

# UWARUNKOWANIA I ZMIENNOŚĆ NIŻÓWEK RZECZNYCH W WYBRANYCH REGIONACH GEOGRAFICZNYCH POLSKI W LATACH 1989–2018

## Determinants and variability of river low-flows in selected geographical regions of Poland in the period 1989–2018

MALWINA KOZEK-POŁOMSKA<sup>1</sup> , EDMUND TOMASZEWSKI<sup>1</sup> 

**Zarys treści.** Celem opracowania była identyfikacja i ocena zmienności niżówek rzecznych w pięciu dużych zlewniach w Polsce, które z uwagi na wielkość i położenie odzwierciedlają wiodące cechy regionów fizycznogeograficznych, w których się znajdują. Do badań wytypowano 92 przekroje wodowskazowe posiadające serie przepływów dobowych z okresu 1989–2018. Dane zaczerpnięto z bazy IMGW-PIB. Niżówki zidentyfikowano w oparciu o stały w wieloletnim przepływie graniczny, odpowiadający 70. percentylowi z krzywej czasów trwania przepływu wraz z wyższymi. Ocenie poddano wieloletnią i sezonową zmienność czasów trwania niżówek oraz niedoborów odpływu niżówkowego, a także ich miar pochodnych. Przeprowadzone analizy wykazały związek rozkładu opadów i struktury bilansu wodnego z przeciętnym czasem trwania oraz liczbą zidentyfikowanych epizodów. Wskazano na specyficzne cechy zlewni determinujące rozwój przepływów niżówkowych. Wynikały one przede wszystkim z cech struktury hydrogeologicznej i hydrograficznej zlewni, pokrycia terenu i natężenia ewapotranspiracji. Zwrócono uwagę na kształtowanie sezonowych cech niżówek rzecznych, zarówno w aspekcie ich genezy, jak i dynamiki rozwoju. Zidentyfikowano główne czynniki antropogeniczne oddziałujące na przebieg przepływów niżówkowych.

**Słowa kluczowe:** zmiany wieloletnie, zmiany sezonowe, trendy, niedobory odpływu

**Abstract.** The aim of the study was an identification and variability assessment of river low-flows in five big catchments in Poland that, due to their size and location, reflect the predominant features of the physico-geographical regions in which they lie. There were 92 gauging cross-sections with daily discharge series selected in the period 1989–2018. The data were taken from the database of Polish Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute. Low-flows were identified on the base of the Threshold Level Method where truncation discharge corresponded to the 70th percentile on the Flow Duration Curve. During analysis, multiannual and seasonal variability of low-flow duration, streamflow deficit and their derived characteristics were assessed. The research showed the relationship of precipitation distribution and water balance structure with average low-flow duration and the number of identified episodes. Specific features of catchments determining low flows development were indicated. They resulted primarily from features of the catchment hydrogeological and hydrographic structure, land cover and evapotranspiration intensity. Attention was paid to shaping seasonal features of low-flows both in terms of their origin and the dynamics of development. The main anthropogenic factors have been identified which affect the course of low-flows.

**Key words:** multiannual changes, seasonal changes, trends, streamflow deficits

## Wstęp

Zagadnieniu niżówek rzecznych poświęcono w literaturze przedmiotu już dużo uwagi. Dzieje się tak dlatego, że wiele cech reżimu przepływów niżówkowych, tempa rozwoju niżówki oraz jej objętości jest bardzo dobrym estymatorem wielu

procesów hydrologicznych realizujących się w zlewni, zwłaszcza w tak zwanej fazie reżimu własnego. Dzięki dobremu rozpoznaniu tego zjawiska możliwa jest ocena zasobów wodnych zlewni, prognozowanie przepływu w warunkach

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Klimatologii i Hydrologii, Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej; ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: malwina.kozek@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0001-7743-6636; e-mail: edmund.tomaszewski@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0003-4375-3638

braku zasilania oraz identyfikacja wielu cech zasilania podziemnego rzek, a także struktur hydrogeologicznych pozostających z nimi w kontakcie hydraulicznym (Jokiel 1994; Mukhawana i in. 2024). Ponadto ocena niżówek rzecznych niesie wiele korzyści związanych z działaniem urządzeń i systemów gospodarki wodnej, na przykład przy eksploatacji ujęć wody lub projektowaniu strategii łagodzenia skutków suszy.

Niżówka rzeczna jest jednym z lepszych estymatorów rozwoju suszy hydrologicznej w zlewni, gdyż stanowi ostatnią fazę reakcji zlewni na niedobory zasilania (Tokarczyk 2010; Tomaszewski 2012). W odniesieniu do powszechnie przyjętego schematu suszy, omawiany etap pojawia się w konsekwencji wcześniejszego rozwoju suszy atmosferycznej i glebowej (Sene 2010). Proces rozwoju suszy jest zazwyczaj długotrwały i często przerywany impulsami zasilającymi zlewnię w postaci opadów lub roztopów. W przeciwieństwie do wskaźników oceny suszy hydrologicznej bazujących na ocenie rozkładu opadów lub ich relacji w stosunku do różnych form parowania i ewapotranspiracji (na przykład SPI, EDI, PDSI) (Ogunrinde i in. 2020; Yildirim i in. 2022; Dhawale i in. 2023; Han, Singh 2023) procedury oparte na ocenie niżówek rzecznych są dużo bardziej precyzyjne w identyfikacji terminów początku i końca suszy oraz dynamiki jej rozwoju, lecz jednocześnie są bardziej pracochłonne i wymagają obszernej bazy danych z posterunków obserwacyjnych oraz przyjęcia odpowiednich założeń uwzględnianych przy interpretacji wyników (Cammalleri i in. 2017; Poshtiri i in. 2018; Teutschbein i in. 2022). W przypadku susz hydrologicznych rozwijających się w ujemnych temperaturach powietrza, powodujących odcięcie zasilania wód podziemnych przez akumulację zasobów wodnych w pokrywie śnieżnej, analiza niżówek rzecznych jest praktycznie jedynym wiarygodnym estymatorem rozwoju suszy (Laaha 2002; Pfister i in. 2006; Dierauer i in. 2021).

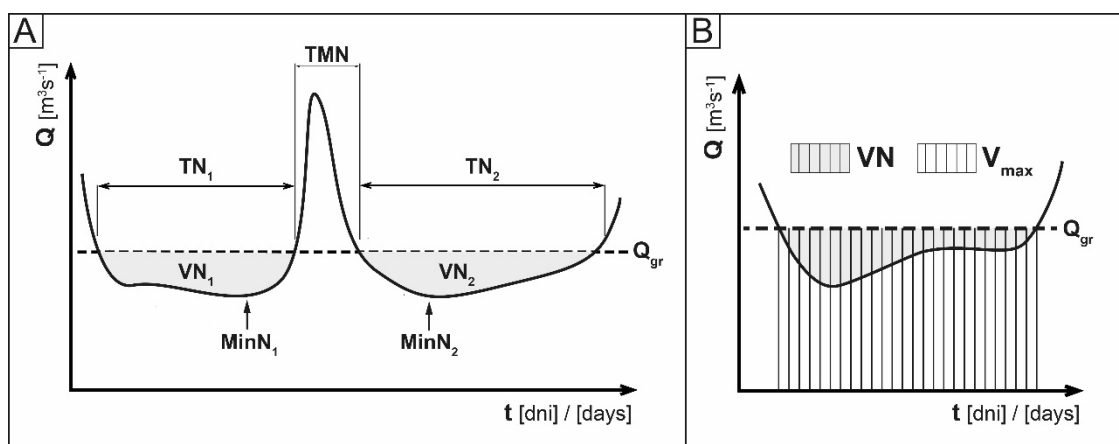
Bardzo ważnym zagadnieniem w ocenie suszy hydrologicznej jest aspekt przestrzenny, ponieważ identyfikacja niżówek rzecznych zdeterminowana jest układem sieci rzecznej oraz lokalizacją posterunków wodowskazowych. Wywołuje to oczywiste trudności związane z interpolacją lub ekstrapolacją wyników oraz przyjmowaniem przekrojów wodowskazowych uznanych za reprezentatywne. Przykładem może być opracowanie Farata i współautorów (1995), gdzie zasięg i cechy susz hydrologicznych w Polsce oceniono na podstawie identyfikacji niżówek rzecznych w pojedynczych przekrojach wodowskazowych roz-

mieszczonych na terenie całego kraju. W ostatnich latach Kozek i Tomaszewski (2019, 2022) zaczęli badać niżówki rzeczne i susze hydrologiczne w zlewniach posiadających po kilkanaście posterunków wodowskazowych w celu identyfikacji kierunków ich rozwoju oraz oceny wewnątrzlewniowej zmienności reżimu przepływów niżówkowych. Wyniki wskazały na różnokierunkowe uwarunkowania badanych zjawisk, co dowodzi konieczności dalszego studiowania tego zagadnienia w szerszym spektrum warunków fizycznogeograficznych.

Celem niniejszego opracowania jest identyfikacja oraz ocena wieloletniej i sezonowej zmienności niżówek rzecznych, a także ich uwarunkowań w zlewniach, które z uwagi na wielkość i położenie odzwierciedlają wiodące cechy regionów fizycznogeograficznych, w których się znajdują. Ponadto przyjęto, że materiał hydrometryczny dostępny dla tych zlewni będzie na tyle obszerny (od 15 do 24 przekrojów wodowskazowych w każdej zlewni), aby możliwa była ocena wewnątrzlewniowej zmienności i uwarunkowań kształtowania się niżówek rzecznych.

## Metoda opracowania

Generalnie za niżówkę rzeczną przyjmuje się okres niskich przepływów (stanów wody) w rzece lub przepływów utrzymujących się w „suchych warunkach pogodowych” (Dębski 1970; Smakhtin 2001). Ustalenie dokładnej definicji tego zjawiska zależy od zastosowanego podejścia badawczego. Bardzo duże uznanie i popularność znalazła w literaturze przedmiotu metoda bazująca na identyfikacji przepływu granicznego (*Threshold Level Method*). W tym podejściu niżówka definiowana jest jako okres, w którym przepływy układają się poniżej przyjętej wartości progowej (Yevjevich 1967; Ozga-Zielińska 1990; Hisdal i in. 2004). Wartości graniczne można szacować na podstawie przepływów głównych II stopnia, przepływów okresowych z krzywej czasów trwania przepływów, analizy rozkładu minimów rocznych lub przepływów umownych przystosowanych do określonych zadań gospodarki wodnej oraz ochrony i kształtowania środowiska. Ostatnie dekady pokazały, iż szczególne uznanie w tym zakresie znalazło podejście związane z krzywą czasu trwania przepływów wraz z wyższymi (FDC – *Flow Duration Curve*). Prowadzono wiele badań symulacyjnych, z których wynika, że najlepsze przepływy graniczne dla niżówek uzyskuje się, stosując percentyle z przedziału 70–95% (Hisdal



Rys. 1. Podstawowe parametry niżówki rzecznej (A) oraz graficzna ilustracja obliczania względnego deficytu odpływu niżówkowego (B) (Tomaszewski 2012, zmienione)

$Q$  – przepływ [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>],  $t$  – czas [dni],  $Q_{gr}$  – przepływ graniczny niżówki [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>],  $VN$  – objętość niedoboru odpływu niżówkowego [m<sup>3</sup>],  $TN$  – czas trwania niżówki [dni],  $TMN$  – odstęp międzyniżówkowy [dni],  $MinN$  – minimalny przepływ niżówki [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>],  $1,2$  – numer kolejnej niżówki,  $V_{max}$  – objętość maksymalnego niedoboru odpływu niżówkowego w danym okresie, to znaczy takiego, w którym rzędna przepływu rzecznoego wynosi 0 [m<sup>3</sup>]

Basic parameters of low-flow (A) and graphical illustration of a relative drought streamflow deficit estimation (B) (Tomaszewski 2012, changed)

$Q$  – discharge [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>],  $t$  – time [days],  $Q_{gr}$  – threshold level [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>],  $VN$  – streamflow deficit volume [m<sup>3</sup>],  $TN$  – low-flow duration [days],  $TMN$  – inter-low-flow spacing [days],  $MinN$  – minimal low-flow discharge [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>],  $1,2$  – number of successive low-flow,  $V_{max}$  – maximum possible streamflow deficit volume during investigated period, i.e. when discharge value is equal to 0 [m<sup>3</sup>]

i in. 2001, 2004; Smakhtin 2001; Hisdal 2009). Elastyczność w doborze kryterium oraz fakt wykorzystywania pełnej informacji hydrologicznej płynącej z kształtu krzywej czasu trwania przepływu sprawia, iż to podejście znajduje coraz więcej zwolenników na świecie i w Polsce (Zelenhasic, Salvai 1987; Tallaksen i in. 1997; Dubicki 2002; Ciepeliowski, Kaznowska 2007; Fleig i in. 2010; Kasprzyk 2010; Tabrizi i in. 2010; Hannaford i in. 2011; Tomaszewski 2012; Tokarczyk 2013; Raczyński, Dyer 2020; Choi i in. 2022).

W celu eliminacji epizodów przypadkowych konieczne jest arbitralne przyjęcie minimalnego czasu trwania niżówki. Wartość tę określa się subiektywnie, biorąc głównie pod uwagę wielkość i cechy fizycznogeograficzne zlewni. W literaturze przedmiotu najczęściej przyjmowane są wartości z przedziału 5–10 dni (Tomaszewski 2012). Oprócz tego należy wyznaczyć maksymalny czas nieprzerwywany epizodu niżówkowego. Należy bowiem zwrócić uwagę, że rozwijająca się niżówka może zostać na krótko przerwana impulsem opadowym lub roztopowym. W efekcie tego przepływ podniesie się na jakiś czas powyżej wartości progowej. Jeśli zlewnia znajduje się w tym czasie w fazie suszy glebowej lub hydrologicznej, to krótkotrwały opad nie zasili zbiorników wód podziemnych, lecz drogą powierzchniową lub podpowierzchniową szybko trafi do cieku.

W efekcie na hydrogramie przepływu obserwuje się niewielką falę wezbraniową, po przejściu której przepływ szybko powraca do poziomu sprzed impulsu zasilającego. Można stąd wnosić, że ten sam epizod niżówkowy jest kontynuowany. Zacytowani powyżej Autorzy przyjmowali ten okres w przedziale 1–5 dni.

W nawiązaniu do powyższych uwag identyfikację niżówek przeprowadzono w oparciu o kryterium statystyczne, przyjmując za niżówkę okres, w którym przepływy układały się poniżej wartości granicznej, odpowiadającej 70. percentylowi z krzywej czasów trwania przepływu wraz z wyższymi ( $Q_{70\%}$ ). Za minimalny czas trwania niżówki przyjęto 7 dni, a niżówki rozdzielone przerwą nieprzekraczającą 3 dni traktowano jako zdarzenia jednorodnie genetycznie. W oparciu o te kryteria dokonano identyfikacji niżówek w badanej grupie przekrojów wodowskazowych w wybranych zlewniach i oszacowano ich podstawowe parametry – czas trwania oraz objętość niedoboru odpływu niżówkowego (rys. 1A).

Czas trwania niżówki określono z różnicy między datą jej rozpoczęcia i zakończenia. Z kolei objętość niżówki została oszacowana w oparciu o ilość wody brakującej do rzędnej odcięcia podczas jej trwania:

$$VN = (Q_{gr} - Q_{\acute{s}r}) \cdot TN \quad (1)$$

gdzie:

$V_N$  – objętość niedoboru odpływu niżówkowego [ $m^3$ ],

$Q_{gr}$  – przepływ graniczny niżówki [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],

$Q_{sr}$  – przepływ średni w czasie trwania niżówki [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],

$T_N$  – czas trwania niżówki [dni].

Obliczone niedobory odpływu niżówkowego przekształcone zostały do postaci deficytu względnego (DWN), dzięki czemu możliwe było porównywanie wyników uzyskiwanych dla zlewni o różnych powierzchniach (Tomaszewski 2012). Prezentowaną charakterystykę oblicza się według wzoru:

$$DWN = \frac{V_N}{V_{max}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

DWN – deficyt względny odpływu niżówkowego [%],

$V_N$  – objętość niedoboru odpływu niżówkowego [ $m^3$ ],

$V_{max}$  – objętość maksymalnego możliwego niedoboru odpływu niżówkowego w danym okresie, to znaczy takiego, w którym rzędna przepływu rzecznoego wynosi 0 [ $m^3$ ].

Miara ta waloryzuje natężenie zjawiska suszy oraz wskazuje na stopień zdrenowania zasobów zlewni pozostających w związku hydraulicznym z przepływem niżówkowym. Istotny jest fakt, iż przy wartości DWN równej 100% w korycie nie powinien zachodzić już przepływ (rys. 1B).

Dodatkowo dokonano oceny częstotliwości występowania niżówek rzecznych, posługując się wskaźnikiem ich gęstości (WGN) opracowanym przez Tomaszewskiego (2012). W tym celu konieczne było obliczenie odstępów międzynieżówkowych (TMN), czyli liczby dni między kolejnymi okresami niżówkowymi. Wskaźnik WGN wyznaczono za pomocą wzoru:

$$WGN = \frac{\overline{srTMN}}{\overline{srTN}} \quad (3)$$

gdzie:

WGN – wskaźnik gęstości niżówek,

$\overline{srTMN}$  – średni odstęp międzynieżówkowy [dni],

$\overline{srTN}$  – średni czas niżówki [dni].

Charakterystyka ta pozwala na śledzenie wzrostu bądź spadku częstości niżówek. Wskazuje, na ile przeciętnie przerwy między niżówkami są dłuższe od samych epizodów niżówkowych. Ponadto WGN może dostarczyć wiele cennych informacji o reżimie przepływów niżówkowych, głównie w odniesieniu do struktury cza-

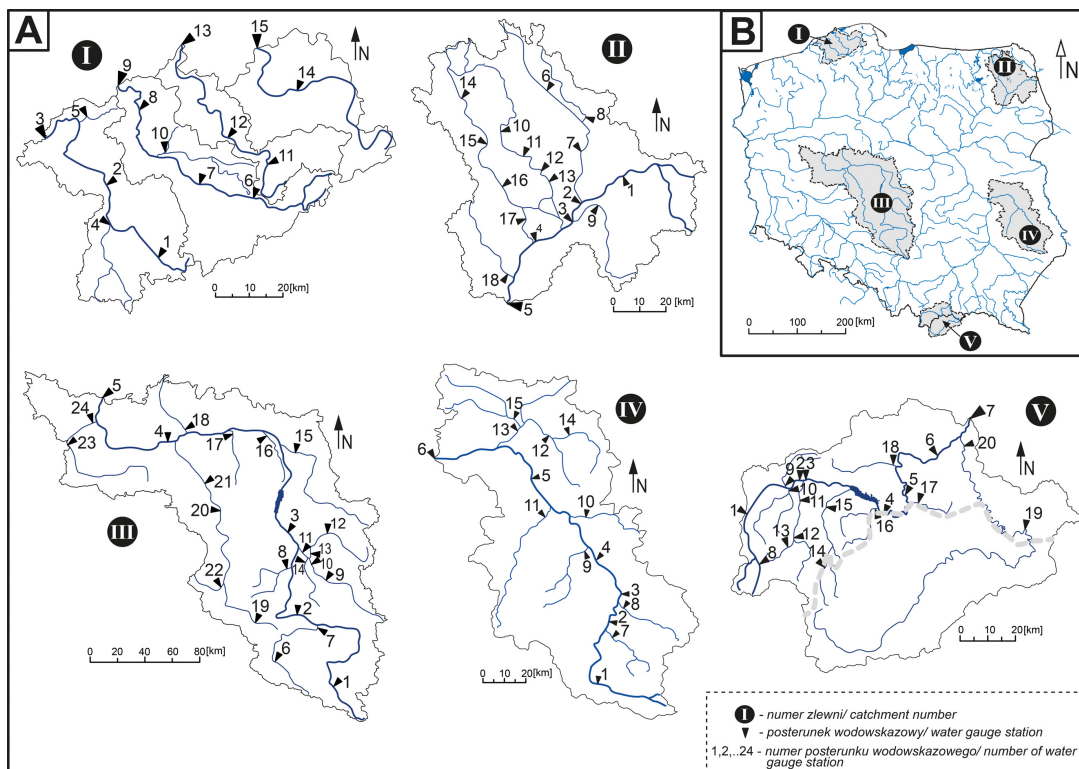
sowej tego zjawiska, bez względu na długość okresu obserwacyjnego.

## Material liczbowy i obszar badań

Badanie przeprowadzono w oparciu o wieloletnie serie przepływów dobowych pozyskanych z IMGW-PIB. Okres badawczy stanowiły lata 1989–2018. Charakteryzowały się one dużą dynamiką warunków hydrometeorologicznych. Początek i koniec badanego wielolecia (lata 1989–1992 oraz 2015–2016), a także rok 2003 odznaczały się rozwojem szczególnie surowych i dotkliwych susz oraz niżówek rzecznych (Bobiński, Meyer 1992; Jańczak i in. 1994; Chelmiński, Bienkowski 2005; Tomaszewski 2012; Tokarczyk i in. 2022). Z kolei koniec lat 90. XX wieku i początek XXI wieku charakteryzowały znaczące okresy wezbraniowe, z kulminacjami powodziowymi w roku 1997 i 2010.

Materiał badawczy pochodził z 92 posterunków wodowskazowych zlokalizowanych w pięciu zlewniach położonych w różnych regionach geograficznych Polski. Należą do nich zlewnie Przymorza, zlewnia Biebrzy po Burzyn, Warty po Poznań, Wieprza po Kołmin oraz Dunajca po Nowy Sącz (rys. 2; tab. 1). W każdej zlewni wytypowano od 15 do 24 posterunków wodowskazowych w celu oceny przestrzennych uwarunkowań struktury czasowej niżówek oraz wielkości niedoborów odpływu niżówkowego. Zlewnie cząstkowe zamknięte tymi przekrojami odzwierciedlały możliwie szeroki zakres warunków fizycznogeograficznych, istotnie wpływających na reżim przepływów niżówkowych, zarówno w aspekcie zmiennych hydrometeorologicznych, jak również ich cech stacjonarnych związanych z rzeźbą, warunkami hydrogeologicznymi czy stopniem jeziorności. Ponadto zlewnie te charakteryzuje różny stopień zaawansowania i kierunek rozwoju gospodarki wodnej.

Badane zlewnie cechują się odmiennymi warunkami opadowymi. Największe średnie roczne sumy opadów obserwuje się w zlewni Dunajca, gdzie wahają się one od ponad 800 mm w jej dolnej części do 1800 mm w części górnej (Kozuchowski 2017). Różnica między opadem atmosferycznym a ewapotranspiracją potencjalną, zwana klimatycznym bilansem wodnym (KBW), jest tutaj dodatnia, a jej średnia wartość sięga 100 mm (Wibig 2017). Wysokimi w skali Polski średnimi rocznymi sumami opadów charakteryzują się również zlewnie Przymorza, gdzie w ich źródłowych częściach (wzniesienia morenowe Pojezierza Po-



Rys. 2. Obszar badań

I – zlewnia Przymorza; II – zlewnia Biebrzy, III – zlewnia Warty, IV – zlewnia Wieprza, V – zlewnia Dunajca; numer posterunku wodowskazowego zgodny z Tabelą 1

Study area

I – Pomeranian rivers catchments, II – Biebrza River catchment, III – Warta River catchment, IV – Wieprza River catchment, V – Dunajec River catchment; number of water gauging station in accordance with Table 1

Tabela 1

Wybrane charakterystyki niżówek rzecznych w badanych zlewniach w latach 1989–2018  
Selected characteristics of river low-flows in studied catchments in the years 1989–2018

| Zlewnia/<br>River catchment                              | Nr/<br>No.                                     | Posterunek<br>wodowskazowy/<br>Water gauge<br>station | Rzeka/<br>River | A<br>[km <sup>2</sup> ] | Q <sub>70%</sub><br>[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | śrTN<br>[dni]/<br>avgTN<br>[days] | śrWGN/<br>avgWGN | śrVN<br>[tys. m <sup>3</sup> ]/<br>avgVN<br>[th. m <sup>3</sup> ] | śrDWN/<br>avgDWN<br>[%] |     |
|--|--|---|-----------------|-------------------------|--|-----------------------------------|------------------|---|-------------------------|-----|
| Zlewnia<br>Wieprzy/<br>Wieprza<br>river<br>catchment     | 1  | Kwisno  | Wieprza         | 96,4                    | 0,38   | 35                                | 2,93             | 198,6   | 12,5                    |     |
|  | 2  | Korzybie  | Wieprza         | 859,6                   | 7,49   | 36                                | 2,53             | 2848,0  | 8,0                     |     |
|  | 3  | Stary Kraków  | Wieprza         | 1518,7                  | 12,30  | 30                                | 2,67             | 4242,0  | 9,0                     |     |
|  | 4  | Ciecholub   | Studnica        | 315,7                   | 3,10   | 35                                | 2,48             | 1069,0  | 8,0                     |     |
|  | 5  | Pieszcz   | Moszczeniczka   | 67,6                    | 0,32   | 32                                | 2,62             | 208,0   | 18,0                    |     |
| Zlewnia<br>Słupi/<br>Słupia<br>river<br>catchment        | 6  | Soszyca   | Słupia          | 276,3                   | 2,36   | 45                                | 2,48             | 1291,0  | 10,0                    |     |
|  | 7  | Gałążna Mała  | Słupia          | 769,7                   | 6,65   | 30                                | 3,03             | 3208,0  | 16,0                    |     |
|  | 8  | Słupsk  | Słupia          | 1450,4                  | 12,90  | 29                                | 2,82             | 4568,8  | 10,5                    |     |
|  | 9  | Charnowo  | Słupia          | 1598,7                  | 14,50  | 33                                | 2,86             | 5371,2  | 9,6                     |     |
| Zlewnia<br>Łupawy/<br>Łupawa<br>river<br>catchment       | 10   | Skarszów Dolny  | Skotawa         | 261,9                   | 2,47   | 34                                | 2,33             | 941,9   | 8,9                     |     |
|  | 11   | Zawiaty   | Łupawa          | 78,3                    | 0,71   | 42                                | 2,71             | 372,7   | 9,4                     |     |
|  | 12   | Łupawa  | Łupawa          | 441,3                   | 3,80   | 42                                | 2,61             | 1660,6  | 8,6                     |     |
| Zlewnia<br>Przymorza/<br>Pomeranian rivers<br>catchments | 13   | Smoldzino   | Łupawa          | 804,6                   | 7,34   | 39                                | 2,48             | 2605,8  | 7,0                     |     |
|  | Zlewnia<br>Łęby/<br>Łęba<br>river<br>catchment | 14  | Lębork 2        | Łęba                    | 552,0  | 4,99                              | 44               | 2,47  | 2509,6                  | 9,4 |
|  |  | 15  | Cecenowo        | Łęba                    | 1120,2   | 9,46                              | 40               | 2,44  | 4636,2                  | 9,3 |

|   |    |                    |                    |         |       |     |      |         |      |
|---|----|--------------------|--------------------|---------|-------|-----|------|---------|------|
| Zlewnia Biebrzy/<br>Biebrza river catchment | 1  | Sztabin            | Biebrza            | 846,0   | 2,10  | 67  | 2,36 | 4274,5  | 25,0 |
|   | 2  | Dębowo             | Biebrza            | 2322,4  | 6,90  | 60  | 2,38 | 10370,4 | 19,9 |
|   | 3  | Stare Dolistowo    | Biebrza            | 3064,2  | 8,81  | 56  | 2,34 | 11584,2 | 18,0 |
|   | 4  | Osowiec            | Biebrza            | 4365,1  | 11,60 | 68  | 2,35 | 21885,1 | 22,9 |
|   | 5  | Burzyn             | Biebrza            | 6900,4  | 19,60 | 83  | 2,35 | 42657,6 | 23,8 |
|   | 6  | Raczki             | Rospuda (Netta)    | 280,9   | 1,60  | 57  | 2,60 | 1258,3  | 12,1 |
|   | 7  | Białobrzegi        | Netta              | 980,6   | 3,68  | 49  | 2,49 | 4049,7  | 16,8 |
|   | 8  | Szczerba           | Szczeberka         | 376,8   | 0,49  | 58  | 2,35 | 883,9   | 25,1 |
|   | 9  | Karpowicze         | Brzozówka          | 649,8   | 1,47  | 45  | 2,41 | 2097,3  | 27,1 |
|   | 10 | Chelchy            | Lega (Jegrznia)    | 394,4   | 0,95  | 54  | 2,42 | 1313,5  | 21,6 |
|   | 11 | Kucze              | Lega (Jegrznia)    | 593,0   | 1,50  | 57  | 2,42 | 2464,1  | 24,3 |
|   | 12 | Rajgród            | Jegrznia           | 748,8   | 1,42  | 42  | 2,46 | 1585,0  | 24,3 |
|   | 13 | Woźnawieś          | Jegrznia           | 851,5   | 1,93  | 82  | 2,21 | 3856,5  | 20,9 |
|   | 14 | Małe Wronki        | Łażna Struga (Elk) | 258,0   | 1,06  | 96  | 2,33 | 2702,6  | 24,7 |
|   | 15 | Elk                | Elk                | 818,9   | 3,04  | 62  | 2,42 | 5191,0  | 24,4 |
|   | 16 | Prostki            | Elk                | 1155,5  | 4,28  | 60  | 2,35 | 5888,7  | 16,2 |
|   | 17 | Przechody          | Kanał Rudzki (Elk) | 1452,5  | 5,72  | 67  | 2,37 | 8956,1  | 19,1 |
|   | 18 | Czachy             | Wissa              | 487,8   | 1,29  | 40  | 2,42 | 1338,0  | 20,9 |
| Zlewnia Warty/<br>Warta river catchment     | 1  | Poraj              | Warta              | 390,3   | 1,41  | 50  | 2,47 | 1324,8  | 16,5 |
|   | 2  | Działoszyn         | Warta              | 4088,5  | 15,20 | 51  | 2,45 | 14991,4 | 13,9 |
|   | 3  | Sieradz            | Warta              | 8139,6  | 28,00 | 62  | 2,49 | 26711,0 | 12,3 |
|   | 4  | Nowa Wieś Podgórna | Warta              | 20762,8 | 55,60 | 46  | 2,44 | 49314,8 | 14,4 |
|   | 5  | Poznań             | Warta              | 25910,9 | 61,20 | 55  | 2,37 | 61524,2 | 14,5 |
|   | 6  | Niwki              | Liswarta           | 218,3   | 0,70  | 33  | 2,66 | 552,3   | 19,6 |
|   | 7  | Kule               | Liswarta           | 1557,0  | 4,10  | 46  | 2,42 | 4283,3  | 18,8 |
|   | 8  | Niechmirów         | Oleśnica           | 591,6   | 0,87  | 71  | 2,71 | 1592,0  | 18,9 |
|   | 9  | Szczerców          | Widawka            | 720,7   | 3,88  | 51  | 2,48 | 2555,0  | 10,5 |
|   | 10 | Rogóżno            | Widawka            | 1268,5  | 6,37  | 50  | 2,48 | 4458,1  | 10,6 |
|   | 11 | Podgórze           | Widawka            | 2354,5  | 8,64  | 46  | 2,51 | 6777,0  | 12,7 |
|   | 12 | Łask               | Grabia             | 471,5   | 1,12  | 61  | 2,52 | 1841,6  | 22,7 |
|   | 13 | Grabno             | Grabia             | 810,7   | 1,76  | 53  | 2,37 | 2341,9  | 20,1 |
|   | 14 | Widawa             | Nieciecz           | 241,9   | 0,18  | 76  | 2,37 | 653,5   | 42,2 |
|   | 15 | Dąbie              | Ner                | 1712,5  | 5,44  | 41  | 2,66 | 5831,5  | 20,8 |
|   | 16 | Kościelec          | Kielbaska          | 476,1   | 2,01  | 59  | 2,56 | 2302,5  | 16,1 |
|   | 17 | Posoka             | Powa               | 331,5   | 0,36  | 54  | 2,43 | 803,41  | 35,0 |
|   | 18 | Samarzewo          | Wrześnica          | 360,5   | 0,28  | 71  | 2,41 | 639,9   | 29,5 |
|   | 19 | Gorzów Śląski      | Prosna             | 163,7   | 0,41  | 45  | 2,42 | 407,4   | 18,3 |
|   | 20 | Piwonice           | Prosna             | 2938,2  | 4,98  | 52  | 2,35 | 6496,0  | 19,3 |
|   | 21 | Bogusław           | Prosna             | 4303,5  | 6,80  | 47  | 2,37 | 8260,3  | 20,9 |
|   | 22 | Kuźnica Skakawska  | Niesób             | 246,0   | 0,46  | 53  | 2,41 | 747,8   | 22,3 |
|   | 23 | Kościan            | Kanał Kościański   | 1247,3  | 1,19  | 62  | 2,41 | 2886,3  | 30,3 |
|   | 24 | Mosina             | Kanał Mosiński     | 2491,8  | 2,18  | 105 | 2,37 | 8806,2  | 32,2 |
| Zlewnia Wieprza/<br>Wieprz river catchment  | 1  | Zwirzyniec         | Wieprz             | 405,3   | 1,59  | 50  | 2,55 | 1207,3  | 12,8 |
|   | 2  | Wirkowice          | Wieprz             | 1994,8  | 6,66  | 39  | 2,49 | 4178,1  | 14,8 |
|   | 3  | Krasnystaw         | Wieprz             | 3001,0  | 9,33  | 38  | 2,61 | 5914,1  | 13,8 |
|   | 4  | Trawniki           | Wieprz             | 3546,0  | 7,96  | 39  | 2,49 | 8080,6  | 23,5 |
|   | 5  | Lubartów           | Wieprz             | 6363,5  | 15,8  | 48  | 2,45 | 15271,4 | 17,8 |
|   | 6  | Kośmin             | Wieprz             | 10230,6 | 24,9  | 59  | 2,43 | 30886,1 | 18,0 |
|   | 7  | Krzak              | Łabuńka            | 416,1   | 1,28  | 41  | 2,66 | 1443,6  | 23,3 |
|   | 8  | Orłów Drewniany    | Wolica             | 364,7   | 0,82  | 36  | 2,58 | 705,2   | 19,1 |
|   | 9  | Biskupice          | Giełczew           | 346,6   | 0,94  | 44  | 2,60 | 889,4   | 14,0 |
|   | 10 | Puchaczów          | Świnka             | 211,0   | 0,42  | 51  | 2,52 | 519,1   | 20,7 |
|   | 11 | Sobianowice        | Bystrzyca          | 1264,9  | 3,80  | 36  | 2,71 | 2005,4  | 11,3 |
|   | 12 | Siemień            | Tyśmienica         | 1037,4  | 2,48  | 50  | 2,36 | 3903,6  | 26,8 |
|   | 13 | Tchórzew           | Tyśmienica         | 2341,0  | 5,34  | 51  | 2,33 | 7297,0  | 22,4 |
|   | 14 | Parczew            | Piwonia            | 364,4   | 0,84  | 60  | 2,38 | 1850,8  | 32,9 |
|   | 15 | Borki              | Bystrzyca          | 687,1   | 1,74  | 45  | 2,48 | 1896,5  | 18,8 |
| Zlewnia Dunajca/<br>Dunajec river catchment | 1  | Koniówka           | Czarny Dunajec     | 134,0   | 1,96  | 39  | 2,40 | 1928,0  | 22,9 |
|   | 2  | Nowy Targ          | Czarny Dunajec     | 431,8   | 3,95  | 35  | 2,50 | 3789,1  | 22,7 |

|   |    |                    |                 |        |      |    |      |         |      |
|---|----|--------------------|-----------------|--------|------|----|------|---------|------|
| Zlewnia Dunajca/<br>Dunajec river catchment | 3  | Nowy Targ-Kowaniec | Dunajec         | 681,1  | 7,16 | 33 | 2,42 | 5753,7  | 21,1 |
|   | 4  | Sromowce Wyżne     | Dunajec         | 1278,3 | 14,3 | 34 | 2,79 | 10498,5 | 19,6 |
|   | 5  | Krościenko         | Dunajec         | 1580,3 | 16,4 | 36 | 2,48 | 13313,5 | 21,6 |
|   | 6  | Gołkowice          | Dunajec         | 2046,9 | 19,5 | 35 | 2,35 | 14994,0 | 21,1 |
|   | 7  | Nowy Sącz          | Dunajec         | 4341,0 | 34,0 | 34 | 2,44 | 28334,3 | 22,5 |
|   | 8  | Kościelisko-Kiry   | Kirowa Woda     | 34,5   | 0,82 | 47 | 2,42 | 914,3   | 20,7 |
|   | 9  | Ludźmierz          | Lepietnica      | 50,7   | 0,40 | 30 | 2,68 | 373,4   | 26,5 |
|   | 10 | Ludźmierz          | Wielki Rogoźnik | 124,3  | 0,76 | 33 | 2,62 | 745,2   | 28,1 |
|   | 11 | Zakopane-Harenda   | Cicha Woda      | 58,4   | 1,12 | 36 | 2,63 | 920,7   | 20,5 |
|   | 12 | Szaflary           | Biały Dunajec   | 210,1  | 2,82 | 37 | 2,53 | 2331,2  | 20,7 |
|   | 13 | Poronin            | Poroniec        | 78,8   | 0,72 | 36 | 2,98 | 750,9   | 22,6 |
|   | 14 | Łysa Polana        | Białka          | 63,1   | 1,08 | 49 | 2,55 | 1390,3  | 22,5 |
|   | 15 | Trybsz 2           | Białka          | 202,3  | 3,09 | 43 | 2,32 | 3422,0  | 21,4 |
|   | 16 | Niedzica           | Niedziczanka    | 136,4  | 0,74 | 39 | 2,53 | 918,9   | 27,6 |
|   | 17 | Szczawnica         | Grajcarek       | 73,6   | 0,54 | 38 | 2,59 | 550,5   | 24,5 |
|   | 18 | Tylmanowa          | Ochotnica       | 107,6  | 0,76 | 33 | 2,55 | 662,4   | 25,3 |
|   | 19 | Muszyna-Milik      | Poprad          | 1695,1 | 9,72 | 33 | 2,49 | 7461,2  | 20,8 |
|   | 20 | Stary Sącz         | Poprad          | 2071,0 | 11,9 | 36 | 2,46 | 9898,8  | 21,2 |

A – powierzchnia zlewni [km<sup>2</sup>], Q<sub>70%</sub> – przepływ graniczny niżówki (70. percentyl z krzywej czasów trwania przepływu wraz z wyższymi) [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], śr – wartość średnia, TN – czas trwania niżówki [dni], WGN – wskaźnik gęstości niżówek, VN – bezwzględny deficyt odpływu niżówkowego [tys. m<sup>3</sup>], DWN – deficyt względny odpływu niżówkowego [%]

A – catchment area [km<sup>2</sup>], Q<sub>70%</sub> – threshold level for low-flow (70. percentile on Flow Duration Curve) [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], avg – average value, TN – low-flow duration [days], WGN – low-flow density index, VN – absolute drought streamflow deficit [th. m<sup>3</sup>], DWN – relative drought streamflow deficit [%]

morskiego) opady mogą przekraczać 800 mm. KBW oscyluje tutaj wokół 0 mm, a w częściach ujściowych tych zlewni przyjmuje wartości dodatnie (Kozuchowski 2017; Wibig 2017). Najniższe roczne opady notuje się w dolnej części zlewni Warty – nawet poniżej 500 mm, a średnia wartość KBW sięga tutaj -150 mm. Wynika to z położenia tego obszaru w cieniu opadowym Pojezierza Pomorskiego (Paszyński, Niedźwiedz 1999). Górna Warta (Wyżyna Krakowsko-Częstochowska) otrzymuje opady zbliżone do przeciętnej wartości dla naszego kraju (około 700 mm). Podobne relacje opadowe między górną i dolną częścią zlewni obserwuje się w systemie Wieprza. KBW przyjmuje tutaj znak ujemny (Kozuchowski 2017; Wibig 2017).

Dwie z badanych zlewni – Biebrzy i Przymorza – charakteryzują się stosunkowo dużym stopniem jeziorności (Choiński 2017). W północnej części zlewni Biebrzy przekracza on 15%, natomiast w południowej części zlewni Przymorza dochodzi do 10%. Dominują tu jeziora rynnowe, których misy dzięki znacznym głębokościom rozcinają kilka poziomów wodonośnych, drenując wody niedostępne dla koryt rzecznych. Występują również liczne jeziora moreny dennej i czołowej oraz oczka polodowcowe. Wspomniane zlewnie odznaczają się także dużym udziałem terenów podmokłych. W zlewni Biebrzy znajduje się duży kompleks torfowy o bardzo dużej pojemności re-

tencyjnej magazynujący wody wezbraniowe i roztopowe (Mioduszewski i in. 2004).

Analizując średnie wielkości odpływu jednostkowego w badanym wieloleciu, zaobserwowano, iż w zlewniach Przymorza wahały się one od około 9,5 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> w zlewni Wieprzy do około 11 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> w zlewni Łeby. Mniejsza średnia wartość odpływu jednostkowego charakteryzowała zlewnię Biebrzy (5,85 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>), a najmniejsza zlewnie Warty i Wieprza – odpowiednio 4,63 i 4,14 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>. Największym odpływem jednostkowym spośród wszystkich badanych zlewni charakteryzowała się zlewnia Dunajca – 30,6 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>.

## Wyniki i dyskusja

### Struktura czasowa

W wyniku przeprowadzonej identyfikacji okresów niżówkowych zaobserwowano duże zróżnicowanie liczby i cech niżówek rzecznych w badanych zlewniach. Najwięcej epizodów wystąpiło w zlewni Dunajca; średnio przypadają tam 83 niżówki na przekrój wodowskazowy w badanym wieloleciu. Jednocześnie trwały one najkrócej – przeciętnie 37 dni (tab. 2). Analiza częstotliwości niżówek o określonym czasie trwania wykazała, że w zlewniach karpacczych najczęściej wys-

Tabela 2

Podstawowe charakterystyki czasu trwania i częstości występowania niżówek w przekrojach wodowskazowych badanych zlewni w latach 1989–2018

Basic characteristics of the duration and frequency of low-flows in the gauging cross-sections of the studied catchments in the years 1989–2018

| Nr/<br>No. | Zlewnia/<br>River catchment   | śrN/<br>avgN | śrTN<br>[dni]/<br>avgTN<br>[days] | minTN<br>[dni]/<br>[days] | maxTN<br>[dni]/<br>[days] | śr(cvTN)/<br>avg(cvTN) | śrWGN/<br>avgWGN | minWGN | maxWGN | cvWGN |
|------------|---|--------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|--------|--------|-------|
| 1          | Zlewnie<br>Przymorza/<br>Pomeranian<br>rivers catchments                                      | 79           | 38                                | 7                         | 243                       | 1,11                   | 2,6              | 2,33   | 3,03   | 0,06  |
| 2          | Biebrza<br>po Burzyn/<br>Biebrza river<br>catchment to<br>Burzyn water<br>gauge station       | 54           | 61                                | 7                         | 239                       | 0,87                   | 2,39             | 2,21   | 2,6    | 0,03  |
| 3          | Warta po<br>Poznań/<br>Warta river<br>catchment to<br>Poznan water<br>gauge station           | 59           | 56                                | 7                         | 314                       | 1,05                   | 2,46             | 2,35   | 2,71   | 0,04  |
| 4          | Wieprz po<br>Kośmin/<br>Wieprz river<br>catchment to<br>Kosmin water<br>gauge station         | 70           | 46                                | 7                         | 638                       | 1,04                   | 2,51             | 2,33   | 2,71   | 0,04  |
| 5          | Dunajec po<br>Nowy Sącz/<br>Dunajec river<br>catchment to<br>Nowy Sącz water<br>gauge station | 83           | 37                                | 7                         | 199                       | 0,96                   | 2,54             | 2,32   | 2,98   | 0,06  |

śr – średnia wartość, min – minimalna wartość, max – maksymalna wartość, cv – współczynnik zmienności, N – liczba niżówek w zlewni, TN – czas trwania niżówek [dni], WGN – wskaźnik gęstości niżówek

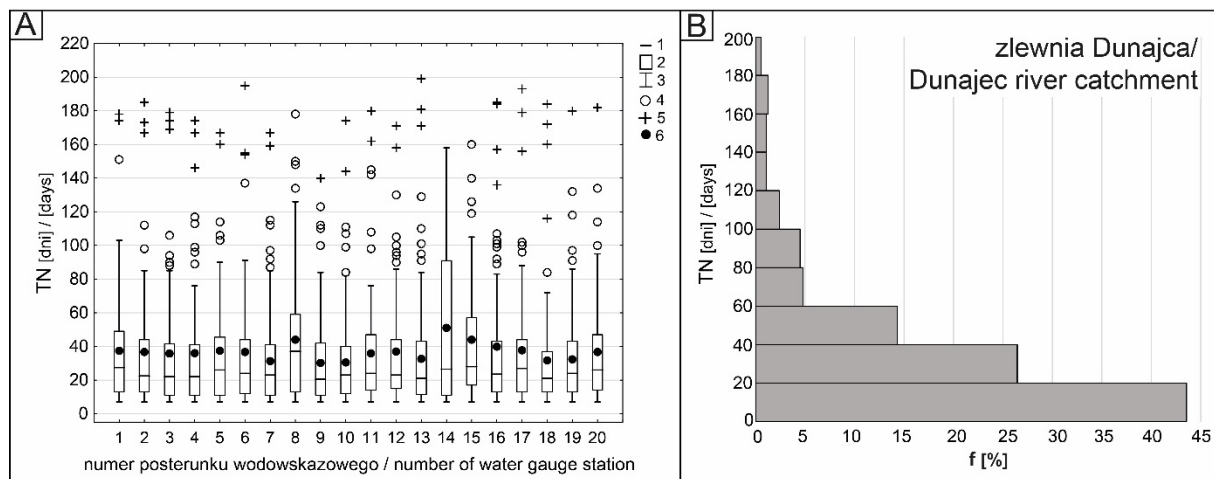
avg – average value, min – minimum value, max – maximum value, cv – variation coefficient, N – number of low-flows in the catchment, TN – low-flow duration [days], WGN – low-flow density index

tępowały krótkie epizody niżówkowe z przedziału 7–20 dni (prawie 45% zidentyfikowanych zdarzeń) (rys. 3B). Uwarunkowań tego zjawiska należy poszukiwać w częstych i dość obfitych impulsach opadowych, charakterystycznych dla obszarów górskich, które zazwyczaj nie pozwalają na długotrwały rozwój krzywych recesji przepływu. Podobny efekt wywołują odwilże i roztopy podczas łagodnych zim, szybko kończące krótkotrwałe okresy niedoborów odpływu. Niżówki trwające od 100 dni do 200 dni stanowiły elementy odstające i ekstremalne rozkładu (rys. 3A). Należały do nich zdarzenia o różnej genezie. W zlewniach tatrzańskich długotrwałe okresy niedoborów zasilania występowały w sezonach zimowych, gdzie pokrywa śnieżna okresowo odcina zbiorniki wód podziemnych od zasilania w pro-

cesie infiltracji. Dodatkowo podczas silnych mrozów dochodzi tam do zlodzenia koryt, skutkujących niemal całkowitym ich odcięciem od zasilania wodami podziemnymi i rozwojem głębokich niżówek rzecznych. W innych częściach zlewni dominowały niżówki letnie i letnio-jesienne, które pojawiały się w efekcie wystąpienia serii lat posusznych w całym kraju na początku (1989–1994), w środku (przełom XX i XXI wieku) i pod koniec (2015–2018) badanego wielolecia.

Rozkłady czasów trwania niżówki we wszystkich przekrojach wodowskazowych zlewni Dunajca były asymetrycznie dodatnie, co wskazuje na możliwość losowego pojawiania się niżówek rzecznych o dużym stopniu uciążliwości dla gospodarki wodnej (rys. 3A). Jednak rozstępy międzykwartylowe były stosunkowo wąskie, gdyż





Rys. 3. Zróznicowanie czasów trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych (A) oraz częstotliwość występowania niżówek o określonym czasie trwania (B) w zlewni Dunajca w latach 1989–2018

TN – czas trwania niżówki [dni], 1 – mediana, 2 – zakres zmienności ograniczony pierwszym i trzecim kwartylem, 3 – zakres nieodstających w obrębie  $\pm 1$  odchylenia międzykwartylowe, 4 – wartości odstające do  $\pm 1,5$  odchylenia międzykwartylowego, 5 – wartości ekstremalne powyżej  $\pm 1,5$  odchylenia międzykwartylowego, 6 – średnia arytmetyczna, f – częstotliwość; numery posterunków wodowskazowych zgodne z Rysunkiem 1 i Tabelą 1

Distribution of low-flows duration at individual gauging cross-sections (A) and the frequency of occurrence of low-flows of a specific duration (B) in the Dunajec River catchment in the years 1989–2018

TN – low-flow duration [days], 1 – median, 2 – range between first and third quartile, 3 – range limited by  $\pm 1$  quartile deviation, 4 – outliers under  $\pm 1.5$  quartile deviation, 5 – extremes over  $\pm 1.5$  quartile deviation, 6 – arithmetic average, f – frequency; numbers of water gauge stations – see Figure 1 and Table 1

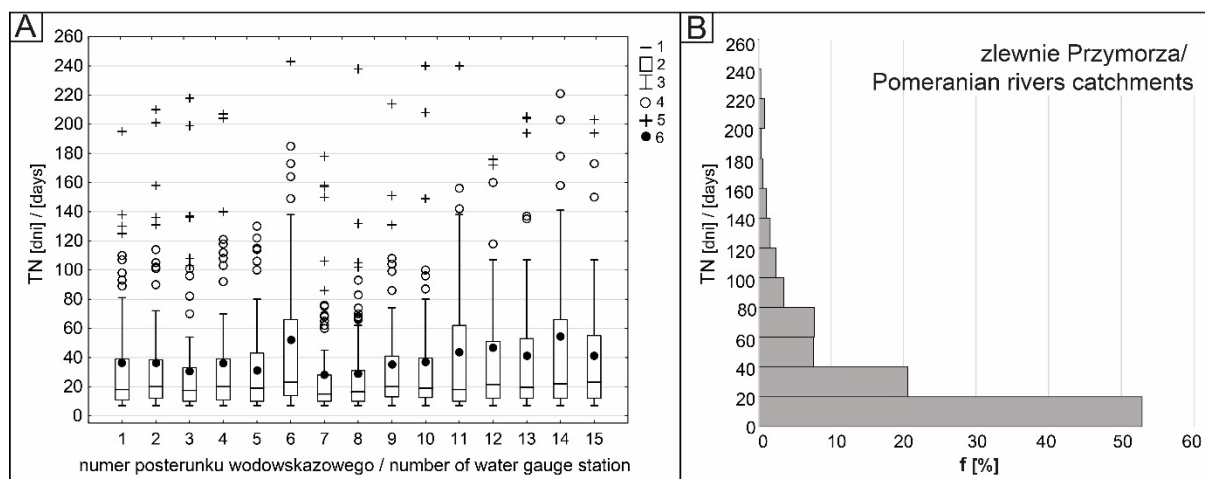
w większości przypadków połowa zidentyfikowanych niżówek mieściła się w przedziale od 10 dni do 50 dni. Wyjątek stanowiła zlewnia Białki po Łysą Polanę, gdzie przedział zmienności czasów trwania niżówek był znacznie większy od pozostałych i nie występowały tu żadne elementy odstające rozkładu, a  $\bar{r}TN$  wyniósł około 50 dni. Zatem długotrwałe niżówki są typową cechą reżimu przepływów tej zlewni położonej w obszarze wysokogórskim (965–2655 m n.p.m.), gdzie w wyniku długiego zalegania pokrywy śnieżnej susze hydrologiczne utrzymują się znacznie dłużej (3–5 miesięcy) niż w innych częściach dorzecza Dunajca.

Dużą liczbę krótkotrwałych niżówek rzecznych zaobserwowano również w zlewniach Przymorza; przeciętnie 79 niżówek na przekrój wodowskazowy, o średnim czasie trwania równym 38 dni (tab. 2). Jest to efekt dużej zasobności wodnej tego regionu, uwarunkowanej wzmożonym zasilaniem opadowym oraz znaczną retencją powierzchniową i podziemną. Tak duża liczba zidentyfikowanych epizodów była konsekwencją częstego przerywania okresów niedoborów zasilania impulsami opadowymi. Krótkie niżówki (7–20 dni) stanowiły tutaj ponad 50% wszystkich zidentyfikowanych epizodów (rys. 4B). Czynnikiem hamującym długotrwały rozwój niżówek były częste napływy deszczonośnych mas po-

wietrza polarno-morskiego oraz lokalny wpływ Morza Bałtyckiego. W efekcie w zlewniach tych zaobserwowano największy średni współczynnik zmienności TN równy 1,11 (tab. 2).

Rozkłady czasów trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych były asymetrycznie dodatnie, a przedziały międzykwartylowe stosunkowo wąskie (rys. 4A). Warto jednak zwrócić uwagę na bardzo duży udział zdarzeń odstających i ekstremalnych, które w wybranych zlewniach dochodziły do 8 miesięcy, czyli przekraczały czas trwania przeciętnej niżówki o około 7 miesięcy. Wynika z tego, że zlewnie Przymorza z uwagi na korzystną strukturę bilansu wodnego są odporne na występowanie długotrwałych niedoborów zasilania, lecz w przypadku pojawiania się poważnych deficytów opadowych w skali regionalnej lub krajowej mogą występować tu długotrwałe niżówki rzeczne.

Dłuższy średni czas trwania niżówek odnotowano w zlewni Wieprza (46 dni). Fakt ten wiązać należy z powolnym tempem szczyptywania i odnawiania zasobów wodnych w rozległych zbiornikach, zbudowanych z dobrze uszczelnionych skał węglanowych, stanowiących główne źródło zasilania podziemnego rzek w tej zlewni. Warto podkreślić, iż wystąpiła tu najdłuższa ze wszystkich zidentyfikowanych w badanym okresie niżówek, która trwała prawie 2 lata (tab. 2; rys. 5A). Zaob-

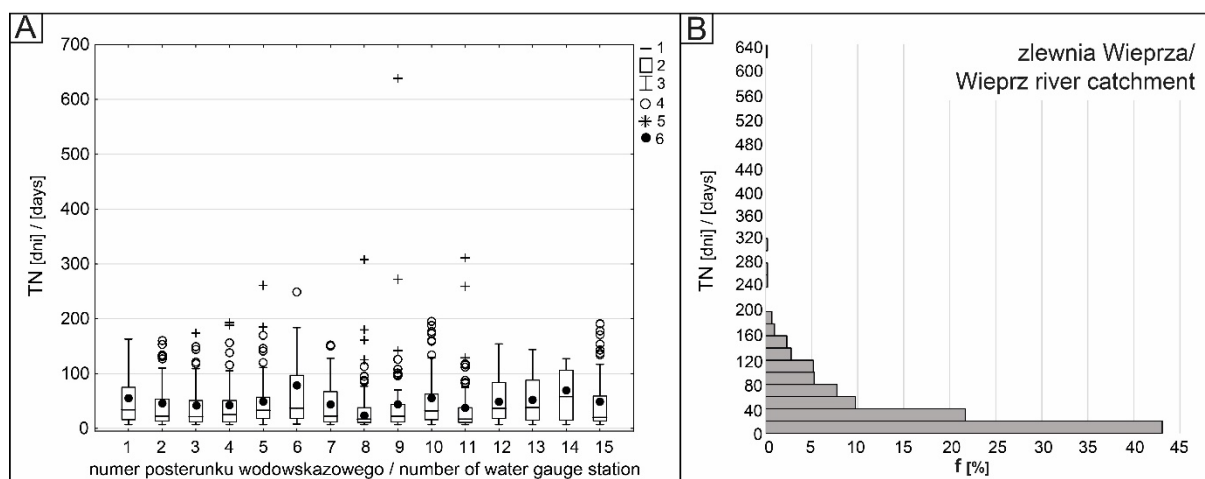


Rys. 4. Zróżnicowanie czasów trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych (A) oraz częstotliwość występowania niżówek o określonym czasie trwania (B) w zlewniach Przymorza w latach 1989–2018

Objaśnienia jak na Rysunku 3

Distribution of low-flow durations at individual gauging cross-sections (A) and frequency of occurrence of low-flows of a specific duration (B) in the Pomeranian rivers catchments in the years 1989–2018

Explanations – see Figure 3



Rys. 5. Zróżnicowanie czasów trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych (A) oraz częstotliwość występowania niżówek o określonym czasie trwania (B) w zlewni Wieprza w latach 1989–2018

Objaśnienia jak na Rysunku 3

Distribution of low-flows duration at individual gauging cross-sections (A) and frequency of occurrence of low-flows of a specific duration (B) in the Wieprz River catchment in the years 1989–2018

Explanations – see Figure 3

serwowano ją w zlewni Giełczwi. Pojawiła się w efekcie długiego okresu bezopadowego, kiedy zasoby wód podziemnych były silnie zdrenowane przy dobrze rozwiniętej suszy glebowej, przez co każdy pojawiający się impuls opadowy nie był transformowany w infiltrację efektywną, lecz w postaci splywu powierzchniowego i podpowierzchniowego szybko trafiał do rzeki i odpływał ze zlewni lub parował. W efekcie niżówka nie została przerwana przez okres 638 dni.

Rozkłady czasów trwania niżówek w poszczególnych zlewniach były w większości asymetrycznie dodatnie. Wystąpiły tu elementy odstające i ekstremalne sięgające nieco ponad 300 dni, choć niżówki przekraczające 200 dni należały do rzadkości. W górnej części zlewni Wieprza nie zaobserwowano odstających elementów rozkładu, co świadczy o stabilnym reżimie przepływów niżówkowych pozbawionym czynników determinujących ekstremalnie długie okresy nie-

doborów odpływu. Podobne zjawisko zaobserwowano w zlewni Piwonii. Jednak w tym przypadku był to efekt oddziaływania zakładów górniczych LW „Bogdanka”, które prowadząc odwodnienia, spowodowały istotne obniżenie zwierciadła wód podziemnych w tej zlewni (Michalczyk i in. 2007). W efekcie okresowej utraty kontaktu hydraulicznego czas trwania niżówek istotnie się wydłużył (rozkład platykurtyczny). Niżówki te były na tyle głębokie, że cechy ich rozkładu statystycznego zostały przejęte w dalszym biegu przez recypienta (Tyśmienica – Siemień, Tyśmienica – Tchórzew). W strukturze czasowej niżówek w całej zlewni największy udział miały epizody krótkie (około 44% wszystkich zidentyfikowanych zdarzeń), ale dość często pojawiały się również niżówki z przedziału 20–40 dni (rys. 5B).

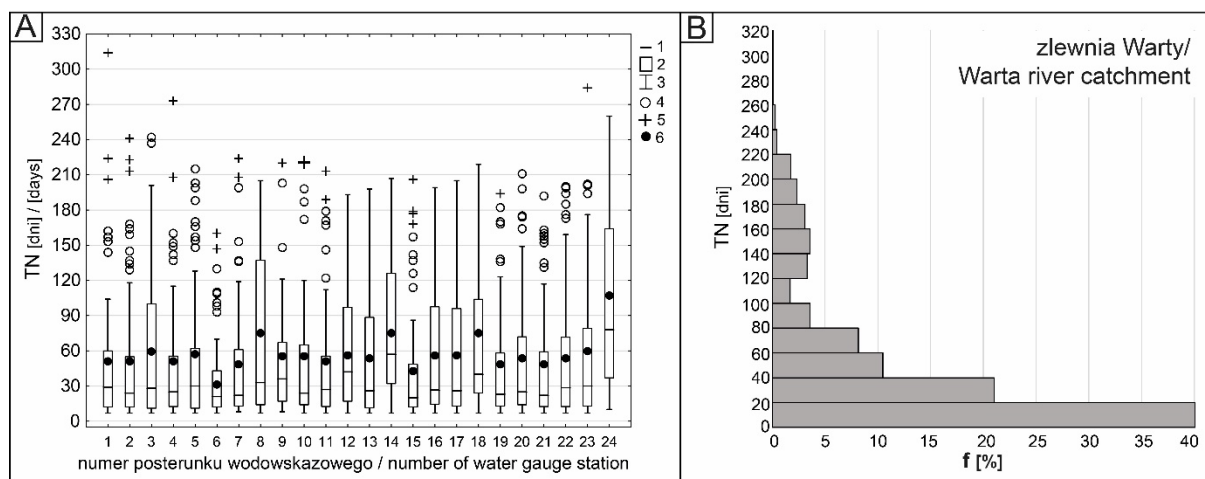
Niżówki rzeczne w zlewni Warty przeciętnie trwały dłużej niż w omówionych wyżej systemach – 56 dni (tab. 2). Wynika to przede wszystkim z niekorzystnej struktury bilansu wodnego w relacji opad–parowanie oraz z niewielkiego stopnia retencyjności struktur hydrogeologicznych, głównie w tej części zlewni, która znajduje się w obrębie pasa Nizin Środkowopolskich. Omawianemu zjawisku towarzyszy zmniejszenie liczby obserwowanych epizodów (średnio 59 na przekrój wodowskazowy), świadczące o znacznie większej bezwładności procesu rozwojowego niżówki (tab. 2). Rozkłady czasu trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych są bardzo zróżnicowane (rys. 6A). Największą podatność na rozwój długotrwałych epizodów (szerokie przedziały zmienności, asymetryczne rozkłady) wykazały rzeki w północnej części zlewni (Kanał Mosiński, Kanał Kościański, Powa, Wrześnica), co związane było z małą zasobnością wodną strefy hydrologicznie czynnej na tym obszarze, uwarunkowaną występowaniem śródlądowych i naglinowych poziomów wodonośnych (Graf 2015). Ponadto zlewnie te charakteryzują częste, okresowe niedobory zasilania opadowego w okresie wegetacyjnym. Podwyższone czasy trwania niżówek wykazały również małe rzeki ze względu na stosunkowo płytkie rozcinanie poziomów wodonośnych przez doliny rzeczne w małych zlewniach położonych w pobliżu stref wododziałowych (na przykład Ołobok, Oleśnica) (Tomaszewski 2012).

Na kształtowanie czasu trwania niżówek duży wpływ mają działania gospodarki wodnej w zlewniach poddanych silnej antropopresji. Odwodnienia górnicze kopalni odkrywkowych sprawiły, że w zlewniach objętych lejami depresji niżówki trwają bardzo długo, osiągając czasy trwa-

nia z całego przedziału zmienności – rozkłady platykurtyczne. W zlewni Warty działania takie są widoczne w Zagłębiu Bełchatowskim (zlewnia Niecieczy) i Konińskim (zlewnia Kiełbaski). Jednocześnie część rzek służy do odprowadzania odpompowywanej wody poza obszar górniczy. Ich koryta są uszczelnione w celu zapobieżenia wtórnej infiltracji (Tomaszewski 2014; Kozek 2018). Przykładem może być Widawka, w której „dodatkowe” zasilanie z KWB „Bełchatów” doprowadziło do złagodzenia i skrócenia czasów trwania niżówek rzecznych w porównaniu ze zlewnią Niecieczy, w której koryta straciły stały kontakt ze zwierciadłem wód podziemnych. Podobny efekt obserwuje się w Nerze, który odbiera dodatkowe wody zrzucone z aglomeracji łódzkiej, co skutkuje relatywnie krótkim przeciętnym czasem trwania niżówek (Tomaszewski 2014; Jokieli, Bartnik 2020).

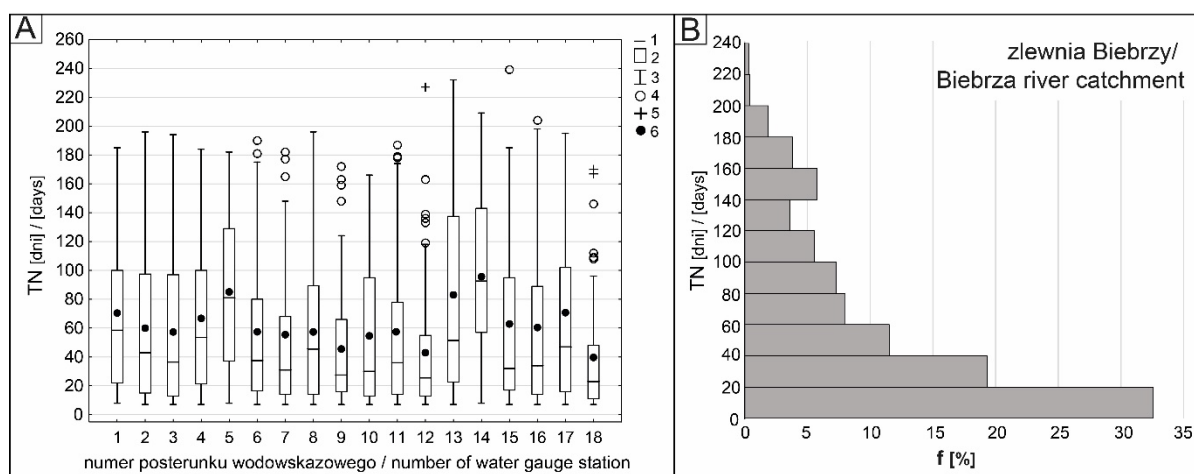
Najdłuższa zidentyfikowana niżówka w zlewni Warty trwała 314 dni i zaobserwowano ją na posterunku w Poraju, który zlokalizowany jest na Warcie poniżej zbiornika retencyjnego o tej samej nazwie. Była ona skutkiem długotrwałych niedoborów zasilania opadowego, które w połączeniu z funkcjonowaniem zbiornika zaporowego, zaspokajającego potrzeby swoich konsumentów w okresie niedoborów zasilania, wygenerowały ciąg przepływów niżówkowych trwających niemal rok. Ponadto z powodu infiltracji i ucieczki części wód limnicznych, wynikających z obecności okien hydrogeologicznych w strefach uskoków, poniżej zapory notuje się niższe niż kiedyś przepływy minimalne (Jaguś, Rzętała 2000). W strukturze długości niżówek w zlewni Warty dominowały epizody krótkie, trwające 7–20 dni (40%) oraz niżówki z przedziału 20–40 dni (ponad 20%) (rys. 6B). Warto jednak zwrócić uwagę na załamanie krzywej histogramu częstotliwości w strefie 120–220 dni. O podwyższonych udziałach niżówek z tego przedziału zdecydowała duża liczba epizodów ze zlewni objętych górnymi lejami depresji. Dowodzi to, że w skali całej zlewni czynnik antropogeniczny ma wyraźny wpływ na kształtowanie reżimu przepływów niżówkowych.

Najmniej niżówek rzecznych (przeciętnie 54 na przekrój wodowskazowy) o najdłuższym czasie trwania (średnio około 2 miesiące) zaobserwowano w zlewni Biebrzy (tab. 2). Długi czas utrzymywania się niedoborów zasilania uwarunkowany był tutaj wysoką retencyjnością mis jeziornych drenujących jeden lub kilka poziomów wodonośnych, przez co tempo szczyptywania i odnawiania zasobów strefy aktywnej wymiany było



Rys. 6. Zróżnicowanie czasów trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych (A) oraz częstotliwość występowania niżówek o określonym czasie trwania (B) w zlewni Warty w latach 1989–2018  
Objaśnienia jak na Rysunku 3

Distribution of low-flows duration at individual gauging cross-sections (A) and frequency of occurrence of low-flows of a specific duration (B) in the Warta River catchment in the years 1989–2018  
Explanations – see Figure 3



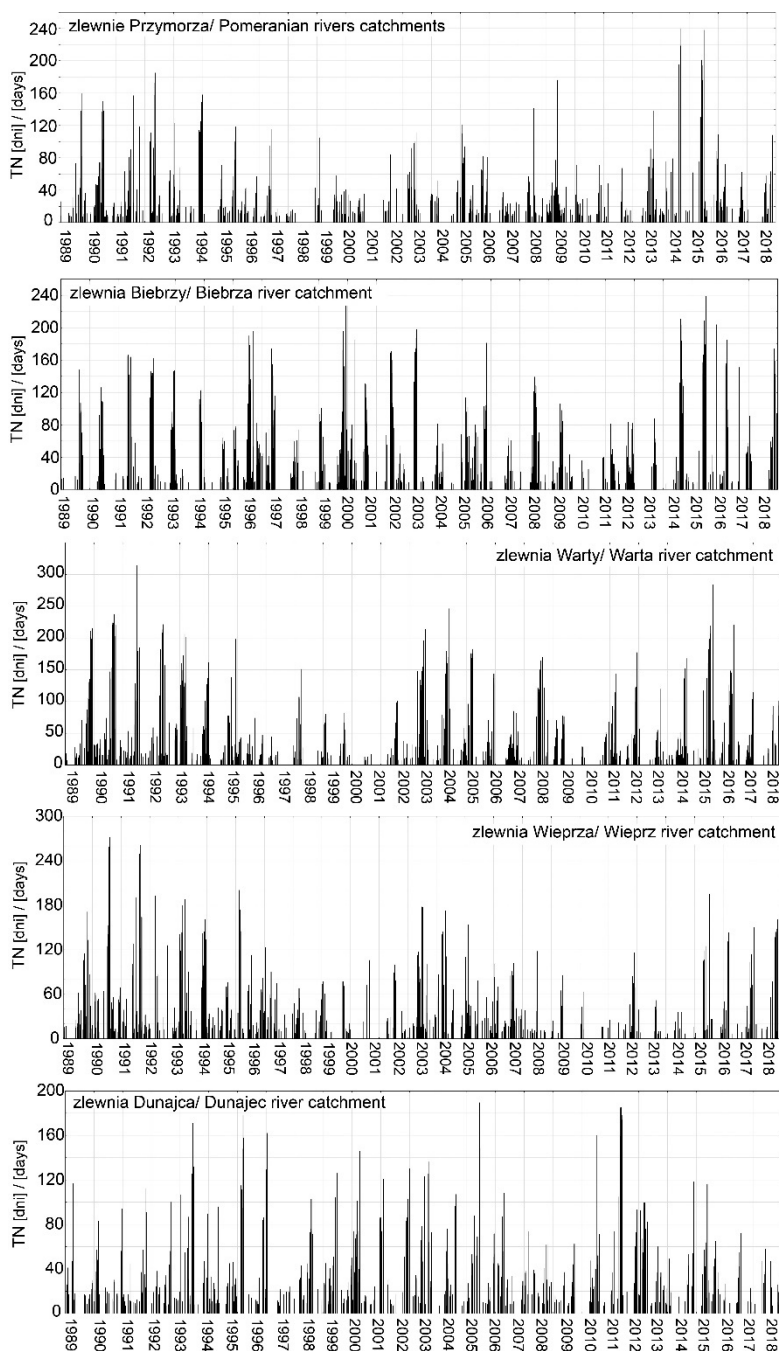
Rys. 7. Zróżnicowanie czasów trwania niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych (A) oraz częstotliwość występowania niżówek o określonym czasie trwania (B) w zlewni Biebrzy w latach 1989–2018  
Objaśnienia jak na Rysunku 3

Distribution of low-flows duration at individual gauging cross-sections (A) and frequency of occurrence of low-flows of a specific duration (B) in the Biebrza River catchment in the years 1989–2018  
Explanations – see Figure 3

stosunkowo wolne. Rozkład statystyczny czasu trwania niżówki w poszczególnych przekrojach wodowskazowych wykazuje małą asymetrię oraz niewiele elementów odstających w porównaniu z analizowanymi wcześniej zlewniami (rys. 7A). Świadczy to o względnie stabilnym reżimie przepływów niżówkowych, gdzie zbiór czynników determinujących czas trwania niedoborów odpływu jest niewielki i w znacznej mierze zależy od stabilizującej (buforującej) roli mis jezior przepływowych oraz odpływowych. Fakt ten potwierdza

również najmniejszy współczynnik zmienności czasu trwania niżówki spośród wszystkich badanych zlewni (tab. 2).

Niżówki prawobrzeżnych dopływów Biebrzy, których systemy obejmują jeziora przepływowe i odpływowe (Ełk, Jegrznia, Netta), charakteryzowały się wyraźnie dłuższym parametrem TN od pozostałych. Najdłuższy przeciętny czas trwania niżówki (96 dni) odnotowano w Łażnej Strudze po przekrój w Małych Wronkach, który znajduje się w silnie ujeziornionej części zlewni



Rys. 8. Wieloletni przebieg czasu trwania niżówek (TN) w badanych zlewniach

Multiannual course of low-flows duration (TN) in the studied catchments

Elku. Długie niżówki ( $\bar{sr}TN > 80$  dni) zaobserwowano również w Jegrzni po Woźną Wieś, znajdującą się poniżej licznych jezior przepływowych, a także w dolnym odcinku Biebrzy (wodowskaz Burzyn). Zlewnia Biebrzy charakteryzowała się w badanym zbiorze najmniejszą częstotliwością występowania niżówek krótkich (7–20 dni) oraz względnie najmniejszym spadkiem częstotliwości epizodów wraz z przyrastającym czasem ich trwania (rys. 7B). Stosunkowo duży udział miały tutaj

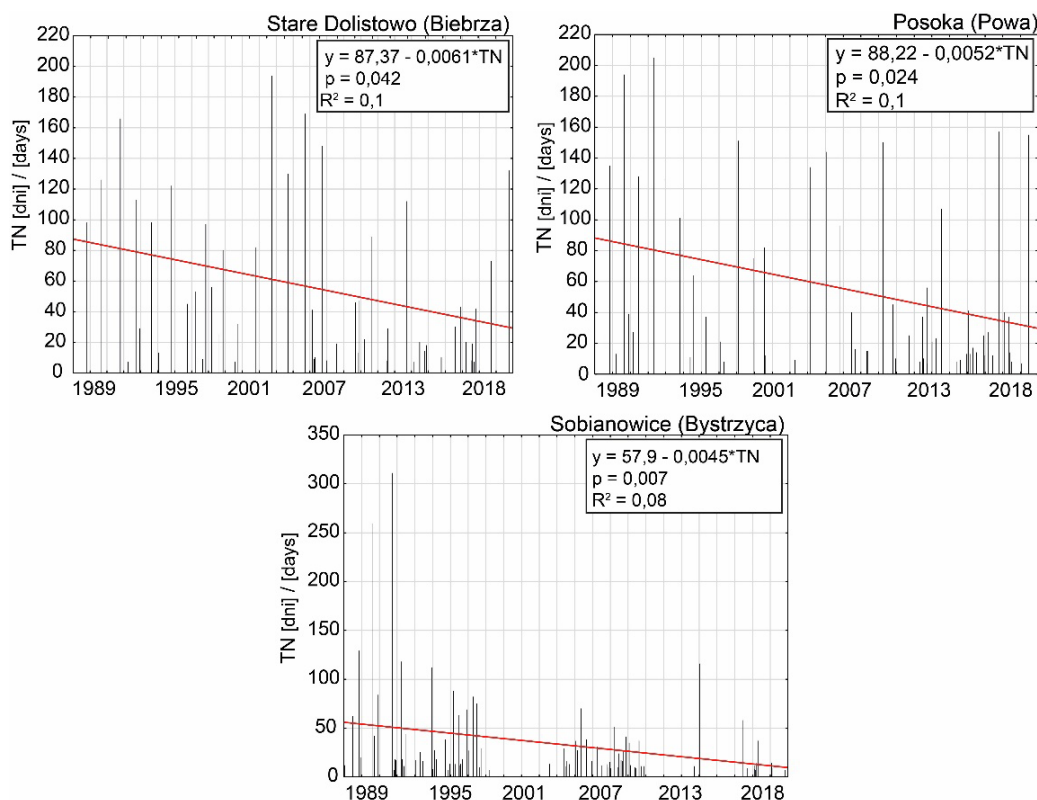
niżówki z przedziału czasowego 140–180 dni, dominujące w zlewniach z dużym udziałem jezior przepływowych, co wskazuje na bardzo istotną rolę tego czynnika w kształtowaniu przepływów niżówkowych w zlewni Biebrzy.

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na pewną prawidłowość dotyczącą całej grupy badanych zlewni. Otóż wzrostowi średniego czasu trwania niżówki towarzyszy generalnie spadek liczby zidentyfikowanych epizodów (tab. 2).

Jednocześnie dłuższe niżówki rzeczne występują w zlewniach otrzymujących relatywnie mniej opadów oraz odznaczających się strukturą bilansu wodnego, uwydatniającą komponent ewapotranspiracji. Oczywiście w ujęciu lokalnym relacje te mogą mieć zróżnicowany charakter, jednak w skali regionalnej zależności opadowe i ewapotranspiracyjne są bardzo wyraźne, co przedstawiono w rozdziale dotyczącym charakterystyki obszaru badań (na przykład Kożuchowski 2017; Wibig 2017).

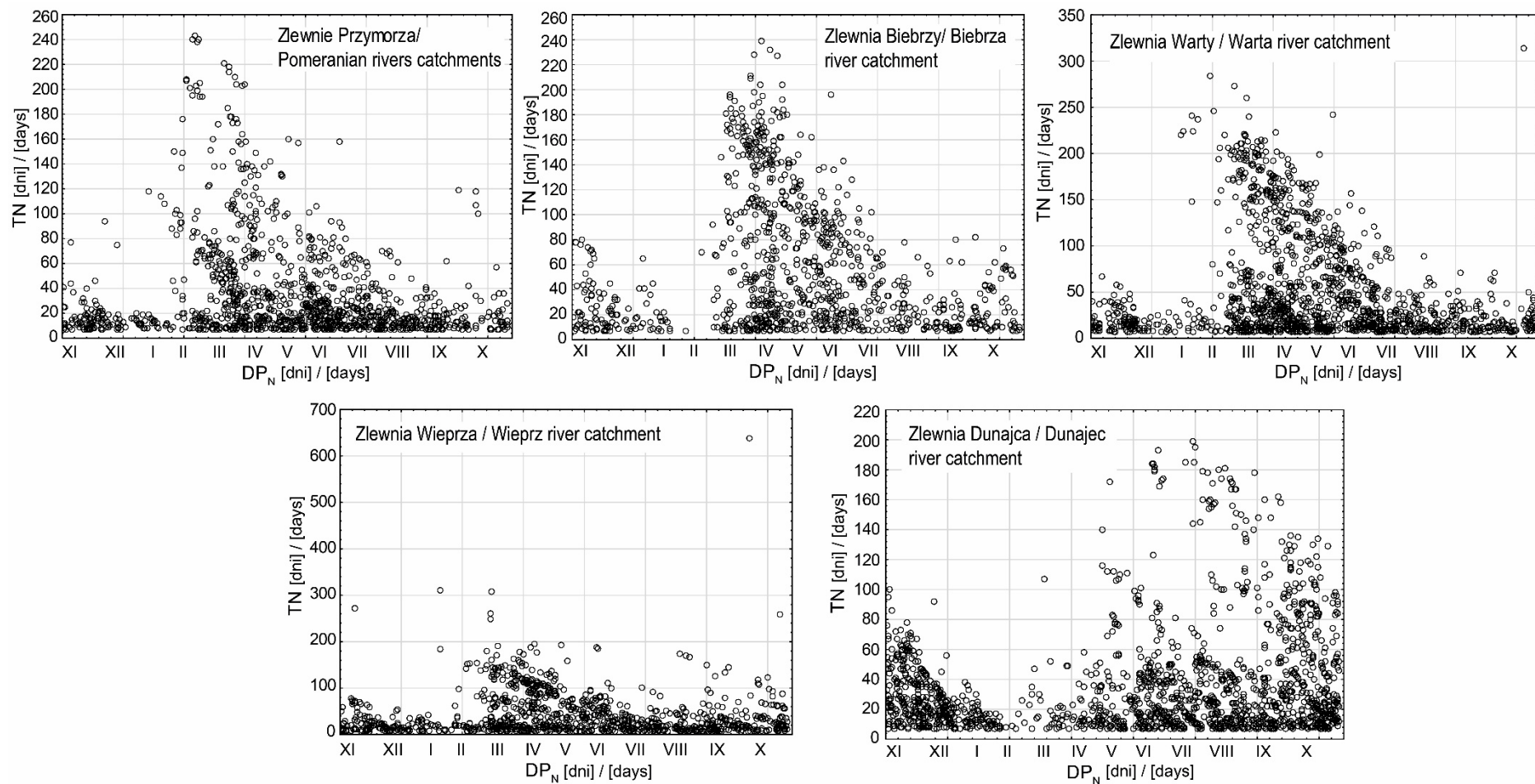
W toku prowadzonych analiz dokonano identyfikacji systematycznej składowej w wieloletnich szeregach czasów trwania epizodów niżówkowych, bazując na analizie trendu liniowego. Istnienie tendencji sprawdzono, bazując na przebiegu czasów trwania wszystkich niżówek w danej zlewni oraz dla każdego przekroju wodowskazowego osobno. Badane zmienne przygotowano w taki sposób, aby czasowi trwania niżówki (TN)

odpowiadała rzeczywista data wystąpienia środka epizodu niżówkowego (rys. 8). W efekcie przeprowadzonych badań, w żadnej z pięciu analizowanych zlewni nie udokumentowano istnienia statystycznie istotnych trendów liniowych. Zaobserwowano natomiast zjawisko grupowania się lat z niżówkami o długich czasach trwania. Na przykład w zlewniach Przymorza najdłuższe niżówki obserwowano pod koniec badanego wielolecia (lata 2014 i 2015). Z kolei w zlewni Warty i Wieprza był to początek, środek i koniec tego wielolecia. Okresom z najdłuższymi niżówkami towarzyszyły lata suche i bardzo suche. W zlewniach Biebrzy i Dunajca długotrwałe niżówki pojawiały się względnie systematycznie co kilka lat. Warto dodać, iż w zlewni Dunajca okresy długotrwałych i głębokich niedoborów zasilania wiązały się głównie z występowaniem surowych zim, determinujących dominujący typ genetyczny niżówek rzecznych w tej zlewni.



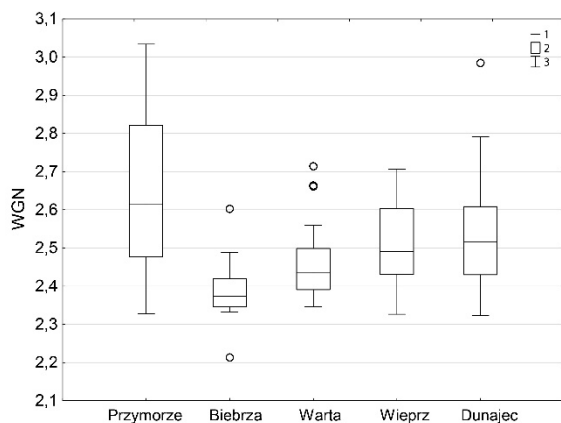
Rys. 9. Statystycznie istotne trendy w wieloletnim przebiegu czasów trwania niżówek (1989–2018)  
 a – współczynnik kierunkowy istotnego statystycznie trendu liniowego ( $\alpha = 0,05$ ), R2 – współczynnik determinacji,  
 p – wartość prawdopodobieństwa dla testu Manna-Kendalla, TN – czas trwania niżówki [dni]

Statistically significant trends of multiannual course of low-flows durations (1989–2018)  
 a – statistically significant slope coefficient of linear trend equations ( $\alpha = 0.05$ ), R2 – determination coefficient,  
 p – probability value for Mann–Kendall test, TN – low-flow duration [days]



Rys. 10. Zależności czasów trwania niszówek ( $TN$ ) od daty ich wystąpienia ( $DP_N$ ) w badanych zlewniach w latach 1989–2018  
 Relationship between low-flow durations ( $TN$ ) and dates of occurrence ( $DP_N$ ) in the studied catchments in the years 1989–2018

W skali poszczególnych przekrojów wodowskazowych tylko w trzech przypadkach zaobserwowano istotne statystycznie trendy liniowe (istotność trendów zweryfikowano za pomocą testu Manna-Kendalla). Wyznaczone współczynniki kierunkowe prostej po przeliczeniu na wartość bezwzględną wskazały na średni roczny spadek długości niżówek o 1 dzień i 19 godzin w zlewni Powy po Posokę (zlewnia Warty) i Bystrzycy po Sobianowice (zlewnia Wieprza) oraz o 21 dni i 21 godzin w środkowej części zlewni Biebrzy (Stare Dolistowo) (rys. 9). Słabe dopasowanie linii trendu ( $R^2 = 8\text{--}10\%$ ) świadczy o niewielkim wpływie tej składowej systematycznej na kształtowanie czasu trwania niżówek w badanym wieloleciu. Zatem wyniki uzyskane w tym zakresie należy traktować z dużą ostrożnością.



Rys. 11. Zróżnicowanie wskaźnika gęstości niżówek (WGN) w badanych zlewniach w latach 1989–2018  
Oznaczenia jak na Rysunku 3

Distribution of low-flow density index (WGN) in the studied catchments in the years 1989–2018  
Explanations – see Figure 3

W kolejnym etapie prowadzonych analiz sprawdzono, czy czasy trwania niżówek wykazują uwarunkowania sezonowe. Ocenie poddano zależność między długością niżówki a datą jej początku. W żadnej z badanych zlewni nie stwierdzono istotnego statystycznie związku w tym zakresie (rys. 10). Warto jednak zwrócić uwagę na pewne cechy charakterystyczne badanych rozkładów. W zlewniach Przymorza, Warty i Wieprza najdłuższe niżówki zaczynały się już pod koniec zimy bądź na początku wiosny. Zdarzenia te były konsekwencją łagodnych, bezśnieżnych zim i niedoboru zasilania opadowego w cieplej połowie roku, co spowodowało ich wydłużenie się, często aż do listopada lub grudnia. Pomijając zagadnienie

długości analizowanych niżówek, największe zagęszczenie punktów na wykresach dla tych trzech zlewni obserwowano od końca wiosny do wczesnej jesieni. Można stąd wnosić, iż charakterystyczne dla tych zlewni były niżówki letnie i letnio-jesienne. W zlewni Biebrzy najdłuższe epizody rozpoczynały się w kwietniu i maju (rys. 10). Interpretując zagęszczenie punktów na tym wykresie, można stwierdzić, iż charakterystyczne dla tej zlewni były niżówki wiosenno-letnie wywołane niedoborami opadów i silną ewapotranspiracją. Zlewnia góraska natomiast charakteryzowała się najdłuższymi niżówkami rozpoczynającymi się na przełomie lipca i sierpnia, a największe sezonowe zagęszczenie epizodów obserwowano od listopada do lutego. Wskazuje to na istotny udział niżówek zimowych w tej zlewni. Warto również zauważyć, że szczególnie surowe susze hydrologiczne miały mieszaną genezę, w efekcie czego niżówki letnio-jesienne wywołane niedoborami opadów przechodziły w sposób ciągły w niżówki zimowe związane z odcięciem zasilania przez pokrywę śnieżną i zjawiska lodowe.

Ostatnim zagadnieniem dotyczącym struktury czasowej niżówek jest częstotliwość ich występowania. Analizę tego problemu przeprowadzono w oparciu o wskaźnik gęstości niżówek (WGN), który mówi o tym, o ile średnio przerwy między niżówkami są dłuższe ( $WGN > 1$ ) lub krótsze ( $WGN < 1$ ) od samych epizodów niżówkowych. Przeciętnie w badanej grupie zlewni odstępy między niżówkami były od 2,39 (zlewnia Biebrzy) do 2,60 (zlewnia Przymorza) razy dłuższe od samych niżówek (tab. 2). Względnie symetryczne rozkłady WGN i niewielkie rozstępy międzykwartyłowe w zlewni Biebrzy (2,35–2,41) i Warty (2,39–2,50) wskazują na dużą i systematyczną powtarzalność niżówek w tych systemach rzecznych (rys. 11). W pozostałych zlewniach zakres zmienności również był niewielki, co dodatkowo potwierdziły wyznaczone współczynniki zmienności na poziomie 0,04–0,06 (tab. 2). Najdłuższe przerwy między kolejnymi niżówkami zaobserwowano w zlewniach Przymorza i Dunajca, gdzie niżówki trwały najkrócej (w niektórych przekrojach wodowskazowych epizody niżówkowe były 3 razy krótsze od przerw między nimi). Obie zlewnie charakteryzuje również największa zmienność przestrzenna gęstości niżówek, co świadczy o dużym zróżnicowaniu tej cechy reżimu przepływów niżówkowych, uwarunkowanej czasem transformacji niedoborów zasilania i jej odzwierciedlenia w krzywej wysychania zlewni.



## Niedobory odpływu

Ocenę niedoborów odpływu niszówkowego przeprowadzono w oparciu o wyznaczone objętości niszówek (VN), które przekształcono do postaci deficytu względnego (DWN), aby umożliwić ich porównanie (tab. 3). Średnia wartość tej charakterystyki wahała się w Polsce w latach 1989–2018 od około 10% w zlewniach Przymorza do nieco ponad 21% w zlewni Biebrzy (tab. 3). Największe maksymalne deficyty względne, sięgające niemal 94%, zaobserwowano w zlewni Warty, a dokładnie w zlewni Niecieczy po Widawę (rys. 12) znajdującej się pod wpływem silnej antropopresji. Tak wysoki stopień zdrenowania zasobów wodnych w strefie przepływów niszówkowych jest efektem oddziaływania omawianego wcześniej leja depresji, wywołanego odwodnieniem KWB „Bełchatów”, prowadzącego do utraty kontaktu hydraulicznego koryt rzecznych z wodami podziemnymi. Najmniejsze deficyty względne odpływu niszów-

kowego zaobserwowano w zlewniach Przymorza. W większości przekrojów wodowskazowych niszówki o deficytach względnych powyżej 20% stanowiły już odstające elementy rozkładu świadczące o bardzo rzadkim ich występowaniu (rys. 12). Zakres zmienności DWN w zlewniach Przymorza był niewielki, a rozstępy międzykwartylowe dość wąskie (najszerze obejmowały zakres 10%). Największa zmienność, jak i największe odnotowane wartości DWN (około 50%) miały miejsce w zlewni Moszczeniczki (dopływ Wieprzy), która z uwagi na stosunkowo płytkie rozcięcie poziomów wodonośnych, determinującą ograniczoną zasobność wodną, jest bardziej podatna na rozwój głębokich niszówek rzecznych. Dużą podatność na rozwój surowej suszy hydrologicznej zaobserwowano jeszcze w zlewni Słupi po wodowskaz w Gałąźni Małej. Jednak w tym przypadku podwyższone deficyty mogą wynikać z regulacji przepływu związanych z pracą elektrowni wodnej.

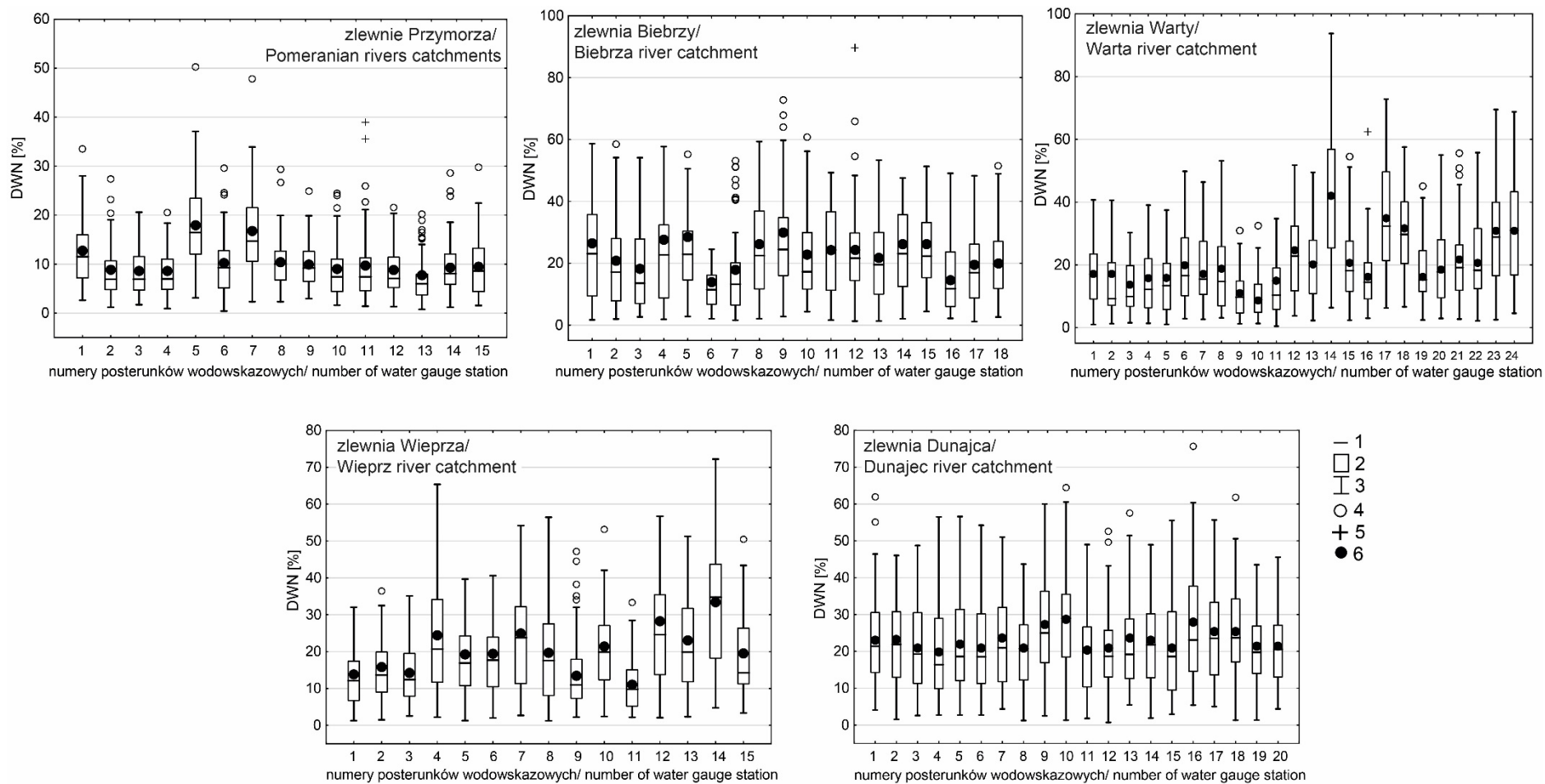
Tabela 3

Bezwzględne i względne deficyty odpływu niszówkowego w badanych zlewniach w latach 1989–2018  
 Absolute and relative drought streamflow deficits in the studied catchments in the years 1989–2018

| Nr/<br>No. | Zlewnia/<br>River catchment   | śrVN<br>[tys. m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]/<br>avgVN<br>[th. m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | minVN<br>[tys. m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]/<br>[th. m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | maxVN<br>[tys. m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]/<br>[th. m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | śr(cvVN)/<br>avg(cvVN) | śrDWN/<br>avgDWN<br>[%] | minDWN<br>[%] | maxDWN<br>[%] | śr(cvDWN)/<br>avg(cvDWN) |
|------------|---|---|---|---|------------------------|-------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| 1          | Zlewnie Przymorza/<br>Pomeranian rivers catchments                                | 2196,27   | 6,05  | 53902,37  | 1,69                   | 10,12                   | 0,42          | 50,24         | 0,58                     |
| 2          | Biebrza po Burzyn/<br>Biebrza river catchment to Burzyn water gauge station       | 7261,93   | 6,05  | 155327,33   | 1,32                   | 21,19                   | 1,15          | 89,66         | 0,65                     |
| 3          | Warta po Poznań/<br>Warta river catchment to Poznań water gauge station           | 9194,37   | 6,05  | 417623,04   | 1,45                   | 20,81                   | 0,46          | 93,75         | 0,60                     |
| 4          | Wieprz po Kośmin/<br>Wieprz river catchment to Kośmin water gauge station         | 4274,08   | 6,05  | 83030,40  | 1,30                   | 17,26                   | 1,22          | 72,21         | 0,57                     |
| 5          | Dunajec po Nowy Sącz/<br>Dunajec river catchment to Nowy Sącz water gauge station | 4785,96   | 6,05  | 159131,52   | 1,48                   | 20,55                   | 1,22          | 75,68         | 0,53                     |

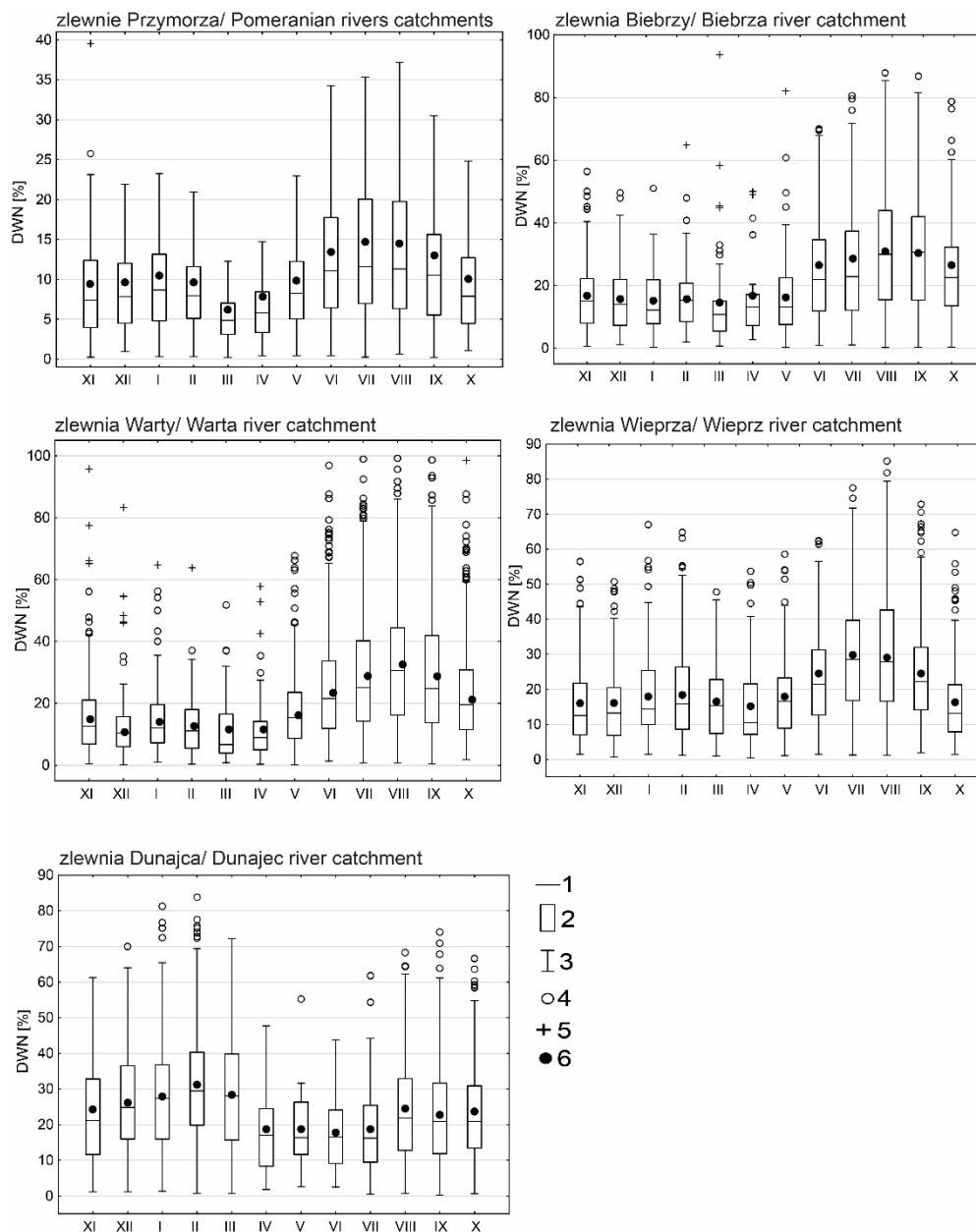
śr – średnia wartość, min – minimalna wartość, max – maksymalna wartość, cv – współczynnik zmienności, VN – bezwzględny deficyt odpływu niszówkowego, DWN – względny deficyt odpływu niszówkowego

avg – average value, min – minimum value, max – maximum value, cv – variation coefficient, VN – absolute drought streamflow deficit, DWN – relative drought streamflow deficit



Rys. 12. Zróżnicowanie deficytu względnego odpływu niżówkowego (DWN) w badanych zlewniach w latach 1989–2018  
Oznaczenia jak na Rysunku 3

Distribution of relative drought streamflow deficit (DWN) in the studied catchments in the years 1989–2018  
Explanations – see Figure 3



Rys. 13. Zróźnicowanie deficytu względnego odpływu niżówkowego (DWN) w poszczególnych miesiącach roku hydrologicznego w badanych zlewniach w latach 1989–2018. Oznaczenia jak na Rysunku 3

Distribution of relative drought streamflow deficit (DWN) in particular months of the hydrological year in the studied catchments in the years 1989–2018  
 Explanations – see Figure 3

Niewielkim średnim deficytem względnym (17,3%) charakteryzowała się zlewnia Wieprza (tab. 3). Jednak przedziały zmienności DWN w poszczególnych przekrojach wodowskazowych różniły się od siebie. Najwyższe wartości DWN z maksimami przekraczającymi 70% zanotowano w zlewni Piwonii, która znajduje się pod wpływem odwodnień górniczych LW „Bogdanka”. Oddziaływanie to jest na tyle silne, że głębokie

niżówki przenoszą się w dół systemu rzecznego i obserwuje się je na wodowskazach Tyśmienicy (Siemień, Tchórzew). Inny istotny wpływ antropopresji na kształtowanie niżówek rzecznych widoczny jest w przekroju Trawniki na Wieprzu (Raczyński 2018). Powyżej tego wodowskazu znajduje się ujęcie wody do Kanału Wieprz–Krzna w efekcie czego podczas surowej suszy hydrologicznej w połączeniu z intensywnymi poborami

wody do nawodnień deficyty względne odpływu niżówkowego mogą przekraczać 65%.

Nieco większy przeciętny deficyt względny jest charakterystyczny dla zlewni Dunajca – 20,6% (tab. 3). Największe niedobory, przekraczające 60%, pojawiały się w małych zlewniach o niewielkich zasobach wodnych (Niedziczanka, Lepietnica, Wielki Rogoźnik, Grajcarek, Ochotnica), w których zarówno letnie, jak i zimowe susze hydrologiczne mogły wywoływać głębokie niżówki. Zlewnie tatrzańskie, narażone na długotrwałe niżówki zimowe, nie wykazywały deficytów względnych znacząco przekraczających wartość przeciętną. Pozostałe zlewnie cząstkowe wykazywały podobny poziom zdrenowania zasobów podczas suszy hydrologicznej.

Największą przeciętną wartość deficytu względnego odpływu niżówkowego (21,2%) zaobserwowano w zlewni Biebrzy. Dla większości przekrojów wodowskazowych deficyty dochodzące do 60% mieszczą się w zakresie wartości nieodstających rozkładu. Należy je zatem zaliczyć do typowych cech reżimu przepływów niżówkowych, związanych z wysoką ewapotranspiracją oraz z silnym drenowaniem głębokich poziomów wodonośnych przez liczne, głęboko wcięte misy jeziorne. Największy deficyt w badanym wieloleciu, sięgający 90%, odnotowano w zlewni Jegrzni po Rajgród. Przekrój ten znajduje się poniżej jeziora Rajgrodzkiego, a tak wysokie deficyty względne odpływu niżówkowego mogły być konsekwencją długotrwałych niedoborów opadów i znacznych spadków poziomu wód we wspomnianym jeziorze.

W sezonowym rozkładzie deficytów względnych niżówek w zlewniach Przymorza, Biebrzy, Warty i Wieprza największą rolę odgrywały miesiące letnie i jesienne. Z kolei w zlewni Dunajca na kształtowanie niedoborów największy wpływ miały miesiące jesienne i zimowe (rys. 13). W przypadku czterech pierwszych zlewni wzrost deficytów względnych obserwowany był już od maja i rósł aż do sierpnia, gdzie DWN osiągał wartości maksymalne – na przykład w zlewniach Przymorza było to około 37%, z kolei w zlewni Warty w niektórych przypadkach niemal 100%. Wynikało to z rozkładu opadów atmosferycznych oraz wysokiej ewapotranspiracji. Od września obserwowano spadek deficytów, a następnie ich stabilizację w okresie zimowym. Niżówki zimowe w zlewniach Przymorza, Biebrzy i Warty pojawiały się sporadycznie ze względu na coraz łagodniejsze zimy skutkujące nieznaczną retencją w pokrywie śnieżnej oraz brakiem przemarzania koryt rzecznych. Odstające elementy rozkładu w grud-

niu, styczniu i lutym świadczyły o rzadkim pojawianiu się surowych epizodów zimowych w badanym okresie (miały one miejsce głównie na początku wielolecia) lub o przedłużających się niżówkach letnio-jesiennych. W drugiej połowie badanego okresu półrocze chłodne stało się jednak okresem uzupełniania zasobów wodnych zlewni na skutek opadów deszczu przy stosunkowo niewielkiej ewapotranspiracji. W okresie wiosennym (marzec–kwiecień) niżówki pojawiały się w tych zlewniach najrzadziej i nie miały zbyt dużego natężenia za sprawą pojawiających się roztopów i towarzyszących im wezbrań lub z powodu uzupełnionej retencji po zasilaniu deszczowym podczas łagodnych zim. Dodatkowo szata roślinna znajdująca się w początkowej fazie rozwoju nie generowała jeszcze dużego natężenia procesu ewapotranspiracji.

Inaczej prezentował się miesięczny rozkład deficytów względnych odpływu niżówkowego w zlewni górskiej (rys. 13). Wzrost wartości DWN obserwowany był od września do lutego, gdzie osiągał roczne maksimum. Z kolei od kwietnia do lipca niżówki pojawiały się w tej zlewni znacznie rzadziej. Od sierpnia do października epizody niżówkowe spowodowane były brakiem zasilania opadowego, natomiast już od listopada, zdarzenia te mogły być konsekwencją magazynowania wody w pokrywie śnieżnej, często potęgowaną przemarzaniem koryt rzecznych. Stosunkowo duże deficyty obserwowano tu jeszcze w marcu, ponieważ w znacznej części zlewni Dunajca roztopy zaczynały się w kwietniu, a czasami dopiero w maju. W okresie maj–lipiec występowało w zlewni górskiej najmniej niżówek o niewielkim natężeniu, głównie z powodu ulewnych deszczy pojawiających się w tym okresie.

## Wnioski

Występowanie niżówek rzecznych jest efektem rozwoju suszy hydrologicznej w zlewni, uwarunkowanym przebiegiem warunków hydrometeorologicznych oraz grupą czynników stacjonarnych, istotnie wpływających na tempo i zasięg niedoborów zasilania. Ponadto przebieg niżówek rzecznych może być modyfikowany, a niekiedy nawet inicjowany przez intensywne działania wodnogospodarcze.

W grupie badanych zlewni, reprezentujących różne regiony fizycznogeograficzne charakterystyczne dla środowiska Polski, zauważono szereg prawidłowości decydujących o specyfice rozwoju niżówek rzecznych. Przestrzenny rozkład wiel-

kości opadów i struktury bilansu wodnego w Polsce zadecydował o przeciętnym czasie trwania niżówki oraz liczbie identyfikowanych epizodów, która malała wraz wydłużaniem jej przeciętnego czasu trwania. Regionalne uwarunkowania decydujące o cechach niżówek rzecznych dotyczyły kilku grup czynników. Warunki hydrogeologiczne, zwłaszcza pod względem stopnia retencyjności oraz tempa szczyptywania i odnawiania zasobów wód podziemnych, decydowały o występowaniu niżówek: krótkotrwałych o różnym stopniu intensywności, zazwyczaj szybko kończących się z powodu obfitych impulsów opadowych (zlewnie górskie), krótkotrwałych o niewielkim natężeniu (zlewnie Pomorza), długotrwałych o szybkim tempie rozwoju i zaniku (zlewnie nizinne), długotrwałych o powolnym tempie rozwoju i zaniku (zlewnie wyżynne). Duże znaczenie w kształtowaniu niżówek odgrywał udział jezior przepływowych i odpływowych. Determinował on wzrost czasu trwania niedoborów odpływu, a także powolne tempo rozwoju i zaniku niżówki. Czynnikiem ten w zlewniach jeziornych miał charakter dominujący, gdyż w rozkładach czasów trwania niżówki brakowało elementów odstających rozkładu, co świadczy o jednorodnym reżimie przepływów niżówkowych.

Uwarunkowania klimatyczne istotnie oddziaływały na regionalne zróżnicowanie sezonowych cech kształtowania niedoborów odpływu. W zlewniach górskich dominowały niżówki zimowe związane z odcięciem zasilania zlewni przez magazynowanie wody w pokrywie śnieżnej, potęgowane procesem przemarzania koryt (zlewnie tatrzańskie). W zlewniach wyżynnych i na niżu występowały głównie niżówki letnie i letnio-jesienne. Te pierwsze są szczególnie istotne dla zlewni, w których dużą rolę w obiegu wody odgrywa ewapotranspiracja, często wspomagana występowaniem obszarów podmokłych i zbiorników wodnych (zlewnia Biebrzy i Warty).

Działalność człowieka mająca wpływ na kształtowanie niżówek rzecznych widoczna w skali regionalnej manifestowała się przede wszystkim aktywnością górniczą. Odwodnienia kopalń prowadzące do rozwoju lejów depresyjnych (na przykład Bełchatów, Konin, Bogdanka) istotnie wpływały na wydłużanie i głębokość niżówek rzecznych. Jednocześnie, w wyniku tej samej działalności, część cieków będących odbiornikami wód dołowych została uszczelniona w celu odprowadzania zrzutów poza obszar górniczy. W efekcie w ciekach tych niżówki uległy skróceniu i spłyceniu. Podobny efekt ograniczania rozwoju niżówek zaobserwowano w ciekach odbie-

rajających wody z oczyszczalni obsługujących aglomeracje miejskie (na przykład Bystrzyca – Lublin, Ner – Łódź).

Warto podkreślić, że niektóre cechy niżówek rzecznych były wspólne dla wszystkich badanych zlewni. Przede wszystkim wszędzie dochodziło do grupowania czasowego lat suchych i wilgotnych skutkujących występowaniem serii długotrwałych niżówek, a potem ich brakiem. Długość tych okresów oraz stopień ich powtarzalności różni się nieco między zlewniami, jednak samo zjawisko wykazuje wszędzie podobny wzorzec. Ponadto w żadnej zlewni nie zanotowano statystycznie istotnego trendu liniowego zmian czasu trwania niżówek rzecznych, ułożonych na osi czasu w rzeczywistej chwili ich wystąpienia w okresie 1989–2018. Zatem z punktu widzenia kształtowania reżimu przepływów niżówkowych nie ma podstaw do wnioskowania o istnieniu wieloletniej składowej systematycznej prowadzącej do istotnej transformacji cech reżimu.

## Literatura

- Bobiński B., Meyer W. 1992. Susza w Polsce w latach 1982–1992. Ocena hydrologiczna. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* 4: 3-24.
- Cammalleri C., Vogt J., Salamon P. 2017. Development of an operational low-flow index for hydrological drought monitoring over Europe. *Hydrological Sciences Journal* 62(3): 346-358.
- Chełmicki W., Bieńkowski T. 2005. Przepływy niżówkowe w dorzeczu górnego Dunajca w 2003 roku na tle wielolecia 1951–2003. *Folia Geographica. Seria Geographica Physica* 35: 65-75.
- Choi W., Borchardt S.A., Choi J. 2022. Human Influences and Decreasing Synchrony between Meteorological and Hydrological Droughts in Wisconsin Since the 1980s. *Annals of the American Association of Geographers* 112(1): 36-55.
- Choiński A. 2017. Geneza i rozmieszczenie jezior. W: P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.) *Hydrologia Polski*. PWN, Warszawa: 223-229.
- Ciepielowski A., Kaznowska E. 2007. A Description of Hydrological Droughts in the Białowieża Primeval Forest in the Years 2003–2005. *Geographia Polonica* 80(2): 125-136.
- Dębski K. 1970. *Hydrologia*. Arkady, Warszawa.
- Dhawale R., Paul S., George J.S. 2023. Water balance analysis using Palmer Drought Severe-

- ity Index for drought-prone region of Marathwada, India. *International Journal of River Basin Management* 21(4): 731-742.
- Dierauer J.R., Allen D.M., Whitfield P.H. 2021. Climate change impacts on snow and streamflow drought regimes in four ecoregions of British Columbia. *Canadian Water Resources Journal* 46(4): 168-193.
- Dubicki A. (red.). 2002. Zasoby wodne w dorzeczu górnej i środkowej Odry w warunkach suszy. Wyd. IMGW, Warszawa
- Farat R., Kępińska-Kasprzak M., Kowalczyk P., Mager P. 1995. Susze na obszarze Polski w latach 1951–1990. *Materiały Badawcze Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Gospodarka Wodna i Ochrona Wód* 16.
- Fleig A.K., Tallaksen L.M., Hisdal H., Hannah D.M. 2010. Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types, *Hydrological Processes*, online w Wiley Inter-Science.
- Graf R. 2015. Reference statistics for the structure of measurement series of groundwater levels (Wielkopolska Lowland, western Poland). *Hydrological Sciences Journal* 60(9): 1587-1606.
- Han J., Singh V.P. 2023. A review of widely used drought indices and the challenges of drought assessment under climate change. *Environmental Monitoring and Assessment* 195: 1-25.
- Hannaford J., Lloyd-Hughes B., Keef C., Parry S., Prudhomme C. 2011. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrological Processes* 25: 1146-1162.
- Hisdal H. 2009. Streamflow deficit. W: S. Demuth, A. Gustard (red.) *Manual on low-flow. Estimation and Prediction*. Operational Hydrology Report No. 50. WMO Publication No. 1029, Geneva: 71-76.
- Hisdal H., Tallaksen L.M., Peters E., Stahl K., Zaidman M. 2001. Drought Event Definition, W: S. Demuth, K. Stahl (red.) *Assessment of the Regional Drought Impact of Droughts in Europe*. Institute of Hydrology, University of Freiburg: 17-26.
- Hisdal H., Tallaksen L.M., Clausen B., Peters E., Gustard A. 2004. Hydrological Drought Characteristics. W: L.M. Tallaksen, H.A.J. van Lanen (red.) *Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Science 48, Elsevier, Amsterdam: 139-198.
- Jaguś A., Rzętała M. 2000. Zbiornik Poraj: charakterystyka fizycznogeograficzna. Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec.
- Jańczak J., Kowalik A., Sziwa R. 1994. Reakcja stanów wody jezior dorzecza Odry na suszę lat 1989–1992. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* 2: 117-124.
- Jokiel P. 1994. Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. *Acta Geographica Lodziensia* 66–67.
- Jokiel P., Bartnik A. 2020. Ner. Monografia hydrologiczna niekochanej rzeki. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kasprzyk A. 2010. Prawdopodobieństwo wystąpienia niżówek w zlewniach rzek województwa świętokrzyskiego. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.) *Woda w badaniach geograficznych*. Wyd. Uniwersytetu Jana Kochanowskiego, Kielce: 273-208.
- Kozek M. 2018. Spatial variability of low-flows in the upper Warta river catchment. *Acta Scientiarum Polonorum – Seria Formatio Circumiectus* 17(3): 67-76.
- Kozek M., Tomaszewski E. 2019. Spatial development of hydrological droughts in lake catchments. *Limnological Review* 19(4): 159-174.
- Kozek M., Tomaszewski E. 2022. Dynamics of hydrological droughts propagation in mountainous catchments. *Miscellanea Geographica, Regional Studies on Development* 26(2): 111-124.
- Kożuchowski K.M. 2017. Opady atmosferyczne. W: P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.) *Hydrologia Polski*. PWN, Warszawa: 36-44.
- Laaha G. 2002. Modelling summer and winter droughts as a basis for estimating river low flows. W: *FRIEND 2002 – Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice* (Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference held at Cape Town, South Africa, March 2002), IAHS Publication 274: 289-295.
- Michalczyk Z., Chmiel S., Chmielewski J., Turczyński M. 2007. Hydrologiczne konsekwencje eksploatacji złoża węgla kamiennego w rejonie Bogdanki (LZW). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 422: 113-126.
- Mioduszewski W., Ślesicka A., Querner E. 2004. Warunki zasilania doliny dolnej Biebrzy, *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie* 4, 1(10): 67-78.
- Mukhawana M.B., Kanyerere T., Kahler D., Masilela N.S., Lalumbe L., Umunezero A.A. 2024. Hydrological drought assessment using

- the standardized groundwater index and the standardized precipitation index in the Berg River Catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 53: 1-17.
- Ogunrinde A.T., Oguntunde P.G., Olasehinde D.A., Fasinmirin J.T., Akinwumiju A.S. 2020. Drought spatiotemporal characterization using self-calibrating Palmer Drought Severity Index in the northern region of Nigeria. *Results in Engineering* 5: 2-12.
- Ozga-Zielińska M. 1990. Niżówki i wezbrania – ich definiowanie i modelowanie. *Przegląd Geofizyczny* 1–2: 33-44.
- Paszyński J., Niedźwiedz T. 1999. Klimat W: L. Starkel (red.) *Geografia Polski. Środowisko Przyrodnicze*. PWN, Warszawa: 343-373.
- Pfister Ch., Weingartner R., Luterbacher J. 2006. Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach. *Hydrological Sciences Journal* 51(5): 966-985.
- Poshtiri M.P., Towler E., Pal I. 2018. Characterizing and understanding the variability of streamflow drought indicators within the USA. *Hydrological Sciences Journal* 63(12): 1791-1803.
- Raczyński K. 2018. Przepływy niżówkowe rzek Lubelszczyzny. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin.
- Raczyński K., Dyer J. 2020. Multi-annual and seasonal variability of low-flow river conditions in southeastern Poland. *Hydrological Sciences Journal* 65(15): 2561-2576.
- Sene K. 2010. *Hydrometeorology. Forecasting and Applications*. Springer, Dordrecht-Heidelberg-London-New York.
- Smakhtin V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240: 147-186.
- Tabrizi A.A., Khalili D., Kamgar-Haghighi A.A., Zand-Parsa S. 2010. Utilization of Time-Based Meteorological Droughts to Investigate Occurrence of Streamflow Droughts. *Water Resources Management* 24: 4287-4306.
- Tallaksen L.M., Madsen H., Clausen B. 1997. On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal* 42(1): 15-33.
- Teutschbein C., Montano B.Q., Todorović A., Grabs T. 2022. Streamflow droughts in Sweden: Spatiotemporal patterns emerging from six decades of observations. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 42: 1-26.
- Tokarczyk T. 2010. Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej. Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Tokarczyk T. 2013. Classification of Low Flow and Hydrological Drought for a River Basin. *Acta Geophysica* 61(2): 404-421.
- Tokarczyk T., Szalińska W., Walczykiewicz T., Andykiewicz-Piragas M. 2022. Susza: przyczyny, propagacja i konsekwencje – część II. *Gospodarka Wodna* 5: 9-16.
- Tomaszewski E. 2012. Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź
- Tomaszewski E. 2014. Dynamika niedoborów odpływu niżówkowego w rzekach poddanych silnej antropopresji. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.) *Woda w mieście*. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG 2: 289-300.
- Wibig J. 2017. Klimatyczny bilans wodny. W: P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.) *Hydrologia Polski*. PWN, Warszawa.
- Yevjevich V. 1967. An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Drought. *Hydrology Paper* 23. Colorado State University, Fort Collins, Colorado
- Yildirim G., Rahman A., Singh V.P. 2022. Meteorological and hydrological drought hazard, frequency and propagation analysis: A case study in southeast Australia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 44: 1-19.
- Zelenhasic E., Salvai A. 1987. A Method of Streamflow Drought Analysis. *Water Resources Research* 23(1): 156-168.

## Summary

The aim of the study was to identify and assess the variability of river low-flows in five big catchments in Poland which, due to their size and location, reflect the leading features of the physico-geographical regions in which they are located. Investigation covered 92 water gauge cross-sections with daily discharge series from the period 1989–2018. The data were taken from the Polish Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute database. Low-flows were identified based on the Threshold Level Method in which the multiannual truncation level corresponded to the 70th percentile of the Flow Duration Curve. The analyses included multiannual and seasonal variability in the duration of low-flows and their streamflow deficits as well as derived measures.

The study assumed that the occurrence of river low-flows is the result of the development of hydrological drought in the catchment. This process is determined by the course of hydrometeorological conditions and a group of stationary factors that significantly influence the rate and extent of alimentation shortages. Moreover, the course of river low-flows may be modified and sometimes even initiated by intensive water management activities.

In the group of studied catchments, which represent various physico-geographical regions characteristic of the environment of Poland, a number of regularities were noted that determine the specificity of the development of river low-flows. The spatial distribution of precipitation and the structure of the water balance in Poland determined the average duration of a low-flow and the number of identified episodes, which decreased as its average length increased. The regional conditions that determine the characteristics of river low-flows comprised several groups of factors. Hydrogeological determinants, especially in terms of retention and the rate of recession and renewal of groundwater resources, determined the occurrence of low-flows: short-term with varying intensity, usually terminating quickly due to abundant rainfall impulses (mountainous catchments), short-term with low intensity (Pomerania catchments), long-term with a rapid rate of development and decline (lowland catchments), long-term with a slow rate of development and decline (upland catchments). The share of lakes actively connected to the river network played a sig-

nificant role in shaping low-flows, determining the increase in the duration of streamflow deficits with a slow rate of development and recession. This factor was dominant in lake catchments because there were no outliers in the low-flow duration distributions, which indicates a homogeneous low-flow regime.

Climatic conditions significantly influenced the regional variations in seasonal features of streamflow deficits. Mountainous catchments were dominated by winter low-flows that were associated with the catchment's alimentation being cut off due to water being stored in the snow cover, further intensified by the process of river beds freezing (Tatra catchments). In the upland and lowland basins, summer and summer–autumn low-flows dominated. The former were particularly important for catchments where evapotranspiration plays an important role in the water cycle that is often intensified by the presence of wetlands and water reservoirs (the Biebrza and Warta catchments).

Human activity influencing the formation of river low-flows is visible on a regional scale, manifesting primarily as mining activity. Drainage of mines, leading to the development of depression sinks (e.g., Bełchatów, Konin, Bogdanka) significantly influenced the length and depth of river low-flows. At the same time, as a result of the same activity, some of the streams receiving mine water were sealed in order to discharge water outside the mining area. As a result, low-flows in these streams have become shorter and less intensive. A similar effect of limiting the development of low-flows was observed in river channels alighting water from treatment plants serving urban agglomerations (e.g., the Bystrzyca River, Lublin; the Ner River, Łódź).

It is worth emphasising that some features of river low-flows were common to all studied catchments. First of all, there was a temporal grouping of dry and wet years, resulting in a series of long-term low-flows and then their absence. The length of these periods and the degree of their repetition vary slightly between catchments, but the phenomenon itself follows a similar pattern everywhere. Moreover, no statistically significant linear trend in changes in the duration of river low-flows was recorded in any catchment in the period 1989–2018. Therefore, from the point of view of shaping the low-flows' regime, there are no grounds to conclude about the existence of a long-term systematic component leading to a significant transformation of the features of this regime.