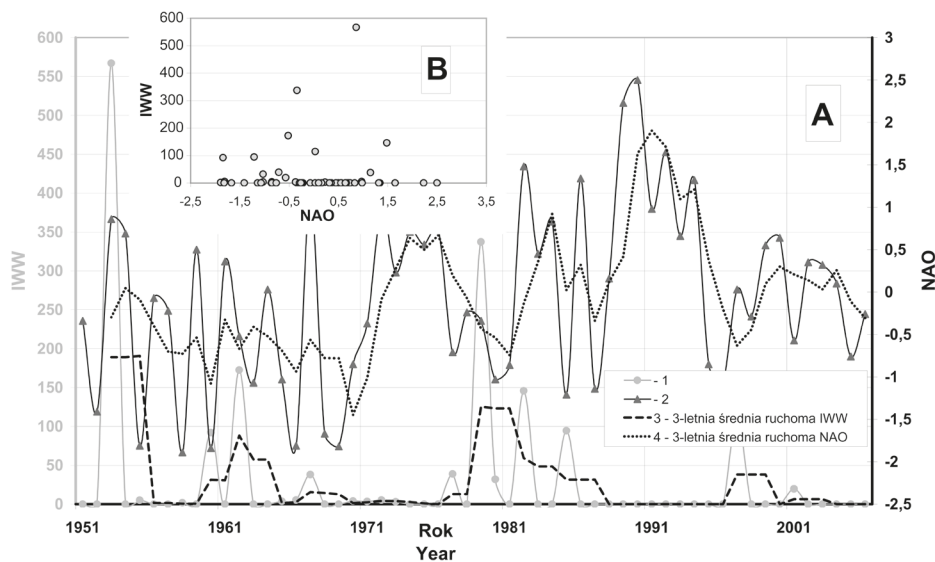
N – liczba badanych przekrojów wodowskazowych; tu 71.



Rycina 9. Indeksy powodziowości (IWW_k) środkowej Polsce w przekroju wieloletnim
 Figure 9. Flood indexes (IWW_k) in the central Poland in the multiyear period

Biorąc pod uwagę liczbę i skalę zdarzeń WWQ, za najbardziej powodziowe w środkowej Polsce, w drugiej połowie XX wieku, uznać należy lata 1953 i 1979, a biorąc pod uwagę dłuższy okres: lata 1977-1985. Nato-

miast okresy: 1967-1976 i 1986-1996 były w tym względzie bardzo „spokojne”. Obraz ten różni się wyraźnie od zidentyfikowanego dla całej Polski (Bartnik, Jokiel, 2014). Podstawowa różnica dotyczy lat: 1953 i 1997.



Rycina 10. Roczny indeks oscylacji północnoatlantyckiej NAO i indeks wysokiej wody IWW obliczony dla obszaru środkowej Polski w przekroju wieloletnim

Objaśnienia: A – dynamika rocznego indeksu Oscylacji Północnoatlantyckiej NAO i indeksu wysokiej wody IWW w wieloletniu; B – Korelacja NAO i IWW; Linia czerwona – 3-letnia średnia ruchoma NAO; Linia niebieska – 3-letnia średnia ruchoma IWW

Źródło: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/>; opracowanie własne

Figure 10. Annual North Atlantic Oscillation Index (NAO) and flood index IWW calculated on the central Poland territory in the multiannual period

Explanation: A – The comparison of the North Atlantic Oscillation (index NAO) and flood index IWW in the multiannual period; B – NAO and IWW correlation; Red line – 3-years NAO moving average; Blue line – 3-years IWW moving average

Source: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/>; author own work

Pierwszy rok, w środkowej Polsce był bardzo powodziowy, a w skali całego kraju, zaznaczył się słabo, natomiast drugi – odwrotnie. Jednocześnie lata 1967-1976, które w środkowej Polsce trudno uznać za powodziowe, w skali Polski zaznaczyły się wysokimi i częstymi wezbrzeniami. Spostrzeżenia te pozwalają wnioskować, że mimo stosunkowo niewielkiego obszaru i małego zróżnicowania klimatycznego częstość i skala wielkich wezbrań rzecznych jest w Polsce bardzo zróżnicowana regionalnie, a różnice te dobrze oddają regionalne indeksy wysokiej wody – *IWW*.

Badania niektórych autorów dowodzą, że szereg charakterystyk odpływu i cech reżimu rzecznych rzek Polski wykazuje w wieloleciu istotne powiązania korelacyjne lub krosskorelacyjne, a także różne formy zbieżności z indeksem oscylacji północno-atlantyckiej – *NAO* (Kaczmarek, 2003; Pociask-Karteczka i in., 2003a; 2003b; Pociask-Karteczka, 2011; Wrzesiński, 2010, 2011, 2013.). Diagramy zamieszczone na Ryc. 8. wskazują jednak, że powiązania między rocznym indeksem *NAO* (źródło: Climate Analysis Section, 2011) i indeksem *IWW* uzyskanym dla środkowej Polski są niezbyt wyraźne i trudno je sprowadzić do pro-

tych zależności korelacyjnych. Współczynniki korelacji i krosskorelacji (przesunięcie o 1 rok) między indeksami są bardzo niskie i nieistotne statystycznie, nawet na poziomie 10% – por. Ryc. 8B.

Analizując zmiany indeksu *NAO* w drugiej połowie XX wieku, można dostrzec 4 różnej długości fazy:

- 1951-1971 – faza silnie ujemna (niestabilna),
- 1972-1988 – faza przejściowa (niestabilna),
- 1989-1995 – faza silnie dodatnia (stabilna),
- 1996-2006 – faza przejściowa (stabilna) – por. rys. 8A.

Wyróżnione wcześniej i widoczne na diagramie 8A okresy wysokich (1963-1967, 1978-1985, 1996-2002) i niskich *IWW* (1968-1977, 1986-1995, 2003 i dalej) bardzo słabo korelują z tymi okresami, choć dodatnim i wzrostowym fazom *NAO* zdają się towarzyszyć okresy bez wezbrań ekstremalnych, a ujemnym – okresy wysokich *IWW* (częste i ekstremalnie wysokie wezbrania). Wydaje się również, że indeks *IWW* w drugiej połowie XX wieku był coraz mniejszy, a zatem skala i częstość wielkich wezbrań w rzekach środkowej Polski także malały. Pojawia się więc pytanie: czyżby „życiowe rekordy” rzek tego regionu zostały już ustanowione?

4. Wnioski

Dostrzeżone w toku analiz prawidłowości można sprowadzić do kilku wniosków o różnej skali ogólności:

- w piętnastoleciu 1951-1966, w środkowej Polsce zanotowano ponad 45% wszystkich *WWQ* zanotowanych w drugiej połowie XX wieku. Biorąc pod uwagę fakt, że był to w tej części Polski także okres częstych, długich i głębokich niżówek oraz susz hydrologicznych, wielolecie to jawi się tu jako bardzo „kontrastowe”,
- w układzie sezonowym, najwięcej *WWQ* wystąpiło w półroczach chłodnych (styczeń, marzec) oraz w dwu miesiącach letnich (lipiec i sierpień). W miesiącach jesiennych i wczesnozimowych (od września do grudnia), *WWQ*, w środkowej Polsce, nie wystąpiły ani razu,
- regresyjna zależność *WWQ* od powierzchni zlewni, opisana formułą (1) jest statystycznie istotna i może być użyteczna do szacowania

przepływów maksymalnych w przekrojach niekontrolowanych środkowej Polski,

- maksymalne odpływy jednostkowe są w środkowej Polsce niezbyt zróżnicowane: od 23 do 228 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Wartości te można uznać za reprezentatywne ekstrema regionalne, ale wyłącznie dla badanego przedziału powierzchni zlewni. W zlewniach tego obszaru, maksymalne odpływy jednostkowe (*WWQ*) bardzo wolno maleją wraz ze wzrostem powierzchni zlewni (por. Ryc. 6),
- w świetle indeksu Françou-Rodiera (*K*), zagrożenie powodziąmi opadowymi i mieszanymi w dolinach dużych i małych rzek środkowej Polski jest niewielkie,
- prawidłowości w relacjach między: *WWQ*, *WWQ*, *K* i *A*, zidentyfikowane wcześniej w skali globalnej, kontynentalnej i krajowej, są również widoczne w odniesie-

- niu do obszaru środkowej Polski (w skali regionalnej),
- mimo stosunkowo niewielkiego obszaru i małego zróżnicowania klimatycznego, częstość i skala wielkich wezbrań rzecznych w Polsce jest bardzo zróżnicowana regionalnie, a różnice te dobrze oddają regionalne indeksy wysokiej wody – *IWW*. W drugiej połowie XX. wieku, indeks *IWW* środkowej Polski malał, co dowodzi, że skala i częstość wielkich wezbrań w rzekach tego regionu również malały (por. Ryc. 9),
 - powiązania między rocznym indeksem *NAO* i obliczonym dla środkowej Polski indeksem *IWW* są niewyraźne i nie da się ich sprowadzić do prostych zależności korelacyjnych. Współczynniki korelacji i krosskorelacji (przesunięcie o 1 rok) są bardzo niskie i nieistotne statystycznie.

Literatura

- Abrahamson B.T., 2010. Probable maximum flood estimator for British Columbia. Agriculture and Agri-Foods Canada. Agri-Environment Services Branch, s. 1- 35.
- Biondić D., Barbačić D., Petraš J., 2007. Creager and Françou-Rodier envelope curves for extreme floods in the Danube River basin in Croatia. Predictions in Ungauged Basins: PUB Kick-off. Proceedings of the PUB Kick-off meeting held in Brasilia, 20–22 November 2002. IAHS Publ. 309, s. 221-228.
- Bryndal T. 2009. Przepływy maksymalne odnotowane podczas gwałtownych wezbrań, spowodowanych krótkotrwałymi ulewnymi opadami deszczu w małych zlewniach karpaccich. [W:] Bogdanowicz R., Fac-Beneda J. (red), Zasoby i ochrona wód. Gdańsk, s. 329-334.
- Bryndal T., Cabaj W., Ciupa T., 2008. Gwałtowne wezbrania małych cieków w Niece Nidziańskiej. Przegląd Geograficzny, 80, 1, s. 127-146.
- Bartnik A., Jokiel P., 2007. Odpływy maksymalne i indeksy powodziowości rzek europejskich. Gospodarka Wodna, 1, s. 28-32.
- Bartnik A., Jokiel P., 2008. Odpływy maksymalne i indeksy powodziowości rzek półkuli północnej. Przegląd Geograficzny, 80, 3, s. 343-365.
- Bartnik A., Jokiel P., 2012a. Geografia wezbrań i powodzi rzecznych. Wyd. UŁ, Łódź.
- Bartnik A., Jokiel P., 2012b. Indeksy powodziowości (Françou-Rodiera) i indeksy wysokiej wody w Karpatach i na Nizinach, w przekroju wieloletnim. Gospodarka Wodna, 5, s. 204-208.
- Bartnik A., Jokiel P., 2014. Maximum discharges and maximum runoffs in Poland. [In:] Koboжек E., Marszał T. (eds.), Natural Environment of Poland and its Protection in Łódź. Geographical Research. Łódź University Press, Łódź, s. 43-73.
- Ciepielowski A., 1973. Przegląd wzorów empirycznych do określania maksymalnych przepływów letnich. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Warszawie. Melioracje Rolne, 12, s. 87-110.
- Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, Hurrell, 1995, aktualizacja: grudzień 2011, (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/>).
- Fal B., 1993. Zmienność odpływu z obszaru Polski w bieżącym stuleciu. Wiadomości IMGW, 16, s. 3-20.
- Fal B., 1997. Przepływy charakterystyczne głównych rzek polskich w latach 1951-1990. Materiały Badawcze IMGW, Seria Hydrologia i Oceanologia, 21, IMGW, Warszawa.
- Françou J., Rodier J., 1969. Essai de classification des crues maximales. IAHS/UNESCO/WMO, s. 518-527.
- Jokiel P., 1994. Zasoby, odpływ i odnawialność wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. Acta Geogr. Lodz., 66-67, Wyd. ŁTN, Łódź.
- Jokiel P., 2004. Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku. Wyd. UŁ, Łódź.
- Jokiel P. (red.), 2015. Metody statystyczne w badaniach hydrologicznych środkowej Polski, Wyd. UŁ, s. 290.
- Jokiel P., Stanisławczyk B., 2012. Roczne odpływy maksymalne i minimalne w dorzeczu Odry i Wisły, w przekroju wieloletnim. Czasopismo Geograficzne, 83, 3-4. Wrocław, s. 133-143.
- Kaczmarek Z., 2003. The impact of climate variability on flood risk in Poland. Risk Anal. 23 (3), s. 559-566.
- Pociask-Karteczka J., Niecarz Z., Limanówka D., 2003a. Prediction of hydrological extremes by air circulation indices. IAHS Publ. 280, s. 134-141.

- Pociask-Karteczka J., Limanówka D., Nieckarz Z, 2003b. Wpływ oscylacji północnoatlantyckiej na przepływy rzek karpaccich. *Folia Geogr. ser. Geogr.-Phys.*, 33-34, 89-104.
- Pociask-Karteczka J., 2011, River runoff response to climate changes in Poland (East-Central Europe), , IAHS Publ. 344, 182-187.
- Stachý J., Biernat B., Dobrzyńska I., 1979. Odpływ rzek polskich w latach 1951-1970, *Materiały Badawcze IMGW, Seria Specjalna*, 6. Warszawa, s.124.
- Stachý J., 2011, Występowanie lat mokrych i posusznych w Polsce (1951-2008). *Gospodarka Wodna*, 8, s. 313-321.
- Wrzesiński D., 2010. Odpływ rzek w Polsce w różnych fazach Oscylacji Północnoatlantyckiej. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią*, R. I, A(A61), Poznań, s. 129-144.
- Wrzesiński D., 2011. Regional differences In the influence of the North Atlantic Oscillation on seasonal river runoff In Poland. *Quaestiones Geographicae* (30), 3, s. 127-136.
- Wrzesiński D., 2013. Entropia odpływu rzek w Polsce. *Studia i Prace z Geografii i Geologii* 33 (1), Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań, s. 204.