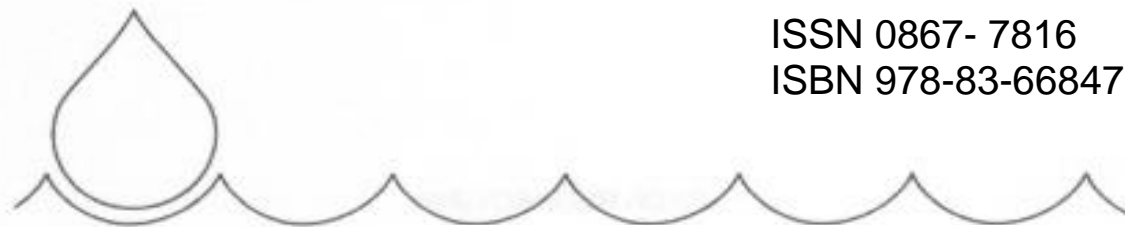


ISSN 0867- 7816
ISBN 978-83-66847-00-2



Zeszyt 44

Monografie
Komitetu
Gospodarki
Wodnej
Polskiej
Akademii
Nauk

2021

**PRZESTRZENNO-CZASOWA
ANALIZA RYZYKA WYSTĄPIENIA
NIŻÓWEK MAKSYMALNYCH
W PRAWOBRZEŻNEJ CZĘŚCI
ZLEWNI GÓRNEJ WISŁY**

Katarzyna BARAN - GURGUL

WARSZAWA 2021

RADA REDAKCYJNA

Beniamin Więżik - WSA, Bielsko-Biała, przewodniczący
Kazimierz Banasik - SGGW Warszawa, wiceprzewodniczący
Kaz Adamowski - University of Ottawa, Kanada
Jean Cunge - SOGREAH Grenoble, Francja
Małgorzata Gutry-Korycka - Uniwersytet Warszawski
Roman Krzysztofowicz - University of Virginia, USA
Zbigniew Kundzewicz – ZBŚRiL PAN, Poznań
Maciej Maciejewski - IMGW-PIB, Warszawa
Artur Magnuszewski - Uniwersytet Warszawski
Wojciech Majewski - IMGW-PIB, Warszawa
Jarosław Napiórkowski - Instytut Geofizyki PAN
Tomasz Okruszko - SGGW Warszawa
Romuald Szymkiewicz - Politechnika Gdańska
Stanislas Wicherek - Université Paris IV Sorbonne, Francja

Ewa Sawicka-Madejska - Sekretarz Rady Redakcyjnej
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61
e-mail: kgw@imgw.pl

RECENZENCI

Kazimierz Banasik, Andrzej Wałęga

Opracowanie redakcyjne Marek Madzia

© Copyright by Komitet Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

Druk i oprawa: Drukarnia Cyfrowa „Ganimedes”
ul. Cieszyńska367, 43-300 Bielsko-Biała

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	5
1.1. Przegląd badań na temat zmienności czasowej i obszarowej niżówek i susz w Polsce	7
1.1.1. Zasoby wodne Polski	7
1.1.2. Obszary w Polsce potencjalnie najbardziej narażone na wystąpienie niżówki ..	7
1.1.3. Historyczne susze na ziemiach polskich	13
1.1.4. Niżówki w Polsce w XX wieku	14
1.1.5. Niżówki na obszarze zlewni Górnej Wisły	15
1.2. Niżówka jako etap rozwoju procesu suszy	17
1.2.1. Susza atmosferyczna (meteorologiczna)	17
1.2.2. Susza glebowa (rolnicza)	18
1.2.3. Susza hydrologiczna (niżówka wód podziemnych, niżówka wód powierzchniowych).....	18
1.2.4. Susza społeczno-ekonomiczna	20
1.3. Metody definiowania niżówki rzecznej	20
1.3.1. Przepływ graniczny	20
1.3.2. Charakterystyki niżówki	23
1.3.3. Niżówka maksymalna	28
1.4. Cel i zakres pracy	29
2. Obszar badań oraz dane źródłowe	30
2.1. Charakterystyka fizyczno-geograficzna zlewni Górnej Wisły oraz lokalizacja przekrojów wodowskazowych	30
2.2. Przepuszczalność gleb.....	34
2.3. Klimat.....	35
2.4. Charakterystyka zlewni badawczych	37
2.5. Dane źródłowe	38
2.6. Zbiorniki retencyjne i antropopresja w zlewni Górnej Wisły.....	44
3. Niżówki w badanej części zlewni Górnej Wisły	47
3.1. Wstęp	47
3.2. Przepływ graniczny i wyjściowe ciągi niżówek	48
3.3. Lata z niżówkami i bez niżówek. Niżówki na przełomie lat	51
3.4. Liczba niżówek, średni czas ich trwania oraz średnia ich objętość w badanym wieloleciu	55
3.5. Średnia roczna liczba niżówek.....	63
3.6. Zmienność charakterystyk niżówek wzdłuż rzeki	65
4. Niżówki maksymalne roczne na badanym obszarze	74
4.1. Wstęp	74
4.2. Średnie wartości czasu trwania i objętości niżówki maksymalnej	78
4.3. Sezonowość początku i końca niżówki maksymalnej	83
4.4. Korelacja czasu trwania i objętości niżówki maksymalnej.....	87

5. Stacjonarność szeregów charakterystyk niżówek maksymalnych.....	92
5.1. Wstęp	92
5.2. Wybór metody testowania stacjonarności.....	92
5.3. Wyniki i dyskusja.....	94
6. Rozkład prawdopodobieństwa czasu trwania oraz rozkład prawdopodobieństwa objętości niżówki maksymalnej	101
6.1. Estymacja rozkładów prawdopodobieństwa charakterystyk niżówek maksymalnych rocznych metodami AMS i PDS.....	101
6.2. Identyfikacja rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych T_{max} i V_{max}	102
6.3. Wybór metody estymacji rozkładów zmiennych T_{max} i V_{max}	102
6.4. Wybór testu zgodności.....	104
6.5. Wyniki i dyskusja.....	105
6.5.1. Wstęp.....	105
6.5.2. Estymacja parametrów rozkładów charakterystyk niżówki maksymalnej i wybór rozkładu optymalnego	106
6.5.3. Okres powtarzalności czasu trwania i objętości niżówki maksymalnej	112
6.5.4. Rozkład przestrzenny czasu trwania i objętości 10-i 50-letniej niżówki maksymalnej	114
7. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	130
7.1. Niżówki surowe	130
7.2. Niżówki maksymalne roczne	131
7.3. Stacjonarność szeregów czasowych charakterystyk niżówek maksymalnych rocznych i ich rozkłady prawdopodobieństwa.....	132
7.4. Rozkład przestrzenny czasu trwania i objętości niżówek 10-i 50-letnich	132
Bibliografia	135
Załącznik.....	142
Streszczenie	155
Abstract.....	156

„Początkiem wszechrzeczy jest woda”
Tales z Miletu

1. WPROWADZENIE

Woda jest niezbędna człowiekowi w każdym obszarze jego działalności. Jednocześnie jej niedostatek lub nadmiar stanowi zagrożenie mogące w ekstremalnych przypadkach przekształcić się w suszę lub powódź, przynosząc znaczne straty gospodarcze, których skutki mogą być odczuwane nawet w dłuższym horyzoncie czasowym.

Termin *susza* – choć wydaje się, że każdy rozumie jego istotę – nie poddaje się prostej i jednej definicji pozwalającej na jasną i precyzyjną komunikację w tym obszarze. Generalnie susza oznacza trwający pewien stan niedostatku czy braku wody; jest złożonym i wieloaspektowym procesem czasoprzestrzennym, nie poddającym się jednoznacznej i obiektywnej definicji. Badacze z różnych dziedzin postrzegają suszę w odmienny sposób i w różny sposób ją opisują. Dla geofizyków ma ona charakter klimatologiczny, meteorologiczny, hydrologiczny, limnologiczny, glaciologiczny; może też dotyczyć aspektów fizyki gleby (Yevjevich 1967). Inżynierowie do opisu suszy wykorzystują zbiór zmiennych m.in. takich jak opad atmosferyczny lub przepływ. Dla rolników susza jest ściśle związana z potrzebami wodnymi różnych upraw, zaś susza z punktu widzenia gospodarczego odnosi się do zagadnień ekonomicznych w obszarze działalności człowieka.

Niejednoznaczność i wieloaspektowość suszy jest wzmacniana przez różnorodne nazewnictwo z nią związane: posucha, susza atmosferyczna, susza glebowa, przepływ/odpływ niski, niżówka, susza hydrologiczna itp., które również same w sobie nie są jednoznaczne i jednoznacznie rozumiane (Walawander 1932, Namaczyńska 1937, Szewczuk 1939, Dębski 1949, 1952 i 1970, Mikulski 1963, Koniar-Schaeffer 1971 i 1972, Vladimirov 1976, Stachy i in. 1979 i 1986, Koźmiński 1986, Byczkowski 1999, Stahl 2001, Tallaksen i van Lanen 2004, Tokarczyk 2010, Tomaszewski 2012b).

Według „Międzynarodowego słownika hydrologicznego” (Magnuszewski i Soczyńska 2001) „susza jest okresem wyjątkowo suchej pogody, dostatecznie długim, aby wywołać braki wody, o czym świadczy obniżenie zwierciadła wody w jeziorach, zmniejszanie wilgoci glebowej oraz obniżenie poziomu wód gruntowych”. Niektórzy autorzy uważają, że susza jest naturalną cechą klimatu, określaną jako zauważalny brak wody w środowisku skutkujący szkodami w środowisku i gospodarce, stanowiący uciążliwość, a nawet zagrożenie dla ludności (Hisdal i Tallaksen 2000, Wilhite 2005, Tokarczyk i in. 2012). Beran i Rodier (1985), a także zespół badawczy skupiony w projekcie *Flow Regimes From International Experimental and Network Data* (FRIEND) (Tallaksen i van Lanen 2004) definiują suszę jako zjawisko ciągłe o zasięgu regionalnym, które charakteryzuje odchylenie od warunków normalnych opadów, wilgotności, stanów wody gruntowej, przepływów w rzekach.

Szewczuk (1939) w następujący sposób opisuje zjawisko suszy i jej następstwa: „Upały i posuchy letnie działają szkodliwie na wszelkiego rodzaju kultury przez spowodowanie braku potrzebnej i koniecznej wilgoci, wywołując nieurodzaje. Obniżone nadmiernie wskutek braku opadów stany wód, zwłaszcza na rzekach spławnych uniemożliwiają komunikację, transporty handlowe zboża, drewna i innych artykułów. Spławy osiadłe wskutek tego po mieliznach nieraz zmuszone są tam przezimować.

Wyschłe potoki nie mogą obsługiwać urządzeń, które mają za zadanie poruszać. W lasach i zabudowaniach upały sprzyjają powstaniu pożarów. Groźne są dla zdrowia i życia ludzi i zwierząt.”

Dębski (1970) określa suszę jako okres długotrwałego braku opadu lub znacznego niedoboru opadów w stosunku do parowania i wyróżnia następujące fazy suszy: atmosferyczną, glebową i hydrologiczną. Niżówka rzeczna stanowi ostatni etap w cyklu rozwojowym suszy (Byczkowski 1999). Podobna systematyka przyjmowana jest w wielu pracach (Byczkowski 1999, Stahl 2001, Tallaksen i van Lanen 2004, Tomaszewski 2012b, *Rozporządzenie Ministra Środowiska* 2007, Tokarczyk 2010, *National Drought Mitigation Center* 2018).

Dębski (1952) rozpatruje suszę z dwóch punktów widzenia: przyrodniczego i ekonomicznego. Wielu autorów dodatkowo wyróżnia czwartą fazą rozwoju suszy: społeczno-ekonomiczną (Wilhite i Glanz 1987, Wilhite 2005, Maidment 1993, Mishra i Singh 2010 i 2011).

W ustawie Prawo wodne (2017) w kilku paragrafach są odwołania do suszy w kontekście ochrony przed powodzią i suszą oraz zapobiegania ich skutkom; podano wiele definicji, w tym m. in. powodzi, nie określono jednak co ustawodawca rozumie pod pojęciem suszy. Ustalono natomiast, że ochronę przed suszą prowadzi się zgodnie z planami przeciwdziałania skutkom suszy. Taki plan został sporządzony dla regionu wodnego Górnej Wisły na zlecenie RZGW Kraków (Jarząbek i in. 2015). W pracy tej susza rozumiana jest jako zjawisko naturalne, które odznacza się czasowym, negatywnym i dużym odchyleniem od średnich wartości opadów, występującym przez znaczący okres na dużym obszarze. Osobno zdefiniowano pojęcie niedoboru wody, który wynika z nadmiernego wykorzystywania zasobów wodnych, w stopniu przewyższającym ich naturalnie odnawialną dostępność. W opracowaniu uwzględniono cztery rodzaje suszy: atmosferyczną, hydrogeologiczną, rolniczą i hydrologiczną. Za suszę hydrologiczną uznano okres, w którym przepływy w rzekach spadają poniżej przepływu granicznego.

W 2017 roku opublikowana została opracowana przez Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej metodyka dla opracowania wymaganych przez ustawę Prawo wodne (2017) planów przeciwdziałania skutkom suszy (KZGW 2017). Metodyka ta ujednotliła w skali kraju m.in. sposób identyfikacji obszarów zagrożonych zjawiskiem suszy oraz narażonych na jej skutki. Na podstawie serii danych wejściowych wyznacza się m. in. okres wystąpienia, czas trwania i intensywność suszy (atmosferycznej, rolniczej, hydrologicznej i hydrogeologicznej) w zdefiniowanej metodyką polach podstawowych. Następnie dla każdego rodzaju suszy określa się wskaźnik umożliwiający ocenę stopnia zagrożenia obszaru suszą: obszar silnie zagrożony, bardzo zagrożony, umiarkowanie zagrożony lub niezagrażony.

Akceptowana ogólnie ramowa definicja suszy określa ją jako czasoprzestrzenny proces obejmujący cztery etapy: suszę atmosferyczną, suszę glebową, suszę hydrologiczną i suszę socjoekonomiczną (Wilhite i Glanz 1987). W tym podziale, określenie posucha odnosi się do suszy atmosferycznej, która oznacza długotrwałe okresy bezopadowe (Kozłowski 1986). W niektórych pracach termin odpływ niski (niższy niż średni) stosowany jest zamiennie z niskimi przepływami rocznymi, np. SNq lub NNq (Stachy i in. 1979 i 1986) lub liczony jest jako minimalny przepływ 30-dniowy (Vladimirov 1976). Mikulski (1963) lub Dębski (1970) za niżówkę uważają okres występowania niskich stanów wody w rzece. Niżówka, zazwyczaj utożsamiana z suszą hydrologiczną, jest rozumiana jako okres występowania niskich stanów wody w rzece (Mikulski 1963, Dębski 1970) lub, najczęściej, jako okres, w którym przepływ w rzece jest nie większy od ustalonej wartości granicznej. Taki sposób określania niżówek,

został wprowadzony w Stanach Zjednoczonych przez Yevjevicha (1967), a w Polsce przez Zielińską (1963b). Susze glebowa i socjoekonomiczne są bezpośrednio związane z zaspokajaniem określonych potrzeb (wegetacji i człowieka), susze atmosferyczna i hydrologiczna (niżówka) nie wymagają (na ogół) takiej informacji.

1.1. Przegląd badań na temat zmienności czasowej i obszarowej niżówek i susz w Polsce

Stosowane dalej pojęcie niskie przepływy jest rozumiane w sensie przepływy niższe od przepływu średniego z wielolecia.

1.1.1. Zasoby wodne Polski

Zasoby wodne Polski, zarówno wód powierzchniowych, jak i podziemnych, są stosunkowo niewielkie w porównaniu z innymi krajami Europy (Bartnik 2005, Kundzewicz i in. 2010, Bartnik i Jokiel 2012, GUS 2017, Jokiel i in. 2017). Byczkowski (1999) zauważa, że na tle wybranych rzek świata, odpływy rzek polskich układają się poniżej przeciętnej. Średni odpływ wód podziemnych w Polsce szacuje się na $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, przy średniej w Europie $3,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Jokiel i in. 2017).

Według wskaźnika eksploatacji wód *WEI* (*Water Exploitation Index*) określającego stosunek ilości pobieranej wody do całkowitych zasobów wodnych kraju, Polska plasuje się nieco poniżej średniej europejskiej (Kundzewicz i in. 2010). Stosunek średniego rocznego odpływu rzecznoego do liczby mieszkańców w Polsce wynosi ok. $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ i jest trzykrotnie niższy niż w Europie i 4,5-krotnie niższy niż na świecie (Bartnik 2005, GUS 2017). Według klasyfikacji dostępności wody, zawartej w Programie Środowiskowym Organizacji Narodów Zjednoczonych UNEP (2002) (*United Nations Environment Programme*), Polska należy do krajów o bardzo małej dostępności wody ($1000\text{-}2000 \text{ m}^3 \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$).

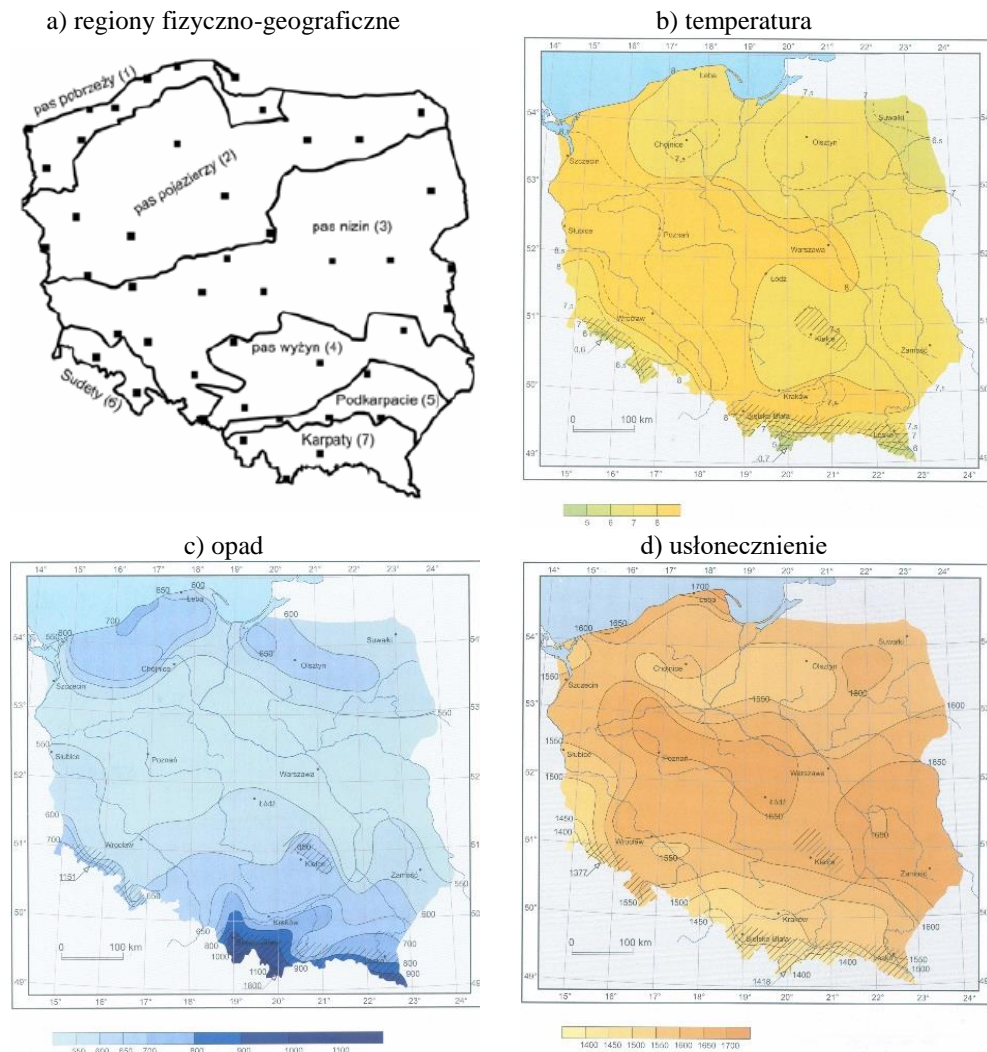
Ilość wody w zbiornikach naturalnych i sztucznych jest skromna. Liczba jezior w Polsce znacznie zmalała w ostatnich dziesięcioleciach: w 1954 roku było 9296 jezior o powierzchni powyżej 1 ha, podczas gdy w 2017 roku – 7081 jezior. Średni wskaźnik jeziorności dla Polski zmalał w tym czasie z 1,01% do 0,9% (Jokiel i in. 2017).

Łączna pojemność zbiorników retencyjnych w Polsce wynosi 3522 mln m^3 (przy pojemności użytkowej wynoszącej niespełna 1%), co stanowi 0,11% powierzchni Polski (Diagnoza 2010, Małecki i Pokładek 2010). W polskich zbiornikach można zgromadzić 6% objętości średniego rocznego odpływu z wielolecia (w krajach sąsiednich 10-12%), co jest wartością małą w stosunku do innych krajów europejskich, gdzie wskaźnik ten sięga 15% (Nachlik i in. 2001, Małecki i Pokładek 2010).

1.1.2. Obszary w Polsce potencjalnie najbardziej narażone na wystąpienie niżówki

Niżówka rzeczna jest następstwem przede wszystkim długotrwałego braku opadów atmosferycznych. Innymi czynnikami meteorologicznymi mogącymi wpływać na obniżanie się wielkości przepływu są te, które wpływają na wielkość parowania: usłonecznienie, prędkość wiatru i temperatura powietrza (Tlałka 1981). Rozkłady średniej rocznej temperatury powietrza, średniej sumy opadów i usłonecznienia (rys. 1.1) przedstawione w Atlasie Klimatu Polski (Lorenc 2005) wskazują, że obszarami naj-

bardziej narażonymi na występowanie suszy hydrologicznej są Niziny Środkowopolskie i Wyżyna Lubelska – obszary o najniższych opadach, najwyższych temperaturach i największym usłonecznieniu.



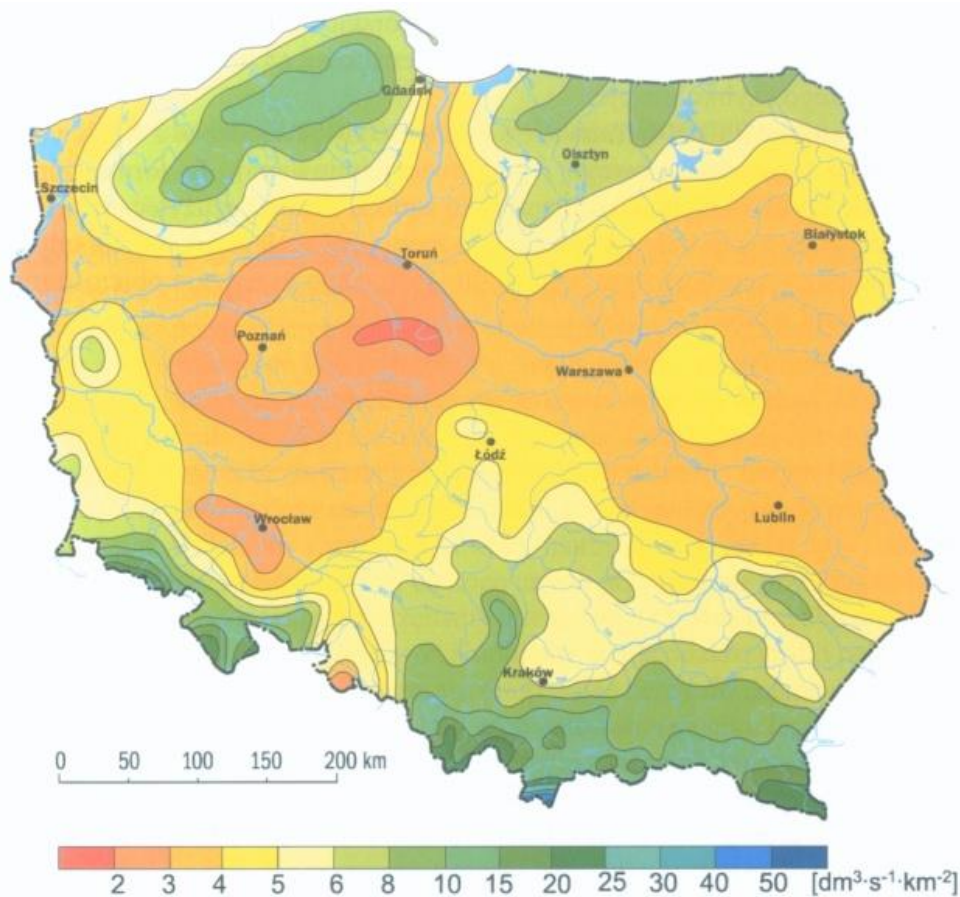
Rys. 1.1. Podział Polski na regiony fizycznogeograficzne (a) (Limanówka i in. 2012) oraz wartości średnie roczne z wielolecia 1971-2000: b) temperatury powietrza [°C], c) sumy opadów atmosferycznych [mm], d) sumy usłonecznienia [godz] (źródło: Lorenc, red. 2005).

Fig. 1.1. a) Physico-geographical regions of Poland (Limanówka et al. 2012) and the 1971-2000 annual average values, b) air temperature [°C], c) precipitation totals [mm], d) sunshine duration totals [hour]

Wykorzystując regionalizację Kondrackiego (2000), Limanówka i in. (2012) określili średnią roczną obszarową (regionalną) temperaturę powietrza w Polsce, na podstawie wybranych 45 stacji synoptycznych, w okresie 1951-2008 w siedmiu regionach fizycznogeograficznych: w pasie Pobrzeży, Pojezierzy, Nizin, Wyżyn oraz na Podkarpaciu, w Sudetach i Karpatach (rys. 1.1a). Na Pobrzeżach, Nizinach i Podkarpaciu temperatura ta wynosiła 8,1°C, natomiast na Pojezierzach i Wyżynach, było nieznacznie chłodniej (7,8°C). Sudety były w skali roku nieznacznie cieplejsze od Karpat (obliczona średnia obszarowa temperatura nie uwzględniała stacji wysokogórskich). Różnica między najcieplejszym regionem – Podkarpaciem, a najchłodniejszym – Karpatami wynosiła 0,9°C.

Średnia obszarowa suma opadów w Polsce wynosi nieco powyżej 600 mm. Li-manówka i in. (2012) przeanalizowali opady z lat 1961-2009 z 311 stacji IMGW rozmieszczonych równomiernie na terenie całej Polski. Średnia obszarowa roczna wysokość opadów atmosferycznych z lat 1961-2009 w Polsce wynosiła 627 mm, na obszarze Zewnętrznych Karpat Zachodnich oraz Sudetów przekraczała 700 mm, a w Centralnych Karpatkach Zachodnich – 1000 mm. Najniższe wartości średniej obszarowej wysokości opadów występują w centralnej Polsce: na obszarze Nizin Środkowopolskich oraz na Polesiu (548 mm). W zlewni Górnej Wisły maksymalne roczne sumy opadu z okresu 1951-2007 osiągnęły wysokość ok. 930 mm, minimalne zaś wynosiły około 590 mm (Marcinkowski i Winter 2012).

Średni roczny odpływ wód powierzchniowych Polski w latach 1980-2015, łącznie z dopływami spoza granic kraju, wyniósł $59,9 \text{ km}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$, z czego zasoby własne stanowiły $51,9 \text{ km}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ (GUS 2017), co odpowiada odpływowi jednostkowemu $5,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, przy średniej europejskiej $9,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Zasoby te charakteryzują się nierównomiernością przestrzenną (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Średni odpływ jednostkowy w Polsce (źródło: Bartnik i Jokiel 2012).

Fig. 1.2. Average unit outflow in Poland (source: Bartnik and Jokiel 2012).

Obszarem najmniej zasobnym w wodę jest środkowy pas Polski (rys. 1.2). Najmniejsze odpływy średnie jednostkowe notowane są na Kujawach, lokalnie bywają one niższe od $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Bartnik i Jokiel 2012). Zasobność zlewni karpackich rośnie wraz ze wzrostem wysokości położenia zlewni – od niecałych $8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, w pogórskich zlewniach graniczących z Kotliną Sandomierską, poprzez $15\text{-}20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ w wysokich partiach Beskidów, do ponad $50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ w tatrzańskiej

części zlewni Dunajca (Soja 2002).

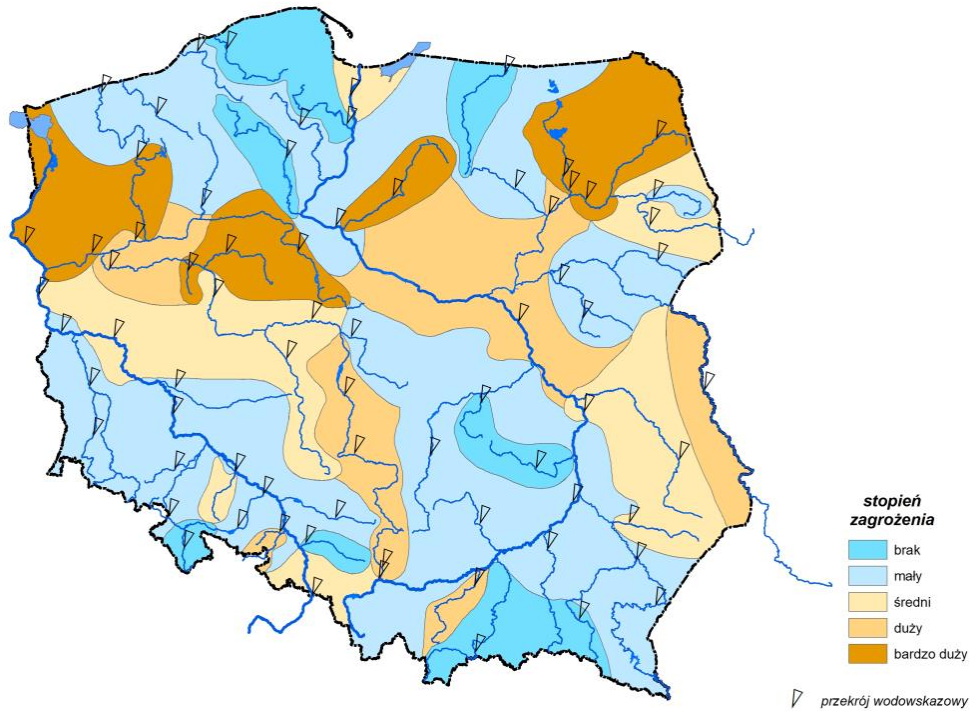
Rozkład przestrzenny średniego odpływu jednostkowego przedstawiony na rys. 1.2 przypomina w ogólnych zarysach rozkład opadu normalnego (rys. 1.1c).

Największe średnie odpływy jednostkowe w Polsce we wszystkich porach roku występują w Sudetach i Karpatach, a także na Pojezierzu Pomorskim, zaś najmniejsze notowane są na Nizinie Wielkopolskiej, a szczególnie na Kujawach (Dynowska 1972, Bartnik 2005, Bartnik i Jokiel 2012). Zlewnia Górnej Wisły, szczególnie jej karpacka część, charakteryzuje się większymi zasobami wód powierzchniowych niż reszta kraju (Dynowska 1991). Znaczną część tego obszaru obejmują góry, gdzie obserwuje się wyższe sumy opadów i większy spływ powierzchniowy. Objętość średniego rocznego odpływu na obszarze dorzecza Górnej Wisły w okresie 1951-2007 wyniosła 13547 mln m³ (Marcinkowski i Winter 2012), czyli ok. 8,5 dm³·s⁻¹·km⁻².

Podział rocznej objętości odpływu na półrocza i miesiące nie jest równomierny, co jest związane z występowaniem pór roku i sezonowością opadu (Byczkowski 1999). W półroczu zimowym z Polski odpływa 57,3%, a w letnim – 42,7% odpływu rocznego. W górskich dopływach Wisły natomiast odpływ letni jest prawie równy zimowemu (lato – 50,6%, zima – 49,4%). Najwyższe odpływy miesięczne występują w Polsce w marcu, kwietniu i maju, najniższe zaś we wrześniu i październiku. W obszarach górskich maksimum odpływu przesunięte jest na miesiące letnie, ze względu na późniejsze roztopy i wzmożone opady.

Najniższe średnie niskie miesięczne przepływy jednostkowe SNq_m występują na obszarze Polski najczęściej w lecie (zwłaszcza w lipcu i sierpniu, średnio w Polsce – w sierpniu). Wyjątek stanowią tereny górskie, na których przepływ SNq_m pojawia się później. W zlewni Górnej Wisły zauważyć można zależność między wysokością położenia zlewni, a miesiącem wystąpienia SNq_m w roku. Najwcześniej, we wrześniu, najniższe SNq_m obserwuje się na Pogórzu Karpackim. Im wyżej, tym minimalne SNq_m pojawiają się później w roku: w Beskidach – w październiku, na Podhalu w listopadzie, a Tatrach wysokich najpóźniej, w grudniu. W okresie wiosennym (od lutego do kwietnia) zachodzi topnienie pokrywy śnieżnej, wtedy w górach powstaje znaczna dysproporcja między zwiększonym odpływem, a niezbyt dużymi opadami w tej porze roku (Bartnik 2005).

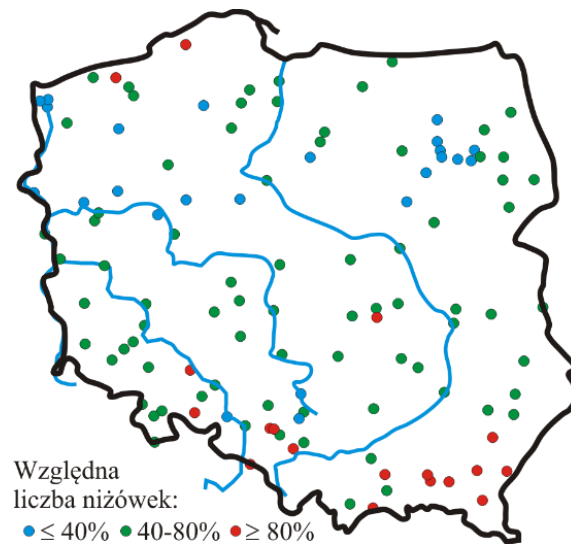
Kępińska-Kasprzak (2014) zdefiniowała „wskaźnik stopnia zagrożenia wystąpieniem niżówki” uwzględniający w każdym przekroju trzy parametry: sumaryczny czas trwania niżówki, liczbę niżówek oraz prawdopodobieństwo nieosiągnięcia najniższego odnotowanego przepływu. Podstawą tych analiz były ciągi dobowych przepływów z okresu 1951-2000, w wybranych 72 przekrojach wodowskazowych na terenie Polski. Pod pojęciem niżówki autorka rozumie okres wystąpienia w cieku przepływów dobowych niższych od SNQ i trwających co najmniej 21 dni. Na podstawie zakresu zmienności wspomnianego wskaźnika wyznaczono pięć klas stopnia zagrożenia: bardzo duże, duże, średnie, małe oraz brak zagrożenia. Duży i bardzo duży stopień zagrożenia wystąpienie niżówki obejmuje znaczne obszary środkowej Polski wraz ze zlewniami Narwi i Bugu, a także górną część zlewni Dolnej Wisły, brak zagrożenia lub niewielki jego stopień obejmuje większość obszarów na północy kraju (w tym zlewnie rzek Pobrzeży Południowo- i Wschodniobałtyckiego oraz zlewnie Gwdy, Brdy, Wdy, Wierzycy i Łyny, a także zlewnię rzeki Nurzec) oraz na południu Polski (zlewnie Górnej Odry oraz Górnej Wisły) (rys. 1.3).



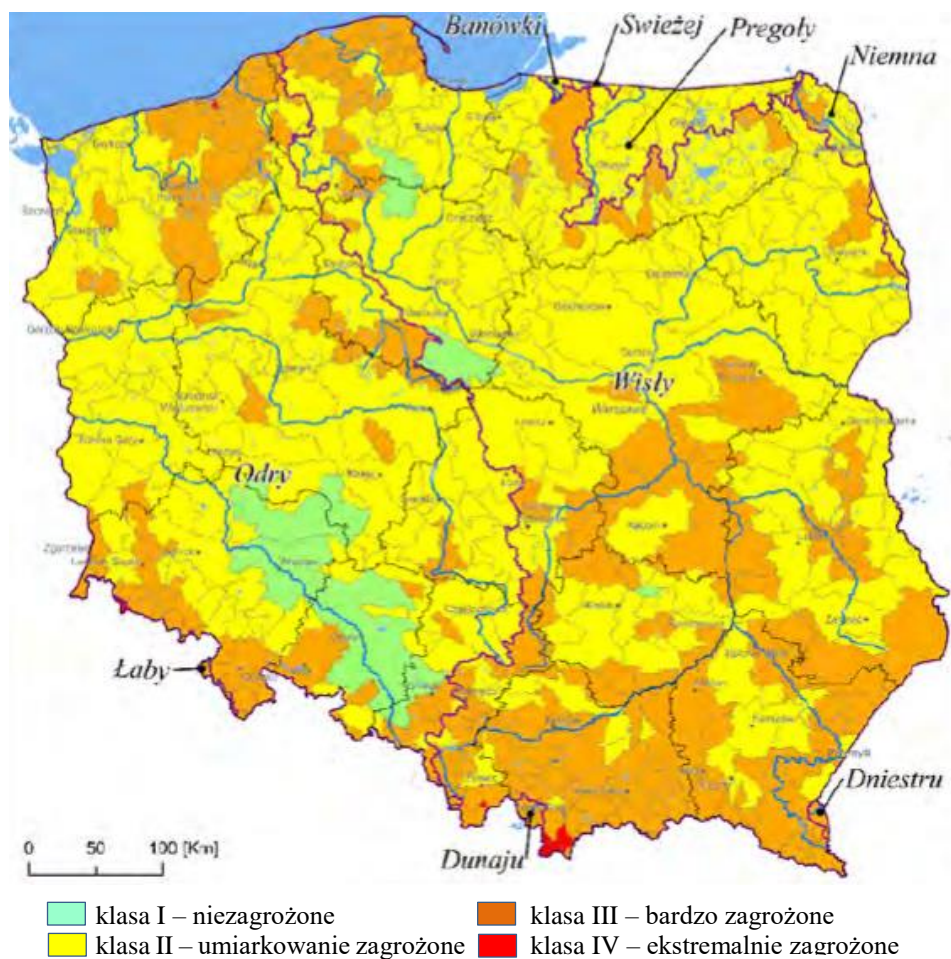
Rys. 1.3. Obszarowy rozkład wskaźnika zagrożenia wystąpieniem niżówek letnio-jesiennych w Polsce w latach 1951-2000 (źródło: Kępińska-Kasprzak 2014).

Fig. 1.3. Spatial distribution of the for summer and autumn hydrological droughts risk indicator in Poland in 1951-2000 (source: Kępińska-Kasprzak 2014).

W latach 2009-2011 Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej podjął próbę opracowania operacyjnego systemu oceny zagrożenia suszą, który jest oparty na czterech wskaźnikach: EDI (*Effective Drought Index*, efektywny wskaźnik suszy), SPI (*Standardized Precipitation Index*, wskaźnik standaryzowanego opadu), FDC (*Flow Duration Curve*, krzywa sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi) i NI-ŻÓWKA (wskaźnik niedoboru dynamicznych zasobów wodnych). Pierwszy opis działania tego systemu przedstawiły Tokarczyk i Szalińska (2010), a dwa lata później Tokarczyk, Szalińska i Otop (2012) zaprezentowały dokładny opis wraz z wynikami. Na podstawie okresu pomiarowego 1966-2005 autorki przeprowadziły szczegółową analizę okresów występowania oraz rozkładu przestrzennego na obszarze Polski suszy atmosferycznej (w 109 stacjach opadowych) i niżówki (w 118 przekrojach wodowskazowych), a uzyskane wyniki posłużyły im do opracowania map podatności na wystąpienie suszy na obszarze Polski. Analizie poddano tylko te niżówki (przy przepływie granicznym $Q_{70\%}$), które były poprzedzone suszą atmosferyczną silną i ekstremalną (dla których wskaźnik SPI był niższy od -1,5 w półroczu letnim). Autorki uważają, że obserwowane wtedy niżówki reprezentują susze hydrologiczne i stanowią kontynuację suszy atmosferycznej. W pracy przedstawiony został przestrzenny rozkład względnego czasu trwania i objętości niżówek w wybranych latach wielolecia. Jako wskaźnik suszy hydrologicznej przyjęto względną liczbę zaobserwowanych niżówek (w stosunku do maksymalnej liczby niżówek w wieloleciu na obszarze Polski); otrzymane wartości podzielono na 3 klasy oznaczające małą (do 40%), średnią (40% - 80%) i dużą podatność (od 80%) (rys. 1.4). Obszarem najbardziej podatnym na wystąpienie suszy hydrologicznej jest obszar Karpat i górnej Odry.



Rys. 1.4. Rozkład względnej liczby niżówek na obszarze Polski (źródło: Tokarczyk i in. 2012).
 Fig. 1.4. Distribution of the relative number of hydrological droughts in Poland (source: Tokarczyk at al. 2012).



Rys. 1.5. Mapa klas zagrożenia suszą hydrologiczną (1987-2017) (Projekt planu przeciwdziałania skutkom suszy 2019)

Fig. 1.5. Hydrological drought hazard class map (1987-2017) (Projekt planu przeciwdziałania skutkom suszy 2019)

W sierpniu 2019 roku Państwowe Gospodarstwo Wodne „Wody Polskie” opublikowało „Projekt planu przeciwdziałania skutkom suszy”, do 15 lutego 2020 roku trwały konsultacje społeczne tego projektu. W dokumencie na obszarze Polski zostały wydzielone obszary, którym przypisano cztery klasy zagrożenia suszą hydrologiczną: klasa I oznaczające tereny niezagrożone tą suszą, klasa II – obszary umiarkowanie zagrożone, klasa III – bardzo zagrożone i klasa IV – ekstremalnie zagrożone. Za region Polski ekstremalnie zagrożony suszą hydrologicznym uznano Tatry i Podhale, a rozważaną w niniejszej pracy prawobrzeżną część zlewni Górnej Wisły – w większości za teren bardzo zagrożony suszą (rys. 1.5).

1.1.3. Historyczne susze na ziemiach polskich

W literaturze polskiej zjawisko suszy opisywane jest od dawna. Najstarsze znane zapiski dotyczące suszy zostały sporządzone przed wprowadzeniem pomiarów instrumentalnych, były to zatem jedynie subiektywne opisy zdarzeń znacząco wpływających na życie ówczesnych ludzi.

W tablicy 1.1 zestawiono lata kalendarzowe, które cytowani autorzy uznali za suche w poszczególnych wieloletniach.

Susze w Polsce przed 1848 rokiem. Tablica 1.1.
Droughts in Poland before 1848. Table 1.1.

Wielolecie	Lata suche (* oznacza rok wyjątkowo uciążliwej suszy)	Źródło
940-1480	988, 1121, 1332 i 1473	Długosz (2003-2004, 2009a, 2009b)
1450-1586	1463,1469, 1472-73,1536,1538,1540,1561, 1575, 1580, 1584	Walawender (1932)
1587-1647	1590, 1594, 1596, 1601, 1603, 1616 (Śląsk), 1588, 1597 (Małopolska)	Werchracki (1938)
1648-1696	1948 (Podkarpacie), 1653 (Wielkopolska i Śląsk), 1666 i 1681 (w cały kraj), 1683 (Śląsk)	Namaczyńska (1937)
1772-1848	1790*,1802, 1807, 1811*,1827,1830*, 1833*, 1834*, 1841*, 1842, 1846-48	Szewczuk (1939)

W *Kronikach* Jana Długosza (2003-2004, 2009a, 2009b) wspomniane są susze z lat 988, 1121, 1332 i 1473. Szczególnie suchym rokiem był rok 1121, o którym Długosz pisał: „Przez trzy następujące po sobie miesiące marzec, kwiecień i maj trwały bardzo dotkliwe susze i upał. Z tego powodu niszczały i wyschły nie tylko wiosenne zasiewy, ale i ozime. Toteż rok ten był ciężki w Polsce z powodu drożyzny i braku żywności. Także sąsiednie kraje i prowincje, dotknięte taką samą posuchą i nieurodzajem, cierpiały przez jakiś czas ciężki głód”.

Posuchy i ich skutki w późniejszych latach opisywane są w *Kronikach kłesk elementarnych* (Walawender 1932, Werchracki 1938, Namaczyńska 1937, Szewczuk 1939). W swoich *Kronikach* obejmujących lata 1450-1586, Walawender (1932) wymienia wiele lat z posuchami (tablica 1.1) i zauważa, że w 1469 roku „stan Odry był tak niski, że od lata do jesieni można ją było przejść”, a w 1540 roku „ponoć sześć miesięcy było bez deszczu, a koryto Odry porosło zielenią”.

W XVIII wieku rozpoczęto pomiary, także w Polsce, m.in. temperatury powietrza i opadów, umożliwiające przeprowadzanie szczegółowych analiz dotyczących nie

tylko częstości występowania zdarzeń ekstremalnych, ale również ich wielkości (Kaszewski i Flis 2014). W tym samym czasie podjęto się pomiary stanów wód w rzekach; od 1799 roku Magier mierzył stany wody na Wiśle w Warszawie. Zestawienie tych danych (z lat 1800-1860) wraz z pomiarami stanów na Wiśle w Krakowie (lata 1831-1860), Zawichoście (lata 1841-1860) i Kwidzynie (1831-1860), podaje Kolberg (1861) w pierwszym roczniku hydrologicznym Wisły. Z przeglądu tych danych wynika, że najniższe stany wód Wisły, w rozpatrywanych wieloletniach, zarówno na wodowskazach w Krakowie, jak w Warszawie, zaobserwowano w 1834 roku.

1.1.4. Niżówki w Polsce w XX wieku

Najwcześniejszą polską pracą naukową zawierającą nie tylko opis mechanizmu rozwoju suszy, ale także próbę jej prognozowania, są *Rozważania na temat metod przewidywania posuchy* opublikowane przez Dębskiego (1952). W pracy tej Dębski utożsamia suszę z posuchą (stosuje te pojęcia wymiennie), rozróżnia fazy suszy i zauważa, że suszę można rozpatrywać z dwóch punktów widzenia: przyrodniczego i ekonomicznego. Ten sam autor w swojej późniejszej pracy (Dębski 1970) dokonał przeglądu katastrofalnych niżówek historycznych z dokładniejszym opisem niżówki, jaka wystąpiła w 1921 roku, a także podał dla różnych regionów Polski wartości średnich odpływów minimalnych.

W pierwszych dekadach XX wieku, w latach 1904 i 1921, w dorzeczu Górnej Wisły wystąpiły pamiętne susze (w tym także niżówki) (Punzet 1991). Wyjątkowo długie i dotkliwe susze, jakie nawiedziły Polskę w połowie ubiegłego stulecia, wzmożyły zainteresowanie polskich naukowców tą tematyką. W 1952 roku w Warszawie zorganizowano I Zjazd Hydrometeorologiczny Polskiego Towarzystwa Meteorologicznego i Hydrologicznego poświęcony analizie powstawania, głębokości i zasięgu susz w Polsce. Treść wygłoszonych referatów dotyczyła głównie katastrofalnej suszy z jesieni 1951 roku.

Na podstawie danych z lat 1951-1990 w 50 przekrojach wodowskazowych rzek Polski Farat i in. (1995 i 1998) wyodrębnili i opisali 16 niżówek – cztery w okresie zimowym, pozostałe w miesiącach letnich. Spośród niżówek zimowych największy zasięg (58% liczby badanych zlewni) miała niżówka zaobserwowana w roku 1954, a letnich – niżówka z 1959 roku (objęła 80% liczby zlewni).

Lorenc i in. (2006) opracowali *Katalog występowania susz w Polsce w okresie 1951-2011*. Największe susze, obejmujące swym zasięgiem co najmniej 75% powierzchni kraju odnotowano w 13 latach badanego okresu (1982-1984, 1989, 1991-1994, 2000, 2002-2003, 2005-2006), a za susze katastrofalne uznano susze, jakie wystąpiły w latach 1982, 1992, 1994 i 2006. Natomiast Tokarczyk i in. (2013) stwierdziły, że na obszarze Polski susze hydrologiczne wystąpiły w okresie powojennym (1951-2005) w latach 1982, 1983, 1992, 1993, 1994, 2000 oraz 2003.

Jak zauważają van Lanen i in. (2016), w 2015 roku susze objęły obszar praktycznie całej Polski. Informacja ta jest potwierdzona na stronie internetowej Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej w Polsce (SMSR). Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach stwierdził wystąpienie suszy rolniczej na obszarze Polski w latach 2015-2016 i 2018.

Niżówki rzek Polski obserwuje się w dwóch sezonach: zimowym i letnio-jesiennym. Niżówki letnio-jesienne powstają w wyniku długotrwałego braku opadów atmosferycznych połączonego z intensywnym parowaniem terenowym. W rzekach nizinnych rozpoczynają się one wiosną, w górskich natomiast pojawiają się znacznie później (Bartnik 2005). Niżówki zimowe rozpoczynają się w chwili pojawienia się

ujemnych temperatur powietrza. Ustaje wtedy spływ powierzchniowy i opady śnieżne retencjonowane są na powierzchni gruntu. (Tłałka 1982).

Najprawdopodobniej pierwszą mapę prezentującą typowe okresy występowania niżówek w Polsce przedstawił Mikulski (1963). Na podstawie rocznych minimów stanów wody w rzekach autor stwierdził, że lipiec jest miesiącem, w którym najczęściej występują niżówki na terenie Polski, a obszar Górnej i częściowo Środkowej Wisły cechują jesienne (wrzesień-październik) minima stanów wód. Niżówki letnio-jesienne są dłuższe niż typowe letnie i zimowe. Mikulski uważa, że największy wpływ na kształtowanie się niżówek z biegiem rzeki ma zagospodarowanie terenu, sposób zasilania rzeki, a także ukształtowanie i stosunki litologiczne terenów, przez które rzeka przepływa.

Stachý i in. (1979 i 1986) dokonali oceny wielkości odpływu na obszarze Polski i przedstawili na mapach średnie z dwudziestolecia 1951-1970 niskie roczne (SNQ) i najniższe roczne (NNq) odpływy jednostkowe z obszaru Polski. Ponadto obliczyli dla każdego ze 180 badanych przekrojów wodowskazowych liczbę przypadków wystąpienia przepływu niższego od SNQ w poszczególnych miesiącach. Miesiąc, lub grupę miesięcy, w których zdarzyła się największa liczba przepływów niższych niż SNQ , uznano za typowy okres występowania niżówek. Niżówki podzielono na wczesnozimowe (miesiące XI-XII), zimowe (I-II), letnie (VI-VIII) i jesienne (IX-X). Według Biernata (za: Stachý i in. 1979) na obszarze Polski dominują niżówki letnie i jesienne, a niżówki wczesnozimowe i zimowe występują głównie w dorzeczu Górnej Wisły.

Wieloletnia i sezonowa dynamika rzek środkowej Polski była badana przez Tomaszewskiego (Tomaszewski 2007a, 2007c, 2009, 2012a, 2012b). Na podstawie ciągów dobowych przepływów z lat 1951-2002 w 29 przekrojach wodowskazowych Tomaszewski (2012b) wyróżnia 4 typy zmienności wieloletniej i 5 typów zmienności sezonowej reżimu odpływów niżówkowych na obszarze środkowej Polski.

Niewiele jest prac dotyczących zmienności charakterystyk niżówki z biegiem rzeki. Ratomaska (1993) zauważyła, że najczęściej niżówki nie występują jednocześnie na całej długości rzeki, często obserwuje się je tylko na pewnym odcinku rzeki lub ich wystąpienie wzdłuż całego ciek jest związane z przesunięciem w czasie. Fał (2007) porównała charakterystyki niżówek z lat 1951-2000 w wybranych trzech przekrojach wodowskazowych (Szczucin, Puławy, Warszawa) na Wiśle i wykazała, że z biegiem rzeki rośnie częstość niżówek, a skraca się średni czas ich trwania, ponadto rośnie średnia objętość a także średni i minimalny przepływ niżówkowy. Autorka zwróciła też uwagę na grupowanie lat z niżówkami w wieloleciu oraz na zmniejszeniu objętości i częstości wystąpienia niżówek w drugiej połowie XX wieku w porównaniu z okresem 1921-1950.

1.1.5. Niżówki na obszarze zlewni Górnej Wisły

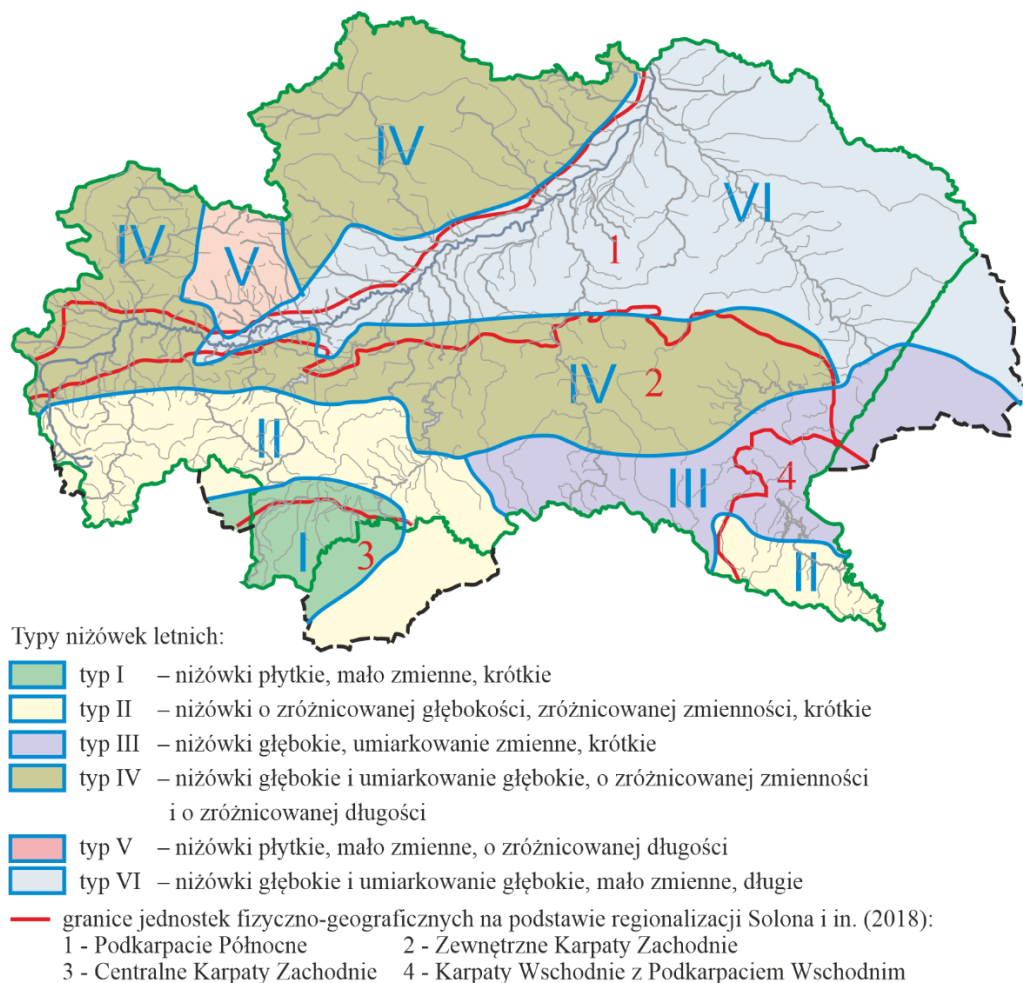
Koniar-Schaefer w latach 60. i 70. ubiegłego wieku zajmowała się odpływami niżówkowymi (rozumianymi jako NNq) źródeł i małych potoków (o powierzchni zlewni do 17 km²) na obszarze między Sołą a Dunajcem. Koniar-Schaefer (1971 i 1972) stwierdziła, że na wielkość odpływu niżówkowego największy wpływ ma budowa geologiczna (szczelinowatość skał) oraz rzeźba terenu; stopień recesji odpływu jest większy w źródłach i ciekach zasilanych z litej skały i znajdujących się w strefie grzbietowej, a niższy – w źródłach i ciekach zasilanych ze zwietrzliny, położonych na stokach i pod zboczem.

Przedmiotem opracowania Ziemońskiej (1973) były stosunki wodne w polskich

Karpatach Zachodnich i ich przestrzenne zróżnicowanie w latach 1951-1960. Spostrzeżenia autorki można podsumować tak: największy odpływ eksponowanej na północny-zachód części Karpat przypada na miesiące letnie i wiosenne, a w pozostałej części – na miesiące wiosenne i zimowe; minimalne przepływy w Tatrach, Beskidzie Śląskim i Żywieckim występują w zimie, na pozostałym obszarze polskich Karpat Zachodnich jesienią. W latach 1951-1960 niżówki w zachodniej części badanego obszaru najczęściej występowały w styczniu i lutym, a we wschodniej – w listopadzie i wrześniu. Miesiącem, w którym nie zaobserwowano niżówek był kwiecień, a w obszarze wysokogórskim – również maj i czerwiec.

Punzet (1991), badając niskie roczne przepływy w poszczególnych miesiącach w zlewni Górnej Wisły (w latach 1951-1970) stwierdził, że najwyższe wartości przepływów NQ występowały w kwietniu, najniższe zaś w miesiącach jesienno-zimowych. Ratomska (1993) zauważyła, że w części karpackiej zlewni Górnej Wisły, niżówki (w wieloletniu 1961-1990) zazwyczaj występują w okresie jesienno-zimowym.

Tłałka (1982) przeprowadziła przestrzenną analizę liczby, czasu trwania i głębokości niżówek letnich w 84 zlewniach leżących w dorzeczu Górnej Wisły (w okresie 1961-1970) i wyodrębniła sześć typów niżówek (rys. 1.6) dokonując ich podziału ze względu na czas trwania niżówki, głębokość niżówki i zmienność średniego jednostkowego odpływu niżówkowego.



Rys. 1.6. Typologia niżówek letnich w zlewni Górnej Wisły wg Tłałki (1982).
 Fig. 1.6. Typology of summer hydrological droughts in the Upper Vistula catchment according to Tłałka (1982).

Autorka nazwała niżówkę za krótką, gdy trwa krócej niż 50 dni, umiarkowaną, gdy trwa od 50 do 80 dni a długą – gdy czas jej trwania przekracza 80 dni. Niżówka w pracy jest uznana za głęboką, gdy średni jednostkowy odpływ niżówkowy q_{Nsr} jest mniejszy od $2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$, umiarkowaną dla q_{Nsr} od 2 od $4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$, a płytką, gdy q_{Nsr} przekracza $4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$. Niżówki są uznane za mało zmienne, jeżeli współczynnik zmienności c_v przepływu q_{Nsr} jest mniejszy od 0,20, a umiarkowanie zmienne dla c_v od 0,2 do 0,4. Tłałka (1982) uznała, że w okresie niżówki w rzekach płyną wody głównie z zasilania podziemnego i utożsamiała niżówki z zasobami gwarantowanymi. Nie stwierdziła zależności między odpływem niżówkowym i czasem trwania niżówek a wybranymi parametrami środowiska geograficznego (nachylenie zboczy, gęstość sieci rzecznej, powierzchnia zalesienia). Niewielką, lecz istotną statystycznie zależność stwierdziła w obszarach górskich między średnim odpływem niżówkowym i środkową wysokością zlewni oraz opadem w półroczu letnim.

Wielu autorów badało wpływ lasu na odpływy niskie i niżówki. Koniar-Schaefer (1976) uważa, że w okresie wiosennym las w Karpatach podwyższa przepływy niżówkowe, a w czasie niżówek letnio-jesiennych je obniża (co wynika z dużej transpiracji w okresie wegetacyjnym). Tłałka (1982), w oparciu o bogaty przegląd literaturowy, zauważa, że wpływ lasu na niskie przepływy zależy od stopnia zalesienia zlewni, gatunku i wieku lasu, struktury gleby leśnej i warstwy zwietrzliny, głębokości zalegania zwierciadła wody podziemnej oraz od ilości, czasu trwania i rozkładu opadów w ciągu roku. Kostuch (2004) stwierdził, na podstawie badań prowadzonych w zlewniach cząstkowych jednego z dopływów Dunajca, potoku Grajcarek, który powstaje z połączenia potoków Biała Woda i Czarna Woda. Ze względu na mniejszą lesistość (mniejszą zdolność retencyjną) zlewni Białej Wody, liczba wystąpień niżówek i ich objętość jest w tej zlewni większa niż w zlewni Czarnej Wody.

1.2. Niżówka jako etap rozwoju procesu suszy

Rozwój suszy aż do ekstremalnych jej skutków jest najczęściej przedstawiany jako proces obejmujący cztery etapy: suszę atmosferyczną, suszę glebową, suszę hydrologiczną i suszę socjoekonomiczną (Wilhite i Glanz 1987, Maidment 1993, Byczkowski 1999, Stahl 2001, Tallaksen i van Lanen 2004, Mishra i Singh 2010 i 2011, Tomaszewski 2012b, Tokarczyk 2010, *National Drought Mitigation Center* 2018). Etapy te nie są rozłączne czasowo.

1.2.1. Susza atmosferyczna (meteorologiczna)

Długotrwały brak lub znaczący niedostatek opadów stanowi pierwszą fazę suszy, zwaną suszą atmosferyczną lub meteorologiczną (Byczkowski 1999, *International Glossary of Hydrogeology* 2012). Maidment (1993) definiuje suszę meteorologiczną jako okres trwający na ogół od miesięcy do lat, w którym dopływ wilgoci do danego obszaru spada poniżej stanu normalnego w danych warunkach klimatycznych uwilgotnienia.

Susza nie powinna być mylona z suchością (*aridity*), która jest stałą cechą suchego klimatu (Tallaksen i van Lanen 2007). Byczkowski (1999) uważa, że sprecyzowanie uniwersalnego kryterium długości okresu bezopadowego wywołującego suszę atmosferyczną nie jest możliwe z uwagi na różne właściwości klimatu rozpatrywanych regionów; na przykład w Polsce okres już 15 dni bez deszczu można uznać za suszę atmosferyczną, podczas gdy w Libii czy Arabii Saudyjskiej, gdzie suma roczna opa-

dów nie przekracza 150 mm, o suszy atmosferycznej będzie decydował dopiero dwuletni okres bezopadowy. Oznacza to, że susze mogą mieć różne skutki nawet jeśli czas ich trwania, natężenie oraz zasięg przestrzenny są identyczne.

Susza powoduje różne skutki w różnych częściach roku. Z punktu widzenia rolników, największe straty wynikające z niedoboru wody z powodu suszy atmosferycznej to te, które obserwuje się w okresie wegetacyjnym. Najprawdopodobniej z tego powodu Rozporządzenie Ministra Środowiska (2007) definiuje stan suszy atmosferycznej jako "wystąpienie długotrwałego niedoboru lub braku opadów w okresie wegetacyjnym".

1.2.2. Susza glebowa (rolnicza)

Zazwyczaj w lecie, gdy długo nie pada deszcz, a temperatura powietrza jest wysoka, może wystąpić intensywne parowanie wody zawartej w glebie oraz powierzchniowych zbiornikach wodnych (Dębski 1970). Ten wzrost intensywności parowania powoduje przesuszanie powierzchniowych, a następnie głębszych warstw gleby (Lorenc 2005). Początkowo zredukowane są zasoby wody wolnej. Wody wsiąkowe kończą swoją wędrówkę w strefie aeracji, albo są transpirowane. Następnie redukcji ulegają wody kapilarne. Ilość zawartej w glebie wody błonkowej i włoskowej zmniejsza się tym szybciej, im korzystniejsze są warunki parowania. Wilgotność gleby maleje, pojawia się deficyt wody dla systemu korzeniowego roślin, co może spowodować ich obumieranie. Stan ten powoduje, że susza atmosferyczna przeradza się w suszę glebową, zwaną także suszą rolniczą. Wilhite i Glanz (1987), a także Maidment (1993) definiują suszę rolniczą jako okres w którym wilgotność gleby jest niedostateczna do zaspokojenia potrzeb wodnych roślin i prowadzenia normalnej gospodarki w rolnictwie.

1.2.3. Susza hydrologiczna (niżówka wód podziemnych, niżówka wód powierzchniowych)

Susza hydrologiczna jest ostatnim, po suszy glebowej, etapem suszy (Mikulski 1963, Dębski 1970, Maidment 1993, Byczkowski 1999, Wilhite i Glanz 1987). Ewentualne krótkotrwałe opady nie będą z reguły zasilać podziemnych zbiorników wodnych, ponieważ zostaną w całości wchłonięte i zatrzymane przez grunt. Opadów o dużej intensywności wysuszona i twarda gleba nie jest w stanie przyjąć, woda opadowa spływa więc po powierzchni gruntu prawie bez wsiąkania, nie uzupełniając retencji glebowej. Dopiero długotrwałe deszcz może uzupełnić niedobory wilgoci glebowej. Dalsze przedłużanie się okresu bezopadowego powoduje uruchomienie trzeciej fazy procesu suszy: suszy hydrologicznej.

Najpierw wyczerpują się zasoby wodne strefy nasyconej, obniża się stan wody podziemnej w studniach (niżówka wód podziemnych) i zmniejsza się dopływ wody do cieków powierzchniowych. Zasoby te nieodnawiane przez infiltrację, a uszczuplane przez zasilanie cieków powierzchniowych, zmniejszają się coraz bardziej. Dębski (1970) zauważa, że stan wyczerpywania zasobów wody gruntowej w tej fazie suszy zależy od tego, jak długo trwała susza atmosferyczna. Jeśli jej początek przypada na miesiące wczesnego lata, wyczerpywanie zasobów wody gruntowej jest długotrwałe, może trwać do deszczy jesiennych, a przy ich braku – aż do odwilży zimowych. Jeśli początek tej fazy suszy przypada na koniec lata, wyczerpywanie zasobów wody gruntowej trwa krócej, a zatem nie jest tak duże.

Przy dalszym braku opadów rozpoczyna się ostatni etap procesu suszy hydrologicznej: niżówka rzeczna. Cieki są coraz słabiej zasilane przez wody podziemne, wskutek czego przepływy w nich się zmniejszają, a małe cieki zasilane przez mało zasobne strefy wodonośne tym okresie, wręcz wysychają.

Niżówka wód podziemnych zazwyczaj zaczyna się wcześniej niż niżówka wód powierzchniowych (Tomaszewski 2012b). Jednak Ratomska (1993) badając suszę w regionie karpackim dorzecza Górnej Wisły w wieloleciu 1961-1990 zauważyła, że w około 60% rozważanych przypadków po okresie bezopadowym najpierw obserwuje się obniżanie się stanów wody w ciekach, a dopiero później obniża się zwierciadło wody gruntowej. Zdaniem Ratomskiej (1993) decydują o tym przede wszystkim warunki hydrogeologiczne – zasobność aluwii rzek karpackich jest mniejsza niż rzek nizinnych, a zatem reakcja rzeki na brak zasilania odpływu opadami jest szybsza.

Według Rozporządzenia Ministra Środowiska (2007), stan suszy hydrologicznej to „wystąpienie zmniejszenia odpływu wód gruntowych do wód powierzchniowych i w efekcie zmniejszenie przepływu w rzekach co najmniej trzech zlewni monitorowanych przez podstawową sieć obserwacyjno-pomiarową państwowej służby hydrologiczno-meteorologicznej poniżej stanu odpowiadającego średniemu niskiemu przepływowi z wielolecia”.

Ze względu na genezę rozróżnia się niżówki letnie i zimowe (Zielińska 1963a, Tłałka 1982, Tomaszewski 2012b). Niżówki letnie powstają w wyniku długotrwałego braku opadów atmosferycznych w połączeniu z wysokimi temperaturami powietrza i intensywnym parowaniem. Dalszy mechanizm ich powstawania został już wcześniej opisany. Niżówki zimowe natomiast rozpoczynają się w rzekach przy ujemnych temperaturach powietrza lub są wynikiem długotrwałego braku opadów jesienią. Ustaje wtedy spływ powierzchniowy, ponieważ opady śnieżne ulegają retencji powierzchniowej. Najniższe przepływy pojawiają się w rzekach w okresie ich największego przemarznięcia.

Inna klasyfikacja susz hydrologicznych została zaproponowana przez Van Loon i van Lanen (2012) na podstawie ponad 100 niżówek wód podziemnych i ponad 200 susz niżówek wód powierzchniowych 5 zlewni w Europie (na terenie Norwegii, Czech, Słowacji i Hiszpanii):

- Susza klasyczna wywołana dłuższym niedoborem opadów (*classical rainfall deficit drought*).
- Susza pory deszczowo-śnieżnej (*rain-to-snow-season drought*)
- Susza ta rozpoczyna się letnimi i/lub jesiennymi niedoborami opadów. Suszę atmosferyczną przerywają opady w zimie, jednak przy ujemnej temperaturze powietrza magazynowane są one w pokrywie śnieżnej. Zasoby wód podziemnych nie są uzupełniane, a niżówka trwa aż do wiosennych roztopów.
- Susza pory deszczowo-suchej (*wet-to-dry-season drought*)
- Susza rozpoczyna się suszą atmosferyczną (zimą) i kończy opadem (latem), jednak zasilanie deszczowe tracone jest wtedy na ewapotranspirację.
- Susza spowodowana ochłodzeniem na obszarach pokrytych śniegiem (*cold snow season drought*)
- Susze te mogą pojawić się w warunkach niedoboru opadów (ale nie koniecznie) w wyjątkowo niskiej temperaturze gdy woda zamiast płynąć w korycie rzeki, jest uwięziona w formie śniegu lub lodu.
- Susza spowodowana ociepleniem na obszarach pokrytych śniegiem (*warm snow season drought*)
- Susza ta jest spowodowana wyjątkowo wysoką temperaturą w zimie, towarzy-

szącą czasem deficytowi opadów. Odwilże które mogą pojawić się zimą wywołują spływ wody po zamrożonym gruncie a nie zasilają wód podziemnych.

- Susza złożona (*composite drought*)
- Susza ta łączy szereg zjawisk generujących susze, często nakładających się w czasie.

Lorenc (2011) wprowadza pojęcie suszy katastrofalnej jako stan warunków atmosferyczno-glebowo-hydrologicznych według którego susza osiągnęła wszystkie trzy fazy rozwoju doprowadzając do obniżenia się stanu wód gruntowych o co najmniej 0,5 m w stosunku do średniej wieloletniej.

Byczkowski (1999) zauważa, że oprócz niżówek spowodowanych przyczynami naturalnymi mogą występować niżówki będące wynikiem oddziaływania czynników antropogenicznych, na przykład: magazynowaniem wody w zbiornikach retencyjnych, jej poboru z rzeki do systemów nawadniających lub przerzucania kanałami do innych dorzeczy.

1.2.4. Susza społeczno-ekonomiczna

Dębski (1952) zwrócił uwagę na aspekt ekonomiczny suszy i zauważył, że „susza jest zjawiskiem obojętnym, jeżeli nie przynosi szkód gospodarczych, albo szkodliwym, gdy powoduje zmniejszenie produkcji rolniczej i różne utrudnienia gospodarcze”. Według Maidmenta (1993) susza społeczno-ekonomiczna jest ostatnią fazą suszy, odnoszącą się do zagadnień ekonomicznych w sferze działalności człowieka na obszarze dotkniętym suszą. Tomaszewski (2012b) podkreśla, że susza ta obejmuje skutki suszy atmosferycznej, rolniczej i hydrologicznej, czyli straty i szkody gospodarcze, a niekiedy także zdrowotne. Według Wilhite'a i Glanza (1987) susza społeczno-ekonomiczna pojawia się, gdy z powodu niedoboru wody popyt na dobra gospodarcze przewyższa podaż.

1.3. Metody definiowania niżówki rzecznej

Niżówka rzeczna (zwaną dalej niżówką) najczęściej definiowana jest jako nieprzerwany okres czasu, w którym przepływ wody w danym przekroju cieku jest niższy od przyjętej umownie wartości granicznej przepływu (przepływu granicznego) (Hisdal i in. 2001, Ozga-Zielińska i Brzeziński 1997, Tallaksen i van Lanen 2004, Smakhtin 2001, Tallaksen i van Lanen 2007, Węglarczyk 2006). Taki sposób określania niżówek nazywany metodą odcięcia (*threshold level method*), został wprowadzony w Stanach Zjednoczonych przez Yevjevicha (1967), a w Polsce przez Zielińską (1963b).

1.3.1. Przepływ graniczny

Przepływ graniczny, oznaczany dalej symbolem Q_g , jest arbitralnie przyjmowaną wartością z definicji niższą od wartości średniej z wielolecia i stanowi podstawowe kryterium definicyjnym niżówki. Yevjevich (1967) zaleca przyjmować ten przepływ jako:

$$Q_g = \bar{Q} - 0,2s \quad (1.1)$$

gdzie:

\bar{Q} – średni przepływ dobowy z wielolecia,

s – odchylenie standardowe przepływu dobowego.

Do określenia Q_g , Tomaszewski (2011, 2012b) proponuje kryterium genetyczne niżówki, według którego przepływ graniczny niżówki płytkiej jest przepływem w punkcie załamania dystrybuanty empirycznej rocznych minimów przepływu w wieloleciu, a niżówki głębokiej – przepływem w punkcie załamania dystrybuanty empirycznej miesięcznych minimów przepływu w wieloleciu.

W wielu pracach polskich autorów (Zielińska 1963a i 1963b, Tłałka 1982, Stachý i in. 1987 i 1979, Ozga-Zielińska i Brzeziński 1997, Tomaszewski 2007c) jako Q_g przyjmowany jest jeden z przepływów charakterystycznych lub jego funkcji – najczęściej WNQ lub SNQ (tablica 1.2).

Najczęściej jednak przepływ graniczny jest przepływem $Q_{p\%}$ określanym z krzywej czasu przewyższenia przepływu, zwanej także krzywą sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi (m.in. Zelenhasić i Salvai 1987, Ratomska 1993, Hisdal i in. 2001, Stahl 2001, Fleig 2004, Tallaksen i van Lanen 2004, Jakubowski 2005, 2008, 2011, 2015, Tomaszewski 2009, 2012b, 2014, Tokarczyk 2008, 2010, 2013, van Loon i van Lanen 2012, Sung i Chung 2014).

Tablica 1.2.

Najczęściej stosowane stałe przepływy graniczne.

Table 1.2.

The most commonly used constant threshold flows in the literature.

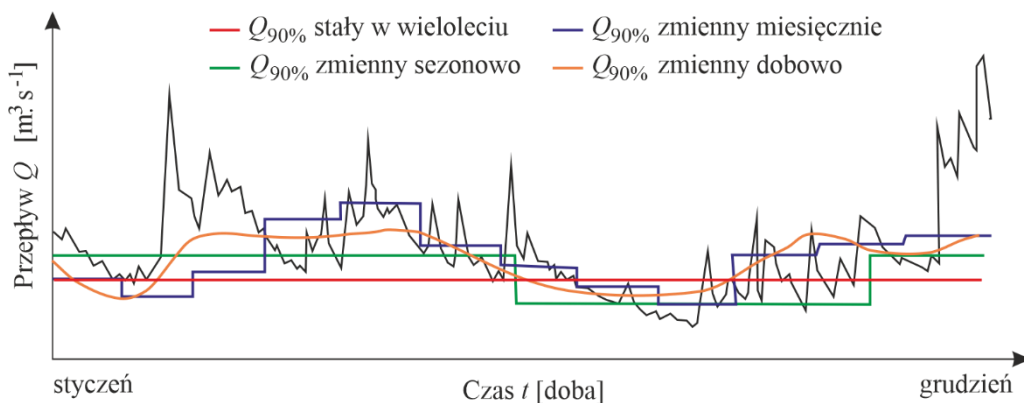
Nazwa	Q_g	Źródło
Przepływ z krzywej czasu przewyższenia przepływu	$Q_{5\%}, Q_{7.5\%}, Q_{10\%}, Q_{12.5\%}, Q_{15\%}, Q_{17.5\%}, Q_{20\%}$	Woo i Tarhule (1994) (dla epizodycznych rzek w Nigerii)
	$Q_{50\%}$	Jakubowski (2008)
	$Q_{55\%}$	Jakubowski (2015)
	$Q_{60\%}$	Jakubowski (2011)
	$Q_{70\%}$	Hisdal i in. (2001), Stahl (2001), Fleig (2004), Fleig i in. (2006), Tallaksen i van Lanen (2004), van Lanen i in. (2008), Kasprzyk (2010), Jakubowski (2005, 2011), Tomaszewski (2009, 2012b, 2014), Tokarczyk (2008, 2010, 2013), Tokarczyk i in. (2012), Sung i Chung (2014), KZGW (2017)
	$Q_{75\%}$	Kjeldsen i in. (2000)
	$Q_{80\%}$	Stahl (2001), Jakubowski (2008), van Loon i van Lanen (2012)
	$Q_{90\%}$	Zelenhasić i Salvai (1987), Ratomska (1993), Claudsen i Pearsen (1995), Tallaksen i Hisdal (1997), Hisdal i Tallaksen (2000), Smakhtin (2001), Stahl (2001), Fleig (2004), Fleig i in. (2006), Gustard i Demuth (2008), Kaznowska i Banasik (2009), Kaznowska (2006, 2011, 2012), Jakubowski (2008, 2015), Parry i in. (2012), Tomaszewski (2012b), Gregor (2013), KZGW (2017)
	$Q_{95\%}$	Zelenhasić i Salvai (1987), Zelenhasić (2002), Fleig (2004), Jakubowski (2008), Urošev i in. (2016), KZGW (2017)
Przepływ charakterystyczny lub jego funkcja	WNQ	Lambor(1971), Tłałka (1982), Ozga-Zielińska (1990), Punzet (1991), Tomaszewski (2007c)
	SNQ	Stachý i in. (1979), Stachý i in. (1987), Ozga-Zielińska i Brzeziński (1997), Farat i in. (1998), Mager i in. (2000), Bartzczak (2007), Fal (2007), Tomaszewski (2007c), Kaznowska i Banasik (2009), Kaznowska (2012), Kubiak-Wójcicka (2012)
	WNq, SNq	Kostuch (2004), Jokiel i Tomaszewski (2009)
	ZNQ	Ozga-Zielińska i Brzeziński (1997)
	$0,75 ZQ$	Chełmicki 2004-05
	WNQ_{let}	Zielińska (1963a i 1963b)

Przyjęcie $Q_g = Q_{p\%}$ jest równoznaczne z założeniem, że przepływ niżówkowy będzie przekraczany średnio przez $p\%$ czasu w roku, np. przepływ $Q_{90\%}$ oznacza wartość przepływu osiągnięta lub przekraczana w ciągu 90% czasu obserwacji w wieloleciu, czyli średnio przez 329 dni w roku. Tallaksen i van Lanen (2004) zalecają, by do określania niżówek na rzekach stałych stosowane były przepływy graniczne o wartościach pomiędzy $Q_{70\%}$ a $Q_{95\%}$. Najczęściej stosowanymi przepływami są $Q_{70\%}$ i $Q_{90\%}$ (tablica 1.2). Zalecana w Polsce metodyka KZGW (KZGW 2017) uwzględnia trzy przepływy graniczne ($Q_{70\%}$, $Q_{90\%}$ i $Q_{95\%}$), a niżówka zdefiniowana przepływem granicznym $Q_{70\%}$ nazywana jest niżówką zwykłą i określa stan ostrzegawczy w rzece, przy $Q_{90\%}$ – niżówką głęboką (definiuje stan alarmowy), a $Q_{95\%}$ – niżówką ekstremalną (odpowiada stanowi klęski żywiołowej).

Według Tokarczyk (2010) wartość $Q_{70\%}$ dla zlewni z obszaru Polski jest zbliżona do wartości SNQ , jednak Węglarczyk (2014) wykazał w zlewni Górnej Wisły przepływy SNQ w przybliżeniu jest równy $Q_{95\%}$, a $WNQ = Q_{76\%}$.

W Stanach Zjednoczonych najczęściej stosowanym wskaźnikiem niskiego przepływu jest przepływ $7Q_{10}$, czyli minimalny w roku średni przepływ 7-dniowy o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 10%. Vladimirov (1976) definiuje przepływ niżówkowy jako minimalny przepływ 30-dniowy. Podobnie jak Zielińska (1963b) w Polsce, Vladimirov (1976) uważa, że wartości minimalnego odpływu w sezonie letnim i zimowym są genetycznie niejednorodne, zatem rozpatruje je osobno.

Przepływ graniczny przyjmowany jest zazwyczaj jako stały w badanym wieloleciu, choć niektórzy autorzy, np. Hisdal i Tallaksen (2000) proponują, by przepływ ten był zmienny w czasie, np. osobno dla każdego półrocza lub miesiąca, a nawet dobowo, dla poszczególnych, jednoimiennych dni w roku (Tallaksen i van Lanen 2004) (rys. 1.7).



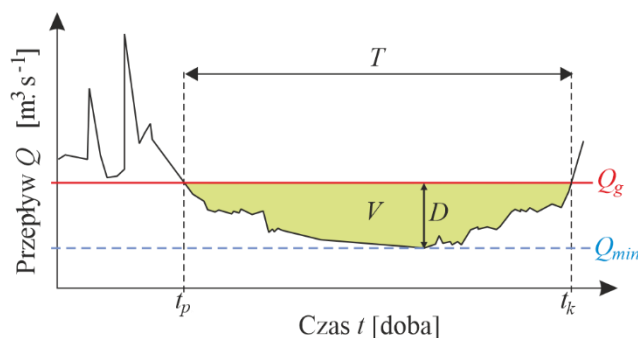
Rys. 1.7. Różne sposoby definiowania przepływu granicznego: a) Q_g stały w wieloleciu lub zmienny sezonowo, b) Q_g zmienny miesięcznie, c) Q_g zmienny dobowo (na podstawie Tallaksen i van Lanen 2004).

Fig. 1.7. Definitions of threshold flow: a) Q_g fixed over many years or seasonally variable, b) Q_g variable monthly, c) Q_g variable daily (on the basis of: Tallaksen and van Lanen 2004).

Wybór właściwego sposobu wyznaczania niżówek zależy m.in. od rozdzielczości czasowej dostępnych danych i odwrotnie, optymalna rozdzielczość czasowa danych zależy od celu i zakresu analiz. Zwykle analizy przeprowadzane w skali lokalnej opierają się na szeregach przepływów dobowych lub miesięcznych, podczas gdy badania o większym zasięgu przestrzennym i/lub czasowym są często oparte na danych sezonowych lub rocznych (Fleig 2004).

1.3.2. Charakterystyki niżówki

Nieprzerwany ciąg przepływów poniżej wartości granicznej Q_g stanowi niżówkę w swojej najbardziej pierwotnej postaci, którą można opisać szeregiem charakterystyk (rys. 1.8), takich jak czas T trwania, czas początku t_p i czas końca t_k , objętość V (objętość odpływu poniżej założonego Q_g), minimalny przepływ Q_{min} , jaki wystąpił podczas trwania niżówki, głębokość $D = Q_g - Q_{min}$ niżówki itp.



Rys. 1.8. Charakterystyki niżówki.
Fig. 1.8. Hydrological drought characteristics.

Najczęściej niżówka definiowana jest jedną z trzech metod: POT (*Peak Over Threshold*), MA (*Moving Average*) i SPA (*Sequent Peak Algorithm*).

Początek t_p niżówki POT i SPA następuje w chwili obniżenia się przepływu poniżej przepływu granicznego Q_g , różnice pomiędzy metodami widoczne są w określeniu końca trwania niżówki i jej objętości (rys. 1.9).

Metoda POT

Metoda POT w swojej podstawowej formie definiuje niżówkę jako okres czasu, w ciągu którego przepływ utrzymuje się poniżej przepływu Q_g , a zatem koniec niżówki następuje wtedy, gdy przepływ w rzece podniesie się z powrotem do poziomu Q_g lub go przekroczy (Tallaksen i van Lanen 2007, van Lanen i in. 2008, Tokarczyk 2010).

Nazwa metody POT (*Peak Over Threshold*) sugerująca, że rozważany jest przepływ powyżej założonego Q_g jest zatem myląca. Z tego powodu Önöz i Bayazit (2002) zaproponowali zmianę nazwy tej metody na TUT (*Troughs Under Threshold*), a Gottschalk i in. (2013) stosowali określenie PUT (*Pit Under Threshold*). Ze względu jednak na to, że nazwa POT jest używana w literaturze najczęściej (np. Tallaksen i van Lanen 2004, Tokarczyk 2010, Jakubowski 2011), ta właśnie nazwa będzie stosowana w niniejszej pracy.

Na podstawie wieloletniego ciągu dobowych przepływów Q_t w danym przekroju wodowskazowym tworzone się szeregi czasowe czasów $t_{p,i}$ i $t_{k,i}$ początku i końca niżówek ($i = 1, 2, \dots$), co pozwala zdefiniować inne charakterystyki:

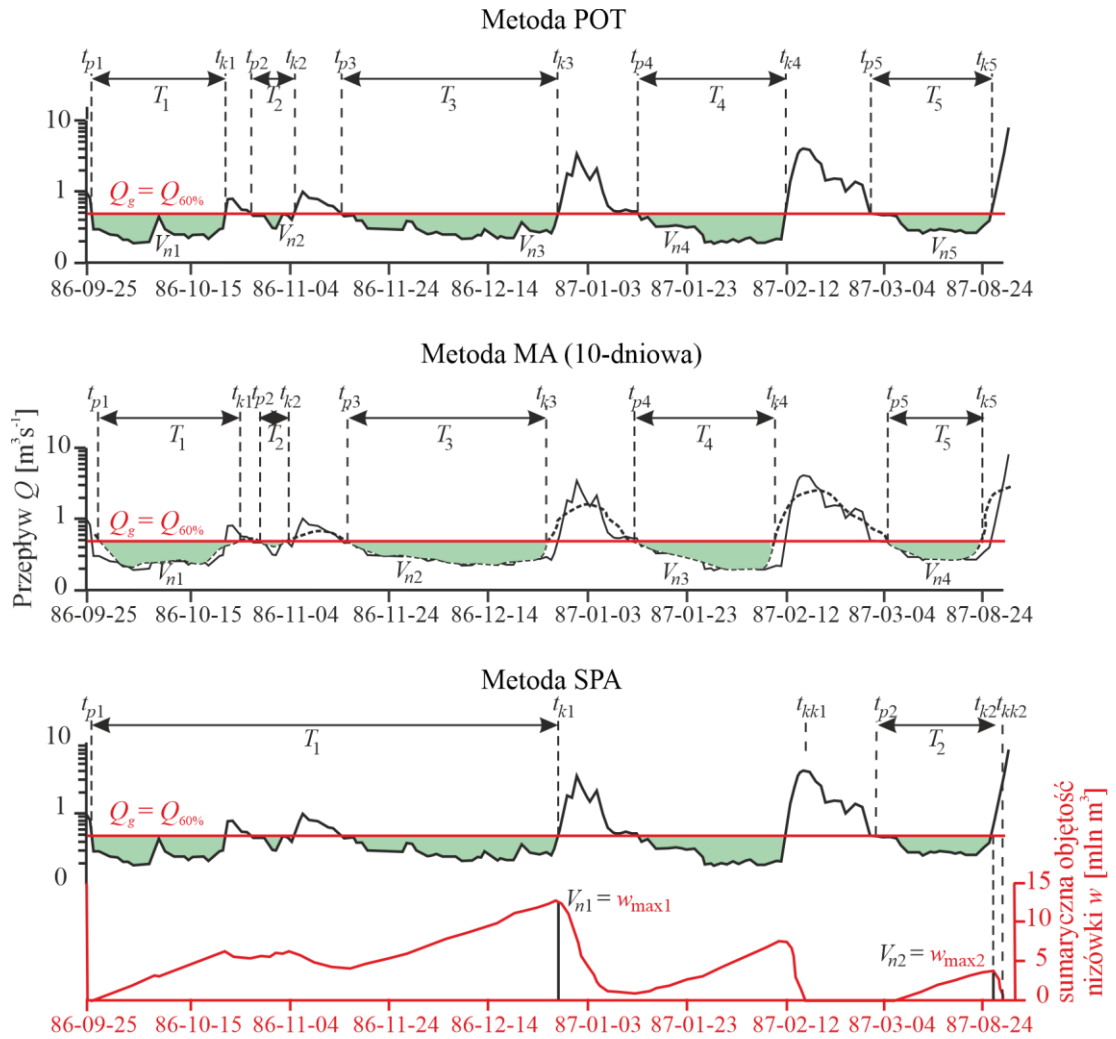
- czas T_i trwania i -tej niżówki:

$$T_i = t_{k,i} - t_{p,i} + 1 \quad (1.2)$$

gdzie:

$t_{k,i}$ – czas końca niżówki [doba],

$t_{p,i}$ – czas początku niżówki [doba].



Rys. 1.9. Zdefiniowanie niżówek metodami: POT, MA i SPA (przekrój Wisła na Wiśle, $Q_g = Q_{60\%}$) (zmienna w oznacza sumaryczną chwilową objętość niżówki).

Fig. 1.9. Defining the hydrological droughts with the POT, MA and SPA methods (Vistula cross-section of the Vistula river, $Q_g = Q_{60\%}$) (the variable w denotes the total instantaneous volume of the drought).

- głębokość D_i i -tej niżówki:

$$D_i = \max_{t_{p,i} \leq t \leq t_{k,i}} (Q_g - Q_t) \quad (1.3)$$

gdzie:

Q_g – przepływ graniczny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_t – przepływ w dobie t [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

- minimalny przepływ $Q_{\min,i}$ i -tej niżówki:

$$Q_{\min,i} = \min_{t_{p,i} \leq t \leq t_{k,i}} Q_t \quad (1.4)$$

gdzie:

$t_{p,i}$ – czas początku i -tej niżówki,

$t_{k,i}$ – czas końca i -tej niżówki,

- czas τ_i pomiędzy i -tą a $i+1$ niżówką:

$$\tau_i = t_{p,i+1} - t_{k,i} + 1 \quad (1.5)$$

- objętość V_i niżówki (objętość niedoboru lub deficytu wody), w m^3 :

$$V_i = \sum_{i=t_{p,i}}^{t_{k,i}} (Q_g - Q_i) \Delta t \quad (1.6)$$

gdzie: Δt – krok czasowy, $\Delta t = 24 \times 60 \times 60$ s

- objętość V_i niżówki (objętość niedoboru lub deficytu wody), w dobach:

$$V_i = \sum_{i=t_{p,i}}^{t_{k,i}} (Q_g - Q_i) / \bar{Q} \text{ [doba]} \quad (1.7)$$

gdzie: \bar{Q} – średni przepływ dobowy wielolecia [$m^3 \cdot s^{-1}$].

Określenie objętości niżówki w dobach (1.7) pokazuje liczbę dób potrzebnych do wypełnienia niżówki przepływem średnim w danym przekroju, co pozwala na porównywanie objętości niżówek w różnych przekrojach wodowskazowych.

Metoda MA

Wielu badaczy uważa, że wartości niskich przepływów są obciążone znacznymi błędami wynikającymi z niedokładności pomiarów niskich stanów wody (a, co za tym idzie, i przepływów) i dlatego zastępują oryginalny szereg czasowy Q_t jego średnią ruchomą o długości uśredniania n dób, $MA(n)$ (Tlałka 1982, Smakhtin 2001). Fleig (2004) oraz Hisdal i Tallaksen (2000) zalecają stosowanie 10-dniowej średniej ruchomej, natomiast Hisdal i in. (2002) – średniej 11-dniowej.

Metoda SPA

Metoda SPA opiera się na krzywej sumowej odpływu i powstała w celu szacowania objętości zbiornika retencyjnego. Obecnie stosowana forma algorytmu została wprowadzona przez Vogela i Stedingera w 1987 roku. Metodę SPA stosowało wielu autorów, m.in. Tallaksen i in. (1997), Kjeldsen i in. (2000), Fleig (2004), van Lanen i in. (2008) i Jakubowski (2011), Gregor (2013). Według tej metody początek niżówki następuje w chwili $t_{p,i}$, gdy przepływ Q_t obniży się poniżej wartości Q_g . W tej dobie, $t = 0$, chwilowa sumaryczna objętość niżówki w_0 jest równa 0. Różnica ($Q_g - Q_t$) jest dodawana do w_t w kolejnych dobach $t = 1, 2, 3$, według wzoru

$$w_t = \begin{cases} w_{t-1} + Q_g - Q_t, & w_{t-1} + Q_g - Q_t > 0 \\ 0, & w_{t-1} + Q_g - Q_t \leq 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

do pierwszej chwili (dobie) $t_{kk,i}$ (rys. 1.9), w której uzyskana suma w_t przestanie być dodatnia, czyli do momentu wyrównania powstałego niedoboru wody przepływem wyższym od Q_g :

$$t_{kk,i} = \min_{t^* > t_{p,i}} \left[t^* : \sum_{t=t_{p,i}}^{t^*} (Q_g - Q_t) \Delta t \geq 0 \right] \quad (1.9)$$

Doba $t_{k,i}$, w której sumaryczna objętość w_i osiąga wartość maksymalną, określa zarówno czas T_i trwania i -tej niżówki (obliczony jak w metodzie POT, według wzoru (1-2), jak i jej objętość V_i wyznaczona w m^3 :

$$V_i = \max_{t_{p,i} \leq t^* \leq t_{kk,i}} \left[\sum_{t=t_{p,i}}^{t^*} (Q_g - Q_t) \Delta t \right] \quad (1.10)$$

lub w dobach:

$$V_i = \max_{t_{p,i} \leq t^* \leq t_{kk,i}} \left[\sum_{t=t_{p,i}}^{t^*} (Q_g - Q_t) / \bar{Q} \right] \quad (1.11)$$

Czas pomiędzy $t_{k,i}$ a $t_{kk,i}$ nie jest uważany za ciąg dalszy niżówki, gdyż średni przepływ w tym okresie przewyższa wartość Q_g . Głębokość D_i i minimalny przepływ $Q_{min,i}$ i -tej niżówki liczone są tak samo jak dla niżówki POT.

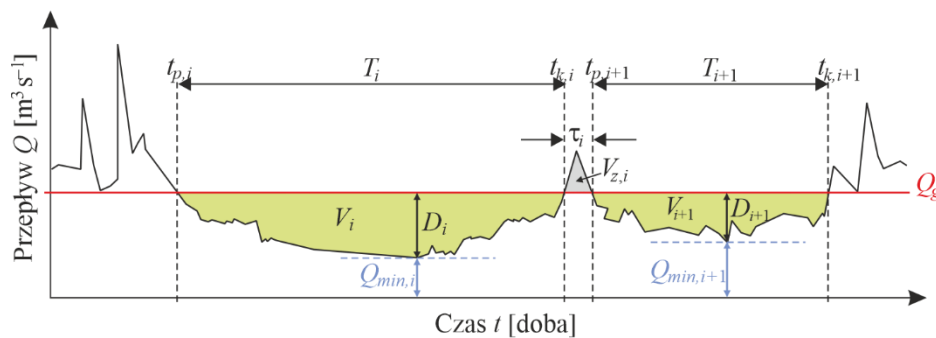
Porównanie wyników metod POT, SPA i MA

Jak pokazano na rys. 1.9, zastosowanie różnych metod do wyznaczania niżówek daje w efekcie różne wyniki. W przedstawionym na tym rysunku przypadku, najmniej niżówek (2) uzyskano stosując w obliczeniach metodę SPA (POT – 5, MA(10) – 5), a objętość niżówki jest najmniejsza przy zastosowaniu metody MA(10). Wykorzystanie SPA powoduje zazwyczaj uzyskanie mniejszej liczby niżówek przeciętnie dłuższych (Baran-Gurgul 2014).

Minimalny czas trwania niżówki i niżówki zależne

Ponieważ krótki, kilkudniowy, okres czasu z przepływem mniejszym niż Q_g może nie mieć znaczenia jako okres niedoboru wody, przy wyznaczaniu niżówek można uwzględnić dodatkowe założenie na minimalny czas t_{min} trwania niżówki. Wartość t_{min} w literaturze przyjmowana jest w bardzo szerokim przedziale: od 5 do nawet 20 dni. I tak Zelenhasić i Salvai (1987), Hisdal i Tallaksen (2000), Jakubowski (2011), Tokarczyk (2010), Urošev i in. (2016) przyjmują 5 dni, Kostuch (2004) – 7 i 11 dni, Tomaszewski (2007b i 2012b) - 5 i 7 dni, Ratomska (1993), Hisdal i Tallaksen (2003), Kaznowska (2006, 2011), Gustard i Demuth (2008), Kaznowska i Banasik (2009) i Kasprzyk (2009) – 10 dni, Farat i in. (1998), Mager i in. (2000) – 20 dni.

Zielińska (1963b), Fleig i in. (2006), Tallaksen i in. (1997) uważają, że jeśli okres czasu τ (rys. 1.10) pomiędzy sąsiadującymi niżówkami jest bardzo krótki, niżówki takie można uznać za niżówki zależne, tj. mające *de facto* tę samą przyczynę i można je połączyć w jedną.



Rys. 1.10. Niżówki sąsiadujące ze sobą, które mogą być uznane za zależne ($\tau_i \leq \tau^{max}$).

Fig. 1.10. Adjacent droughts that may be considered mutually dependent ($\tau_i \leq \tau^{max}$).

Kryterium czasu między niżówkami zależnymi (IT, *inter-event time criterion*) wprowadzone zostało przez Zelenhasicia i Salvaiego (1987). Według tego kryterium, jeżeli dwie sąsiadujące ze sobą niżówki o czasie trwania T_i i T_{i+1} i objętościach V_i i V_{i+1} (rys. 1.10), dzieli odstęp czasu τ_i krótszy od przyjętego czasu granicznego τ^{max} , to można je ze sobą połączyć tworząc jedną niżówkę o zwiększonym czasie trwania $T_{i'}$ i objętości $V_{i'}$:

$$T_{i'} = T_i + T_{i+1}; \quad V_{i'} = V_i + V_{i+1} \quad (1.12)$$

gdzie:

T_i – czas trwania i -tej niżówki [doba],

V_i – objętość i -tej niżówki [doba] lub [m³].

Innym sposobem łączenia niżówek kryterium (IC, *inter-event volume criterion*) według którego niżówki można łączyć, gdy stosunek objętości nadmiaru wody W_i między niżówkami zależnymi do objętości V_i niżówki poprzedzającej jest niewiększy od zadanej wartości α' (Fleig i in. 2006, Tallaksen i in. 1997).

Madsen i Rosbjerg (1995) zaproponowali zastosowanie kombinacji kryteriów IT i IC, w ich podejściu dwie kolejne niżówki są łączone, jeżeli spełnione zostaną dwa warunki jednocześnie:

$$\tau_i \leq \tau^{max} \quad \text{i} \quad W_i / V_i \leq \alpha' \quad (1.13)$$

gdzie:

W_i – stosunek objętości nadmiaru wody między niżówkami zależnymi,

V_i – objętość niżówki poprzedzającej.

Wówczas czas $T_{i'}$ trwania i objętość $V_{i'}$ są obliczane jako:

$$T_{i'} = T_i + T_{i+1} + \tau_i; \quad V_{i'} = V_i + V_{i+1} - W_i \quad (1.14)$$

Ratomska (1993) oraz Ozga-Zielińska i Brzeziński (1997) przyjmują czas $\tau^{max} = 15$ dni, pozostali autorzy czas krótszy, od 2 do 6 dni: Zelenhasić i Salvai (1987), Woo i Tarhule (1994) – 6 dni, Tallaksen i in. (1997), Kaznowska (2011, 2012), Kasprzyk (2010), Kaznowska i Banasik (2009), Gustard i Demuth (2008) – 5 dni, Tomaszewski (2007b) – 4 dni, Jakubowski (2011), Tomaszewski (2012b), Sung i Chung (2014) – 3 dni, Tokarczyk (2008), Hisdal i in. (2002), Urošev i in. (2016) – 2 dni. Zielińska (1963a) przyjmuje $\tau^{max} = 15$ dni, zakładając dodatkowo, że przepływy w czasie między sąsiadującymi niżówkami są wyższe od WNQ_{let} , lecz niższe od SSQ , a Yahiaoui i in. (2009) zalecają dobranie τ^{max} w zależności od celu analizy.

Tallaksen i in. (1997) oraz Sung i Chung (2014) w swoich pracach uznają, że niżówki należy połączyć, gdy czas τ je dzielący jest krótszy od 5 dni, a stosunek α' objętości nadmiaru wody W_i do objętości V_i poprzedniej niżówki jest mniejszy od 0,1.

Zelenhasić i Salvai (1987), a za nimi Jakubowski (2011) stosują założenie zgodne z którym usuwane są niżówki o objętości mniejszej niż αV_m , gdzie $\alpha = 0,005$, a V_m jest największą zaobserwowaną objętością niżówki.

Zbiorcze wskaźniki niżówki

Każdą niżówkę można scharakteryzować szeregiem charakterystyk. Zielińska (1963a) zauważyła, że przy sporządzaniu przeglądu niżówek dla rzek z dużego ob-

szaru, np. całej Polski, przyjęcie jednego, wybranego parametru byłoby niewystarczające, natomiast wprowadzenie kilku parametrów nie dawałoby przejrzystego obrazu kształtowania się zjawiska. Autorka zaproponowała wprowadzenie zbiorczego parametru niżówek letnich, który nazwała współczynnikiem niżówkowym μ , $\mu \in [0;100]$. Współczynnik ten zdefiniowała jako iloczyn $\mu = \mu_1 \cdot \mu_2$ współczynnika $\mu_1 \in [0;10]$ charakteryzującego czas trwania niżówki (dla niżówki trwającej zero dni $\mu_1 = 0$, a dla niżówki 184-dniowej, czyli trwającej przez całe lato hydrologiczne $\mu_1 = 10$) oraz współczynnika $\mu_2 \in [0;10]$ dotyczącego wartości najniższego przepływu danej niżówki (dla najniższego przepływu niżówki wynoszącego WNW_{let} $\mu_2 = 0$, a dla NNW_{let} – $\mu_2 = 10$). Im wskaźnik μ większy, tym niżówki dłuższe i głębsze.

Tokarczyk (2010) uważa, że tak określony współczynnik daje jednak znacznie zawyżone wartości oszacowania niżówki i zaproponowała nowy wskaźnik suszy hydrologicznej, który charakteryzuje natężenie suszy. Znormalizowany wskaźnik suszy hydrologicznej jest obliczany jako stosunek iloczynu niedoboru przepływu i czasu trwania danej niżówki do iloczynu niedoboru przepływu o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 95% i czasu trwania niżówki o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 95%. Do wartości tego wskaźnika autorka przypisała klasy opisujące natężenie niżówek (kolejno: niżówka krótkotrwała, długotrwała, susza hydrologiczna umiarkowana, silna i susza hydrologiczna ekstremalna). Tokarczyk stwierdziła również synchronizację terminów występowania niżówek długotrwałych i susz hydrologicznych oraz susz atmosferycznych ocenionych na podstawie wskaźnika standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego dla półrocza letniego w badanych zlewniach.

1.3.3. Niżówka maksymalna

Najniekorzystniejszymi niżówkami z punktu widzenia skutków ekonomicznych i społecznych, a także najbardziej interesującymi z praktycznego punktu widzenia, m. in. ze względu na ocenę zagrożenia wystąpieniem niżówki w danym przekroju, są niżówki najdłuższe i/lub o największych objętościach. Niżówki takie, nazywane są maksymalnymi (Clausen i Pearson 1995, Jakubowski 2011) lub ekstremalnymi (Zelenhasić i Salvai 1987, Hisdal i Tallaksen 2000). Określenie to może dotyczyć niżówki maksymalnej w zadanym okresie czasu, z reguły roku lub jego części, lub całego wielolecia. W pierwszym przypadku możliwe jest obliczenie częstości (prawdopodobieństwa) pojawiania się w roku niżówki maksymalnej o zadanym czasie trwania lub objętości; w drugim nie: dostępny jest tylko jeden przypadek.

Teoria estymacji rozkładów wartości ekstremalnych obejmuje zasadniczo dwa podejścia: model AMS (*annual maximum series*) i model PDS (*partial duration series*). Pierwszy z nich polega na wyborze maksymalnego w roku czasu trwania (maksymalnej w roku objętości) niżówki w danym wieloleciu i identyfikacji rozkładu prawdopodobieństwa tej charakterystyki; drugi – bardziej skomplikowany – obejmuje wybór wszystkich czasów trwania (objętości) niżówki powyżej założonego wartości granicznej oraz połączonej analizie probabilistycznej liczby i wielkości przekroczeń tej wartości w roku (Tallaksen i van Lanen 2004). PDS jest praktycznie równoważna AMS dla prawdopodobieństw przekroczenia nie większych niż 10%, dlatego dla tych prawdopodobieństw można z powodzeniem stosować prostsze podejście AMS.

W pracy przyjęto dwie definicje niżówki maksymalnej rocznej (nazywaną dalej niżówką maksymalną):

- niżówka o najdłuższym w roku czasie trwania T_{max} (zwaną dalej niżówką T_{max}),
- niżówka o największej w roku objętości V_{max} (zwaną dalej niżówką V_{max}).

Jeżeli niżówka maksymalna rozpoczyna się w jednym roku hydrologicznym,

a kończy w następnym (niżówka przechodząca z roku na rok), nie jest dzielona, lecz przypisywana w całości do tego roku, w którym jest jej środek. Takie podejście zostało zaproponowane przez Zelenhasicia i Salvaiego (1987).

1.4. Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy jest uzyskanie kompleksowej informacji na temat niżówki maksymalnej rocznej w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły, a w szczególności określenie przestrzennej zmienności badanych charakterystyk tej niżówki oraz ryzyka wystąpienia na badanym obszarze niżówki maksymalnej o czasie trwania i objętości przekraczającej zadaną wartość.

Aby zrealizować powyższy cel, określono wpływ przyjętej metody wyznaczania niżówki oraz przepływu granicznego na przestrzenną oraz czasową zmienność charakterystyk niżówek i niżówek maksymalnych rocznych. Zbadano także stacjonarność szeregów czasu trwania i objętości niżówek maksymalnych na badanym obszarze oraz zidentyfikowano najlepszy rozkład prawdopodobieństwa czasu T_{max} trwania i objętości V_{max} niżówek maksymalnych. Na badanym obszarze wyodrębniono podobszary o podobnym zagrożeniu niżówką maksymalną.

Analizy opierają się na 30-letnich szeregach czasowych przepływów dobowych w wybranych przekrojach wodowskazowych w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły.

Zakres pracy obejmuje wyznaczenie ciągów niżówek POT i SPA dla trzech przepływów granicznych $Q_{70\%}$, $Q_{80\%}$ i $Q_{90\%}$, określenie ich charakterystyk i – na tej podstawie – wyznaczenie ciągów niżówek maksymalnych rocznych. W dalszej kolejności każdy z tych ciągów służy do zbudowania rozkładu prawdopodobieństwa czasu trwania niżówki maksymalnej rocznej objętości niżówki maksymalnej rocznej. Uzyskane rozkłady pozwalają na stworzenie map przestrzennego rozkładu niżówek maksymalnych o zadanym okresie powtarzalności. Mapy takie dostarczają informacji o wielkości zagrożenia niżówką maksymalną w danym przekroju (lub na obszarze).

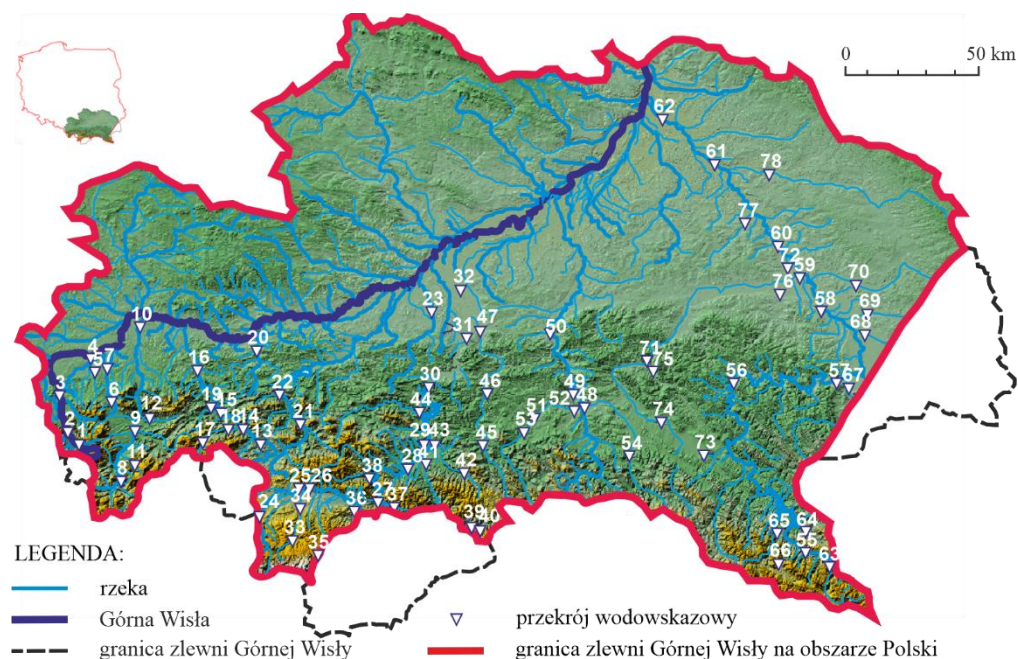
Cel pracy obejmuje następujące etapy badawcze:

- Wyznaczenie dwoma metodami (POT i SPA), przy trzech przepływach granicznych ($Q_{70\%}$, $Q_{80\%}$ i $Q_{90\%}$), charakterystyk niżówek takich jak: liczba niżówek, czas trwania i objętość niżówki, czas początku i końca niżówki.
- Określenie zmienności charakterystyk niżówki wzdłuż rzek na badanym obszarze.
- Określenie wpływu oddziaływania zbiorników retencyjnych na charakterystyki niżówki.
- Wyznaczenie szeregów czasu trwania T_{max} i objętości V_{max} niżówek maksymalnych rocznych.
- Zbadanie stacjonarności szeregów czasu trwania T_{max} i objętości V_{max} niżówek maksymalnych rocznych przy użyciu testu Manna-Kendalla.
- Identyfikacja jednowymiarowych rozkładów prawdopodobieństwa T_{max} i V_{max} oraz dwuwymiarowych rozkładów prawdopodobieństwa (T_{max} , V_{max}).
- Wyznaczenie okresu powtarzalności T_p zmiennych T_{max} i V_{max} .
 - Opracowanie map zagrożenia niżówką maksymalną rozumianych jako przestrzenny rozkład 10-letnich i 50-letnich niżówek maksymalnych.

2. OBSZAR BADAŃ ORAZ DANE ŹRÓDŁOWE

2.1. Charakterystyka fizyczno-geograficzna zlewni Górnej Wisły oraz lokalizacja przekrojów wodowskazowych

W pracy wykorzystano pozyskane z IMGW-PIB ciągi dobowych przepływów z okresu od 1.11.1983 do 31.10.2013 roku (a więc z lat hydrologicznych 1984-2013) zmierzonych w 78 przekrojach wodowskazowych zlokalizowanych w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły. Rozmieszczenie wodowskazów przedstawiono na rys. 2.1 i rys. 2.2, a ich charakterystykę zawarto w załączniku w tabelicy 2.1.



Przekroje wodowskazowe (rzeka/nazwa):

1. Wisła/Wisła	27. Dunajec/Krościenko	53. Sękówka/Gorlice
2. Wisła/Ustroń Oblaziec	28. Dunajec/Gołkowice	54. Jasiołka/Zboiska
3. Wisła/Skoczów	29. Dunajec/Nowy Sącz	55. San/Zatwarnica
4. Iłownica/Czechowice Dziedzice	30. Dunajec/Czchów	56. San/Dynów
5. Wapienica/Podkępie	31. Dunajec/Zgłobice	57. San/Przemysł
6. Biała/Mikuszowice	32. Dunajec/Zabno	58. San/Jarosław
7. Biała/Czechowice Bestwina	33. Cicha Woda/Zakopane Harenda	59. San/Leżachów
8. Soła/Rajcza	34. Biały Dunajec/Szaflary	60. San/Rzuchów
9. Soła/Żywiec	35. Białka/Łysa Polana	61. San/Nisko
10. Soła/Oświęcim	36. Niedziczanka/Niedzica	62. San/Radomyśl
11. Żabniczanka/Żabnica	37. Grajcarek/Szczawnica	63. Wołosaty/Stuposiany
12. Kocierzanka/Łęka wica	38. Ochotnica/Tylmanowa	64. Czarna/Polana
13. Skawa/Jordanów	39. Poprad/Muszyna	65. Solinka/Terka
14. Skawa/Osielec	40. Poprad/Muszyna Milik	66. Wetlina/Kalnica
15. Skawa/Sucha	41. Poprad/Stary Sącz	67. Wiar/Krówniki
16. Skawa/Wadowice	42. Kamienica/Łabowa	68. Wisznia/Nienowice
17. Skawica/Zawoja	43. Kamienica/Nowy Sącz	69. Szkoło/Charytany
18. Skawica/Skawica Dolna	44. Łososina/Jakubkowice	70. Lubaczówka/Zapałów
19. Stryszawka/Sucha	45. Biała/Grybów	71. Wisłok/Żarnowa
20. Skawinka/Radziszów	46. Biała/Ciężkowice	72. Wisłok/Tryńcza
21. Raba/Kasinka Mała	47. Biała/Koszyce Wielkie	73. Pielnica/Nowosielce
22. Raba/Stróża	48. Wisłoka/Zólków	74. Morwawa/Iskrzynia
23. Uszwica/Borzęcin	49. Wisłoka/Krajowice	75. Stobnica/Godowa

Rys. 2.1. Lokalizacja przekrojów wodowskazowych w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły.
Fig. 2.1. Location of gauging cross-sections within the right-bank part of the Upper Vistula basin.

Tablica 2.1.

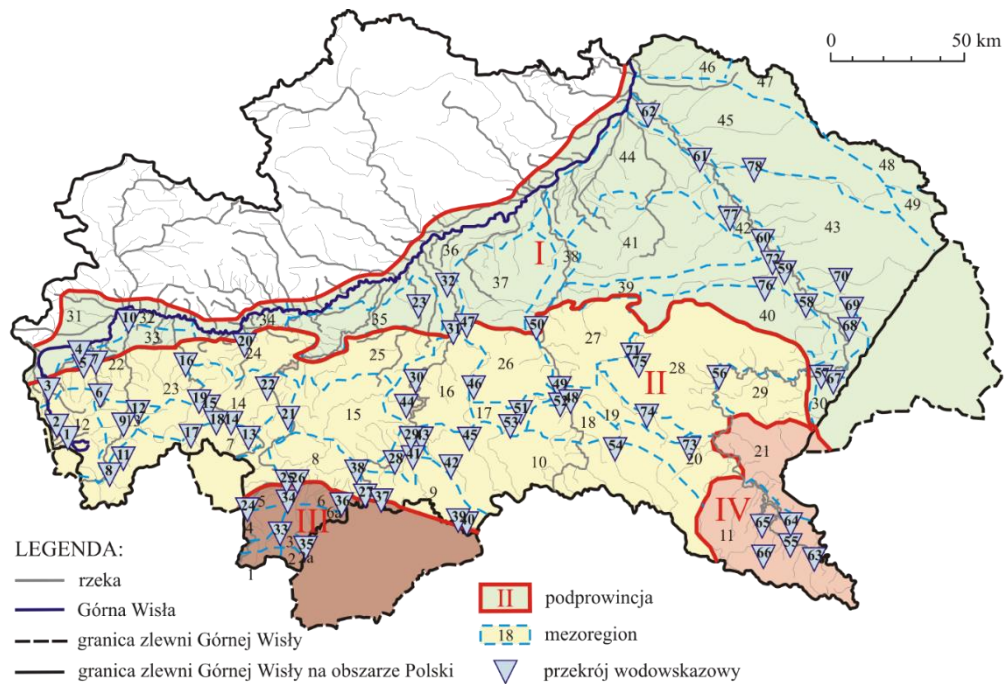
Charakterystyki przekrojów wodowskazowych i zlewni zamkniętych tymi przekrojami
(A – powierzchnia zlewni, H – wysokość położenia zera wodowskazu)

Table 2.1.

Characteristics of gauging cross-sections and catchments closed by these cross-sections
(A – catchment area, H – gauging station elevation)

Lp	Rzeka/Wodowskaz	$A^{1)}$ [km ²]	$H^{2)}$ [m n.p.m.]	Lp	Rzeka/Wodowskaz	$A^{1)}$ [km ²]	$H^{2)}$ [m n.p.m.]
1	Wisła / Wisła	54,0	470,6	39	Poprad / Muszyna	1514,0	446,3
2	Wisła / Ustroń Obłaziec	108,0	398,7	40	Poprad / Muszyna Milik	1695,0	440,4
3	Wisła / Skoczów	297,0	285,7	41	Poprad / Stary Sącz	2065,0	297,3
4	Iłownica / Czechowice Dziedzice	194,0	240,7	42	Kamienica / Łabowa	67,2	446,2
				43	Kamienica / Nowy Sącz	239,0	279,0
5	Wapienica / Podkępie	52,9	243,4	44	Łososina / Jakubkowice	341,0	248,3
6	Biała / Mikuszowice	33,3	360,9	45	Biała / Grybów	209,0	319,7
7	Biała / Czechowice Bestwina	118,0	258,7	46	Biała / Ciężkowice	525,0	238,6
8	Soła / Rajcza	255,0	481,2	47	Biała / Koszyce Wielkie	869,0	190,7
9	Soła / Żywiec	785,0	342,0				
10	Soła / Oświęcim	1385,0	225,8	48	Wisłoka / Żótków	581,0	224,0
11	Żabniczanka / Żabnica	24,7	564,8	49	Wisłoka / Krajowice	2092,0	213,4
12	Kocierzanka / Łękawica	35,2	386,8	50	Wisłoka / Łabuzie	2546,0	187,7
13	Skawa / Jordanów	98,2	441,5	51	Ropa / Klęczany	483,0	259,1
14	Skawa / Osielec	240,0	396,2	52	Ropa / Topoliny	969,0	224,8
15	Skawa / Sucha	468,0	324,0	53	Sękówka Gorlice	121,0	279,2
16	Skawa / Wadowice	835,0	255,2	54	Jasiołka / Zboiska	264,0	312,1
17	Skawica / Zawoja	48,6	577,5	55	San / Zatwarnica	490,0	486,2
18	Skawica / Skawica Dolna	139,0	408,5	56	San / Dynów	2942,0	234,9
19	Stryaszawka / Sucha Stryaszawka	140,0	323,9	57	San / Przemyśl	3684,0	190,6
				58	San / Jarosław	7038,0	173,9
20	Skawinka / Radziszów	317,0	213,5	59	San / Leżachów	8359,0	167,5
21	Raba / Kasinka Mała	353,0	358,6	60	San / Rzuchów	12183,0	162,7
22	Raba / Stróża	644,0	297,0	61	San / Nisko	15592,0	150,2
23	Uswicza / Borzęcin	265,0	187,1	62	San / Radomyśl	16824,0	139,1
24	Cz. Dunajec / Koniówka	134,0	725,3	63	Wołosaty / Stuposiany	115,0	544,5
25	Cz. Dunajec / Nowy Targ	431,0	579,3	64	Czarna / Polana	93,8	437,4
26	Dunajec / Nowy Targ Kowaniec	680,0	547,3	65	Solinka / Terka	310,0	433,4
				66	Wetlina / Kalnica	119,0	573,7
27	Dunajec / Krościenko	1579,0	413,5	67	Wiar / Krówniki	789,0	191,6
28	Dunajec / Gołkowice	2045,0	312,9	68	Wisznia / Nienowice	1185,0	179,7
29	Dunajec / Nowy Sącz	4341,0	275,7	69	Szkló / Charytany	754,0	182,9
30	Dunajec / Czchów	5316,0	275,7	70	Lubaczówka / Zapałów	853,0	187,3
31	Dunajec / Zgłobice	5647,0	190,7	71	Wisłok / Żarnowa	1427,0	214,3
32	Dunajec / Żabno	6732,0	173,4	72	Wisłok / Tryńcza	3518,0	167,2
33	Cicha Woda /	58,4	763,1	73	Pielnica / Nowosielce	41,0	301,8
34	Biały Dunajec / Szaflary	210,0	636,5	74	Morwawa / Iskrzynia	109,0	265,9
35	Białka / Łysa Polana	63,1	965,6	75	Stobnica / Godowa	328,9	216,1
36	Niedziczanka / Niedzica	136,0	495,5	76	Mlecza / Gorliczyna	522,0	173,4
37	Grajcarek / Szczawnica	75,7	452,9	77	Trzebośnica / Sarzyna	252,0	164,1
38	Ochotnica / Tylmanowa	111,0	394,3	78	Tanew / Harasiuki	2032,0	165,5

(źródła: ¹⁾Ujda 1972, Czarnecka 1983, ²⁾Ujda 1972, Czarnecka 1983)



Jednostki fizyczno-geograficzne w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły na podstawie regionalizacji Solona i in. (2018):

I - PODKARPACIE PÓLNOOCNE Z WYŻYNĄ LUBELSKO-LWOWSKĄ:

Kotlina Oświęcimska (Równina Pszczyńska - 31, Dolina Górnej Wisły - 32, Podgórze Wilamowskie - 33), Brama Krakowska - 34, Kotlina Sandomierska (Podgórze Bocheńskie - 35, Nizina Nadwiślańska - 36, Płaskowyż Tarnowski - 37, Dolina Dolnej Wisłoki - 38, Pradolina Podkarpacka - 39, Podgórze Rzeszowskie - 40, Płaskowyż Kolbuszowski - 41, Dolina Dolnego Sanu - 42, Płaskowyż Tamogrodzki - 43, Równina Tarnobrzeska - 44, Równina Bilgorajska - 45), Wyżyna Lubelsko-Lwowska: Wyżyna Lubelska (Wzniesienia Urzędowskie - 46), Roztocze (Roztocze Zachodnie - 47, Roztocze Środkowe - 48, Roztocze Wschodnie - 49)

II - ZEWNĘTRZNE KARPATY ZACHODNIE:

Beskidy Zachodnie (Beskid Żywiecki - 7, Gorce - 8, Beskid Sądecki - 9, Kotlina Sądecka - 9a, Beskid Śląski - 12, Kotlina Żywiecka - 13, Beskid Makowski - 14, Beskid Wyspowy - 15, Beskid Mały - 23), Beskidy Środkowe (Beskid Niski - 10), Pogórze Zachodniobeskidzkie (Pogórze Śląskie - 22, Pogórze Wielickie - 24, Pogórze Wisnickie - 25), Pogórze Środkowobeskidzkie (Pogórze Roznowskie - 16, Obniżenie Gorlickie - 17, Pogórze Jasielskie - 18, Kotlina Jasielsko-Krosnieńska - 19, Pogórze Bukowskie - 20, Pogórze Ciężkowickie - 26, Pogórze Strzyżowskie - 27, Pogórze Dynowskie - 28, Pogórze Przemyskie - 29)

III - CENTRALNE KARPATY ZACHODNIE:

Łańcuch Tatrzański (Tatry Zachodnie - 1, Tatry Wschodnie - 2, Tatry Regłowe - 2a), Obniżenie Orawsko-Podhalańskie (Bruzda Podtatrzańska - 3, Pogórze Przedtatrzańskie - 4, Kotlina Orawsko - Nowotarska - 5, Pieniny - 6, Magura Spiska - 6a)

IV - KARPATY WSCHODNIE Z PODKARPACIEM WSCHODNIM:

Wschodnie Podkarpackie: Płaskowyż Sańsko-Dniestrzański - 30, Zewnętrzne Karpaty Wschodnie - Beskidy Lesiste (Bieszczady Zachodnie - 11, Góry Sanocko - Turczańskie - 21)

Rys. 2.2. Lokalizacja przekrojów wodowskazowych w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły na tle regionów fizyczno-geograficznych.

Fig. 2.2. Location of gauging cross sections within the right-bank part of the Upper Vistula catchment within the physical and geographical regions.

Zlewnia Górnej Wisły jest częścią dorzecza Wisły zamkniętą wodowskazem w Zawichoście położonym w 393,8 km biegu Wisły (Chelmiński 1991). Zlewnia ta zajmuje obszar około 50655 km² (Czarnecka 2005), z czego około 1/3 powierzchni przypada na zlewnie rzek karpaccich (Ziemońska 1973).

Prawobrzeżna część zlewni Górnej Wisły jest 2,8-krotnie większa od jej części lewobrzeżnej. Głównymi prawobrzeżnymi dopływami są: Soła, Skawa, Raba, Dunajec, Wisłoka i San (tablica 2.2). Zlewnie trzech najdłuższych dopływów: Sanu, Dunajca i Wisłoki zajmują łącznie 74%, a zlewnia samego Sanu 45% prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły.

Tablica 2.2.

Podstawowe charakterystyki prawych dopływów Górnej Wisły i ich zlewni.

Table 2.2.

Basic characteristics of the right tributaries of the Upper Vistula river and their catchments.

Rzeka	Rząd	Długość ¹⁾ [km]	Powierzchnia zlewni ²⁾ [km ²]	Udział w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły [%]	Udział w zlewni Górnej Wisły [%]
Górna Wisła	I	394	50655		100,0
prawobrzeżna część zlewni Górnej Wisły			37498 ¹⁾	100,0	74,0
Mała Wisła	I	106	1821	4,9	3,6
Soła	II	89	1381	3,7	2,7
Skawa	II	96	1178	3,1	2,3
Raba	II	132	1537	4,1	3,0
Dunajec	II	248	6796	18,1	13,4
Wisłoka	II	164	4100	10,9	8,1
San	II	443	16877	45,0	33,3

¹⁾ Czarnecka 1983, Chelmicki 1991, ²⁾ Czarnecka 2005

Zgodnie z regionalizacją Solona i in. (2018) w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły zostały wydzielone cztery regiony fizyczno-geograficzne: Centralne Karpaty Zachodnie, Zewnętrzne Karpaty Zachodnie, Karpaty Wschodnie z Podkarpaciem Wschodnim oraz Podkarpacie Północne wraz z częścią Wyżyny Lubelsko-Lwowskiej (rys. 2.2). Ze względu na zwiększenie przejrzystości rysunków, w dalszej części pracy, region I nazywany będzie Podkarpaciem, region II – Beskidami, region III – Tatrami i Podhalem, a region IV – Bieszczadami.

Karpaty na obszarze Polski składają się z masywów i pasm górskich obniżających się stopniowo ku północy. Karpaty te, z wyjątkiem Bieszczad i przylegającej do nich wyżyny, należą do Karpat Zachodnich. W ich obrębie znajdują się zarówno góry wysokie (Tatry), średnie (Beskid Żywiecki, Śląski i Sądecki), jak i niskie (Pieniny, Beskid Mały i Niski) oraz wyżynne (Pogórze Karpackie) (Chowaniec 2009).

Centralne Karpaty Zachodnie, mimo niewielkiego obszaru, charakteryzują się występowaniem kontrastowo różnych jednostek morfologicznych i litologiczno-strukturalnych (Chowaniec 2009). Najbardziej zróżnicowane pod względem krajobrazowym i hipsometrycznym są Tatry charakteryzujące się wysokogórską rzeźbą fluwialno-denudacyjną i krasową, z dużymi spadkami dolin i znacznymi nachyleniami stoków. Jest to źródliskowy obszar Dunajca. Deniwelacje między najwyższymi szczytami a Podhalem wynoszą od 1700 m do 2000 m, a lokalne deniwelacje sięgają nawet 1000 m. Podhale stanowi śródgórską kotlinę będącą obniżeniem tektonicznym na przedpolu Tatr i oddziela Tatry od pasa Karpat zewnętrznych (Ziemońska 1973).

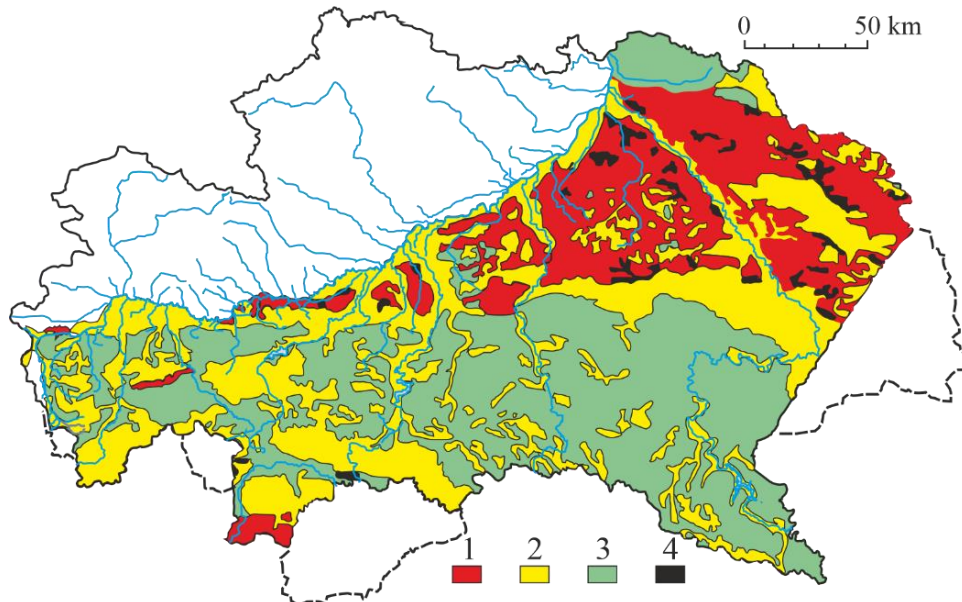
Zewnętrzne Karpaty obejmują na terenie Polski obszar Beskidów i Bieszczad. W stosunku do Centralnych Karpat, Karpaty Zewnętrzne charakteryzują się małym zróżnicowaniem krajobrazu (Chowaniec 2009). Zewnętrzne Karpaty Zachodnie obejmują Beskidy wraz z Pogórzami. Na Beskidy składają się pasma gór średnich Beskidu Śląskiego, Żywieckiego, Sądeckiego oraz niskie góry Beskidu Małego, Średniego, Wyspowego i Niskiego, natomiast Pogórze stanowi rozległą wyżynę z kotlinami wnioskującymi często w Beskidy, tworzącymi w nich rozległe bramy i obniżenia (Ziemońska 1973).

Bieszczady oraz położone na ich przedpolu wyżyny należą do Karpat Wschodnich i dzielą się na Bieszczady Wysokie, będące zwartym zespołem górskim o stro-

mych stokach rozdzielonych szerokimi obniżeniami, oraz Bieszczady Niskie stanowiące strefę obniżen o charakterze pogórskim, będącą przedłużeniem Dołów Jasielsko-Sanockich.

2.2. Przepuszczalność gleb

Jednym z ważniejszych czynników warunkujących powstawanie niżówek jest przepuszczalność gleb. Adamczyk (1991) opracował mapę przepuszczalności gleb w zlewni Górnej Wisły wyróżniając cztery rodzaje gleb: łatwo przepuszczalne (rankery, bielcowe, brunatne i pararędziny o składzie mechanicznym piasków i glin szkieletowych), średnio przepuszczalne (brunatne i płowe, czarnoziemy, mady i rędziny o składzie mechanicznym glin lekkich i średnich lub utworów pyłowych), słabo przepuszczalne (brunatne i płowe oglejone, pseudoglejowe oraz mady oglejone o składzie mechanicznym glin ciężkich i pyłów ilastych) oraz trudno przepuszczalne i nieprzepuszczalne (torfowe, murszowe i glejowe) (rys. 2.3). Gleby łatwo przepuszczalne są to głównie gleby leśne, gleby średnio i słabo przepuszczalne nadają się pod użytki orne i sady, a trudno przepuszczalne – pod użytki zielone.



Rys. 2.3. Przepuszczalność gleb w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły (1 – gleby łatwo przepuszczalne, 2 – gleby średnio przepuszczalne, 3 – gleby słabo przepuszczalne, 4 – gleby trudno przepuszczalne i nieprzepuszczalne) (na podstawie: Adamczyk 1991).

Fig. 2.3. Permeability of soils in the right-bank part of the Upper Vistula catchment (1 - easily permeable soils, 2 - moderately permeable soils, 3 - poorly permeable soils, 4 - hardly permeable and impermeable soils) (on the basis of: Adamczyk 1991).

Budowa geologiczna prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły wykazuje znaczne zróżnicowanie pod względem stratygraficznym i tektonicznym, co stwarza różne warunki infiltracji wód. Na obszarze tym wyodrębnić można dwa obszary występowania gleb łatwo przepuszczalnych: Tatry i Podkarpacie. Występujące w Tatrach skrasowiałe utwory wapienno-dolomityczne odznaczają się dużą wodonością. Spad wapieni regłowych w kierunku północnym, gdzie zanurzają się one pod utwory fliszu podhalańskiego, stwarza możliwości występowania zbiorników wód podziemnych na większych głębokościach. Znaczną wodonością charakteryzują się czwar-

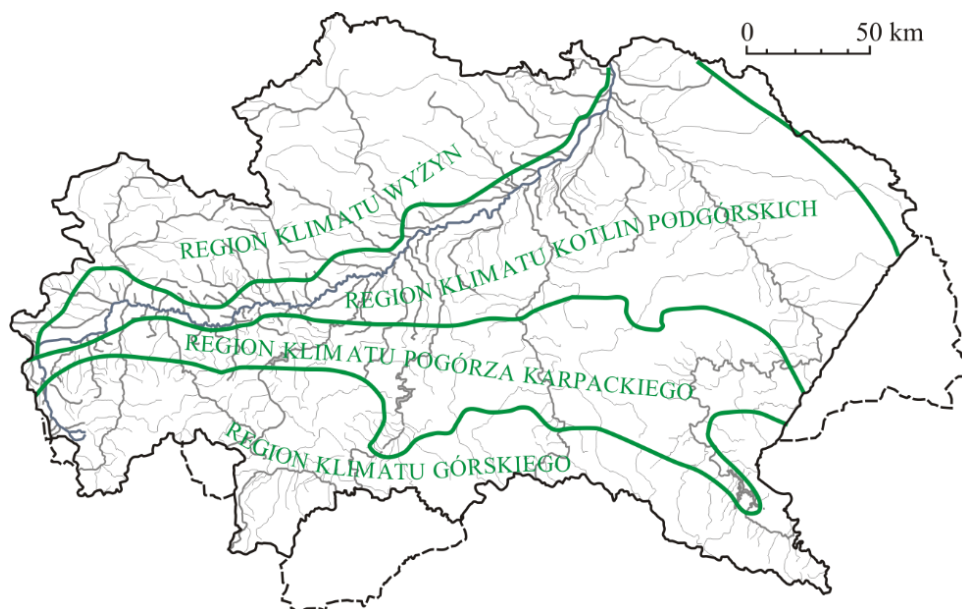
torzędowe utwory zwirowo-piaszczyste, z których zbudowane są stożki i terasy wypełniające dna dolin większych rzek (Ziemońska 1975). Na całym obszarze Podkarpacia dominują lżejsze gleby piaszczyste i piaszczysto-gliniaste, dobrze przepuszczalne i zwykle dość suche (Adamczyk 1991).

Beskidy zbudowane są z utworów fliszu karpackiego odznaczających się małą przepuszczalnością i zdolnością retencyjną. Ich wodochłonność jest uzależniona od stopnia spękania i porowatości oraz od funkcjonowania systemu szczelin, które bywają często wypełnione materiałem nieprzepuszczalnym, utrudniającym krążenie wód.

Na obszarze Bieszczad i Beskidu Niskiego przeważają bardziej zwarte i mało przepuszczalne gleby gliniasto-pylaste i gliniasto-ilaste (Adamczyk 1991)

2.3. Klimat

Obszar Górnej Wisły jest zróżnicowany pod względem klimatycznym (Chowaniec 2009). W prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły wyróżniono trzy główne regiony klimatyczne: region klimatu górskiego, region klimatu Pogórza Karpackiego oraz region klimatu Kotlin Podgórskich (rys. 2.4). Region klimatu górskiego, na południu zlewni, jest bogaty w opady. Dominuje tu wpływ wysokości przejawiający się piętrowym zróżnicowaniem klimatu. Granica tego regionu pokrywa się z izotermą roku 7°C i izohietą roczną 900 mm. Region klimatu Pogórza Karpackiego jest umiarkowanie ciepły i wilgotny, z temperaturą średnią roczną 7- 8°C i sumą roczną opadu 700-900 mm. Najbardziej na północ badanego obszaru obserwuje się ciepły i umiarkowanie suchy klimat Kotlin Podgórskich (w większości jest to obszar Kotliny Sandomierskiej) (Niedźwiedz i Obrębska-Starkłowa 1991).

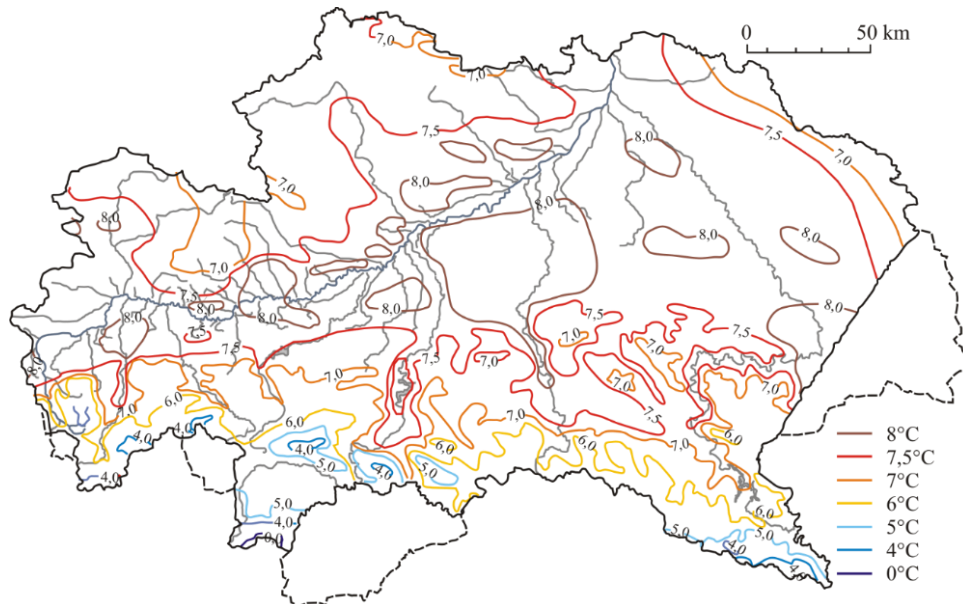


Rys. 2.4. Regiony klimatyczne w zlewni Górnej Wisły (na podstawie: Niedźwiedz i Obrębska-Starkłowa 1991).

Fig. 2.4. Climatic regions within the Upper Vistula catchment (on the basis of: Niedźwiedz and Obrębska-Starkłowa 1991).

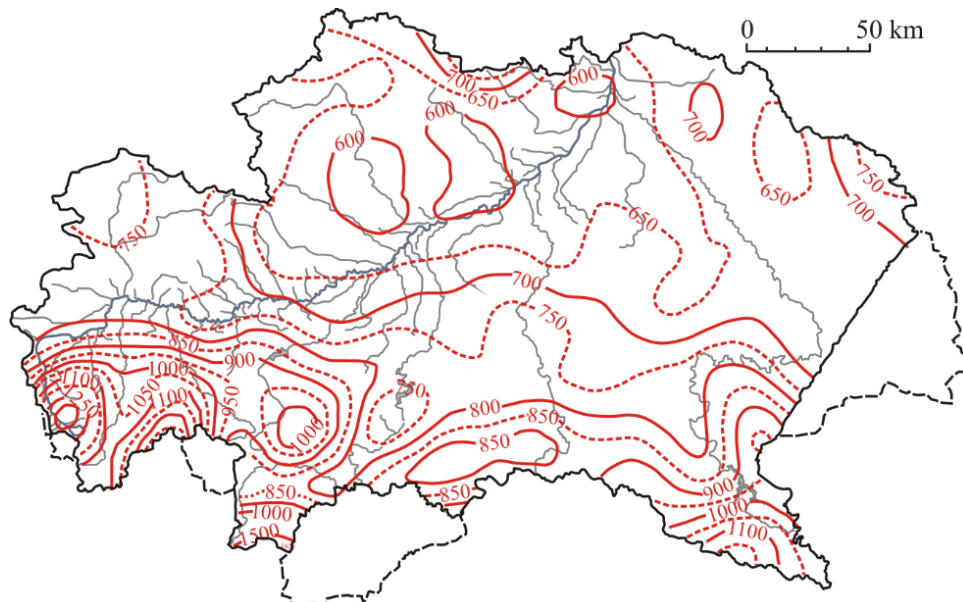
Duże zróżnicowanie rzeźby terenu decyduje o występowaniu na terenie zlewni Górnej Wisły znacznych różnic termicznych (rys. 2.5). W pasie środkowej części

zlewni Górnej Wisły występują obszary o średniej rocznej temperaturze powietrza powyżej 8°C (Niedźwiedz i Obrębska-Starkłowa 1991). Najniższe temperatury obserwuje się na południu zlewni. Prawie całe Podhale leży w obrębie piętra umiarkowanie chłodnego o średniej rocznej temperaturze od 4 do 6°C, podczas gdy obszar Tatr w miarę wzrostu wysokości przechodzi od strefy chłodnej (o temperaturze od 2 do 4°C), poprzez bardzo chłodną (od 0 do 2°C) do umiarkowanie zimnej, o temperaturze od -2 do 0°C (Chowaniec 2009).



Rys. 2.5. Średnia roczna temperatura powietrza (1951-1970) w zlewni Górnej Wisły (na podstawie: Niedźwiedz i Obrębska-Starkłowa 1991).

Fig. 2.5. Average annual air temperature (1951-1970) in the Upper Vistula catchment (on the basis of: Niedźwiedz and Obrębska-Starkłowa 1991).



Rys. 2.6. Średnie sumy opadów rocznych w zlewni Górnej Wisły (1952-1981) (na podstawie: Cebulska i in. 2013).

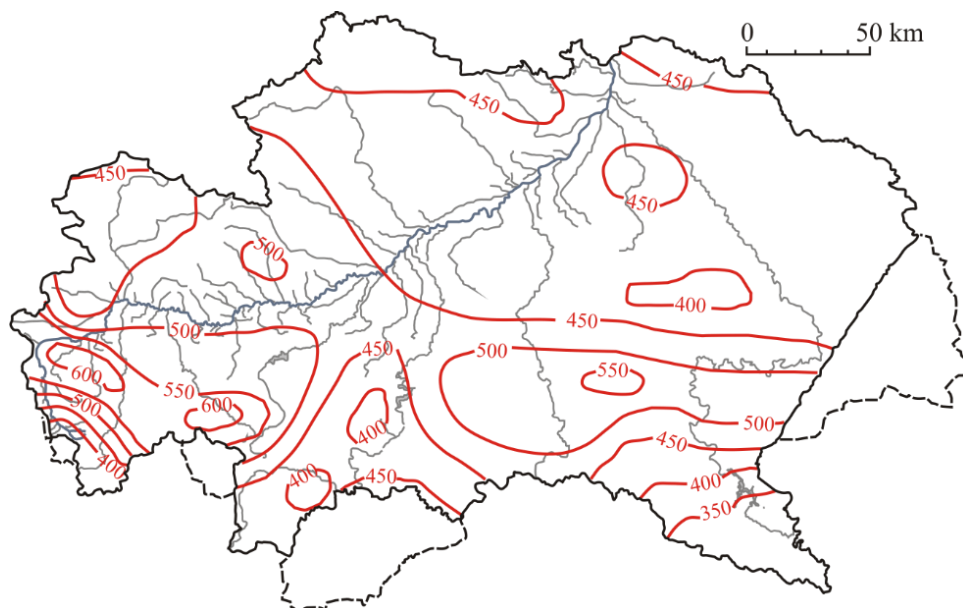
Fig. 2.6. Average annual precipitation in the Upper Vistula catchment (1952-1981) (on the basis of: Cebulska et al. 2013).

Karpaty charakteryzują się największymi w Polsce opadami, których maksymalne wartości dobowe osiągają 285 mm (Chowaniec 2009). Średnia roczna suma opadów w zlewni Górnej Wisły wynosi ok. 770 mm (Cebulska i in. 2013); na Pogórzu przekracza 800 mm, w Beskidach mieści się w przedziale 900-1400 mm, a w najwyższych partiach Tatrach jest wyższa od 1500 mm (rys. 2.6).

Najwyższe sumy miesięczne opadów notowane są na obszarze zlewni Górnej Wisły Karpatach w lipcu, w Tatrach – w czerwcu; a najniższe – w styczniu i lutym (Niedźwiedź i Obrębska-Starkłowa 1991). Opady w Tatrach cechuje nie tylko ich wysoka suma, ale i wyższa niż na terenach położonych niżej częstotliwość oraz intensywność (Strzemiński 1956). Występuje tu także większa niż na pozostałej części zlewni Górnej Wisły liczba dni z pokrywą śnieżną: średnia roczna wynosi ponad 160 dni, a w szczytowych partiach Tatr przekracza 300 dni (Niedźwiedź i Obrębska-Starkłowa 1991).

W Tatrach obserwuje się również największe zróżnicowanie wilgotności powietrza, co jest związane z występowaniem wiatrów halnych (Niedźwiedź i Obrębska-Starkłowa 1991). Maksimum wilgotności przypada na maj-czerwiec, a minimum w Tatrach i na Podhalu występuje w lutym. Na pozostałym terenie maksimum wilgotności przypada na okres od listopada do lutego; minimum występuje w maju.

Średnie roczne sumy parowania terenowego mieszczą się w granicach 300-600 mm i są najniższe w wyższych partiach gór (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Średnie roczne sumy parowania terenowego w mm, na obszarze zlewni Górnej Wisły (na podstawie: Niedźwiedź i Obrębska-Starkłowa 1991).

Fig. 2.7. Average annual sums of actual evaporation in mm, in the Upper Vistula catchment (on the basis of: Niedźwiedź and Obrębska-Starkłowa 1991).

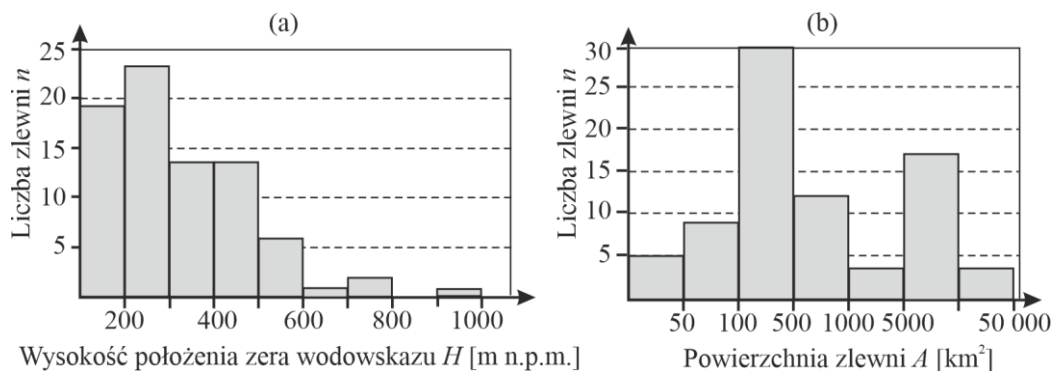
2.4. Charakterystyka zlewni badawczych

Zlewnie zamknięte przekrojami wodowskazowymi zlokalizowanymi na prawobrzeżnym obszarze zlewni Górnej Wisły są zróżnicowane, obejmują zarówno zlewnie górskie, wyżynne, jak i nizinne. Najniżej położonymi źródłami rzek (poniżej 350 m n.p.m.), na których zlokalizowane są wodowskazy wymienione na rys. 2.1, są źródła rzek w zlewni Sanu (Trzebońnica, Lubaczówka, Tanew i Szkło), natomiast najwyżej

położone (powyżej 1400 m n.p.m.) są źródła rzek w zlewni Dunajca (Białka, Poprad, Dunajec, Cicha Woda) (Czarnecka 1983, Google earth). Większość wodowskazów (55 z 78) położona jest poniżej 400 m n.p.m. (rys. 2.8a); najniżej znajdują się wodowskazy na Sanie (Nisko, Radomyśl, Rzuchów), a najwyżej (powyżej 700 m n.p.m.) – wodowskazy w zlewni Dunajca (Koniówka na Czarnym Dunajcu, Zakopane Harenda na Cichej Wodzie i Łysa Polana na Białce) (tablica 2.1).

Powierzchnie ponad połowy (42 z 78) zlewni zamkniętych przekrojami wodowskazowymi, znajdują się w przedziale od 100 do 1000 km² (rys. 2.8b, tablica 2.1).

Średni spadek cieków (od źródła do danego przekroju wodowskazowego) większości cieków (56 z 78) nie przekracza 2%, są jednak odcinki rzek o spadku przekraczającym 8% (rys. 2.8b): Biała do Mikuszowic, Cicha Woda do przekroju Zakopane Harenda i Żabniczanka – do Żabnicy (Czarnecka 1983, Wodowskazy 1972, mapa GIS).



Rys. 2.8. Histogramy: a) wysokości H położenia zera wodowskazu, b) powierzchni A zlewni zamkniętej przekrojem wodowskazowym w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły. N oznacza liczbę zlewni.

Fig. 2.8. Distribution of numer of catchment N , versus: a) the gauging station elevation H , b) area A of the catchment closed by the gauging cross-section and in the right-bank part of the Upper Vistula catchment.

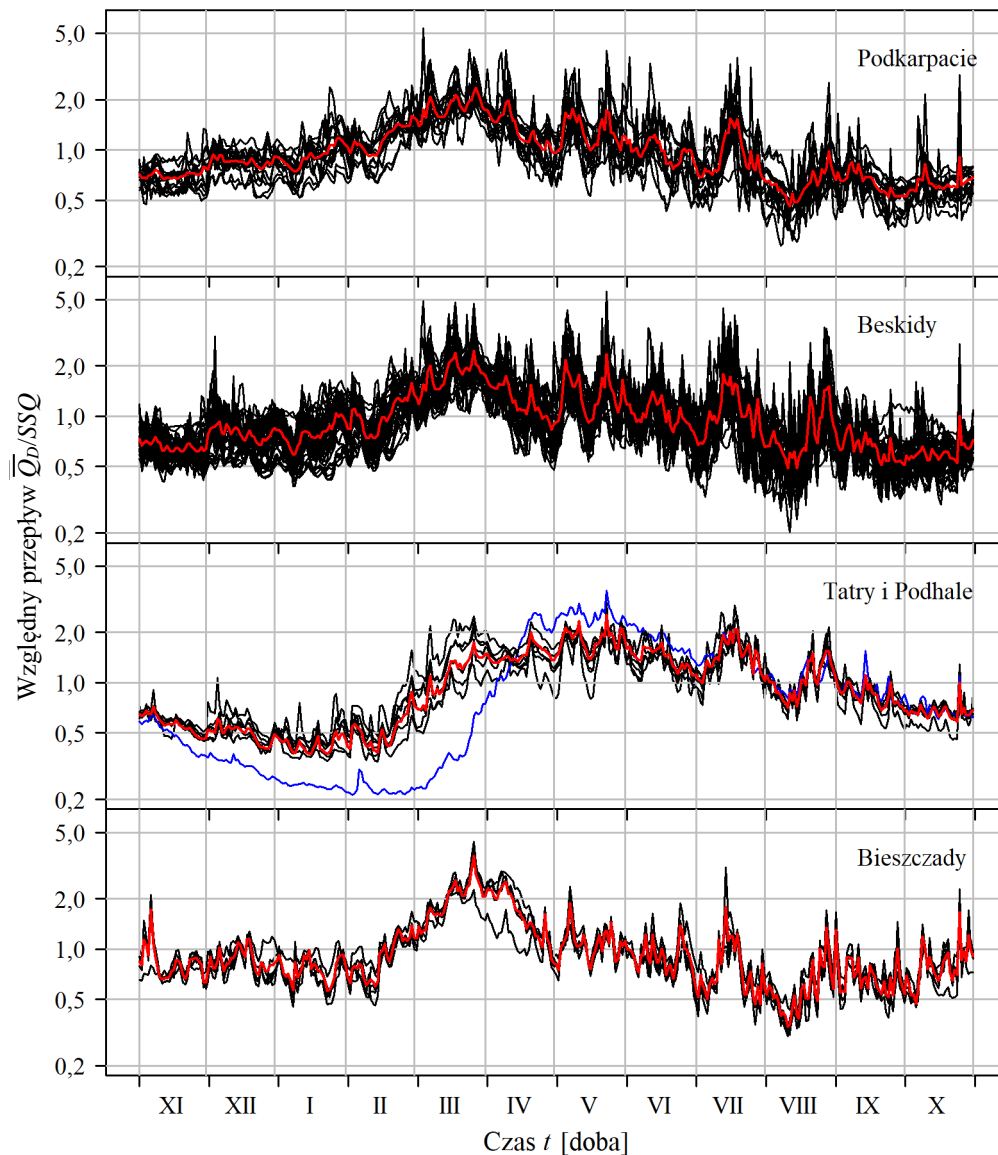
2.5. Dane źródłowe

Podstawową informacją zamierzonych w pracy analiz są ciągi dobowych przepływów z 30-lecia hydrologicznego 1984-2013 zmierzonych w 78 przekrojach wodowskazowych zlokalizowanych w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły (zob. rys. 2.1). Wodowskazy te położone są w różnych regionach fizyczno-geograficznych zlewni. Regionalizacja ta w pewien sposób różnicuje reżim przepływu co ilustruje rys. 2.9, gdzie pokazane są roczne hydrogramy średniego z wielolecia 1984-2013 względniego przepływu \bar{Q}_D^w / SSQ w jednoimiennych dniach roku hydrologicznego:

$$\bar{Q}_D^w = \left\{ \frac{1}{30} \sum_{r=1}^{30} Q_{r,i}^w \right\}_{i=1}^{365}, \quad w \in region_j, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2.1)$$

gdzie:

$Q_{r,i}^w$ – średniodobowy przepływ w i -tym dniu r -go roku w przekroju w [m³·s⁻¹].



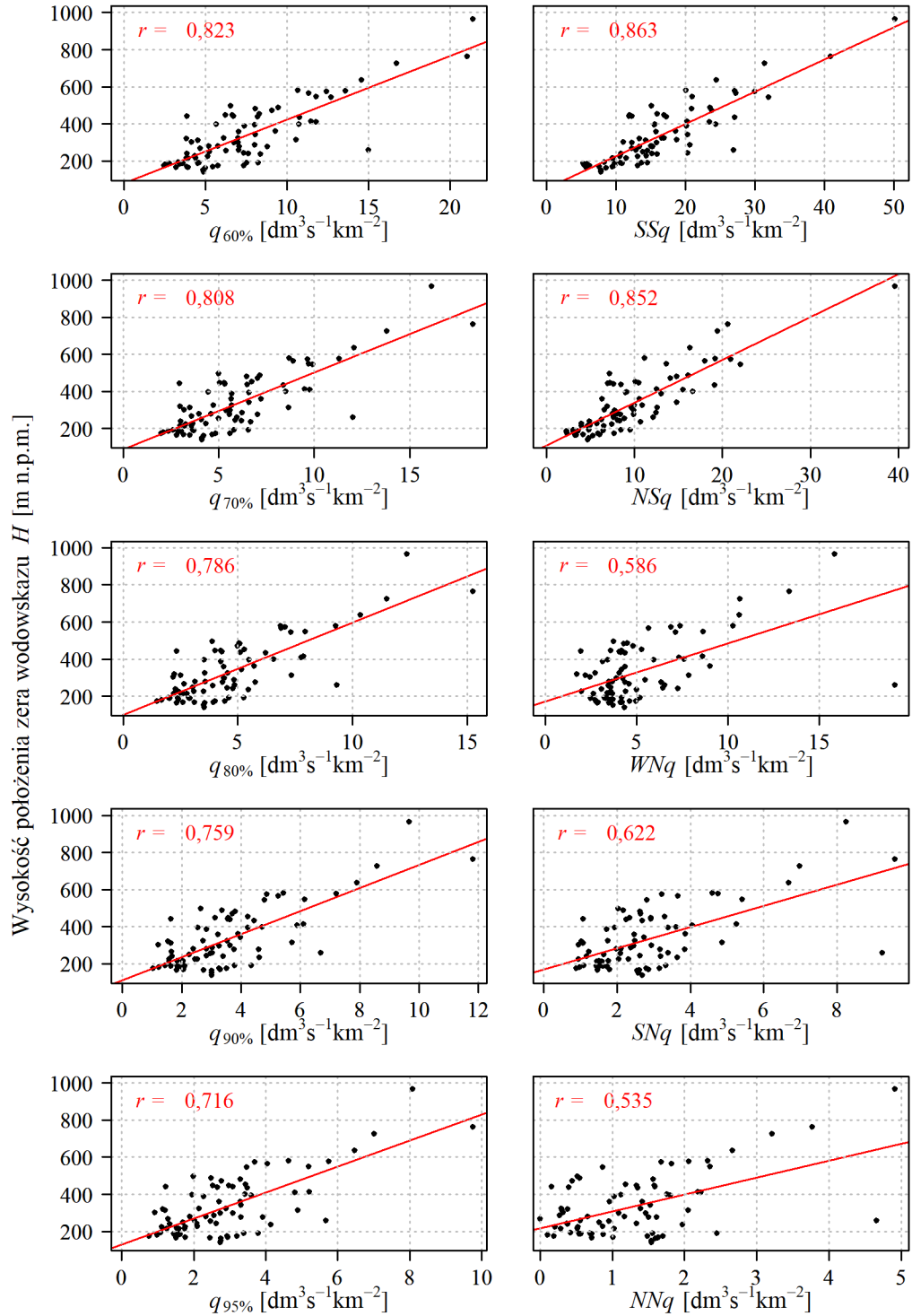
Rys. 2.9. Roczne hydrogramy średniego w 30-leciu względnego przepływu \bar{Q}_D / SSQ w przekrojach wodowskazowych (w skali logarytmicznej) w 4 regionach prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły. Liniami czerwonymi zaznaczono hydrogramy średnich przepływów w jednoimiennych dniach roku w całym regionie, a niebieską linią – hydrogram w przekroju Łysa Polana na Białce.

Fig. 2.9. Annual hydrographs of the 30-year mean relative flow \bar{Q}_D / SSQ in the gauging cross-sections (in the logarithmic scale) in 4 regions of the right-bank part of the Upper Vistula catchment. Red lines represent hydrographs of average flows on identical days of the year in the region, and the blue line - hydrograph in the Łysa Polana cross-section of the Białka river.

Przebieg tych przepływów w roku jest podobny w przekrojach wodowskazowych położonych w Beskidach, w Bieszczadach i na Podkarpaciu. Największe przepływy w tych regionach występują w marcu, najmniejsze zaś w sierpniu. Kształt hydrogramów w przekrojach znajdujących się na obszarze Tatr i Podhala jest zupełnie inny; największe przepływy pojawiają się na przełomie kwietnia i maja, a najmniejsze – w styczniu i lutym. Na tym tle odbiegająco inny przebieg przepływów w roku, a także największą amplitudę wahań między przepływem maksymalnym a minimalnym, zaobserwowano na najwyżej położonym przepływie Łysa Polana na Białce.

Jednostkowe przepływy charakterystyczne NSq , WNq i SNq , a także jednostkowe przepływy prawdopodobne $q_{p\%}$ (tj. trwające wraz z wyższymi przez $p\%$ czasu

obserwacji) są silnie dodatnio skorelowane z wysokością H położenia zera wodowskazu (tablica 2.3, rys. 2.10). Jednakże siła tych związków wyraźnie słabnie po usunięciu z danych 4 najwyższych położonych wodowskazów (Szaflary, Koniówka, Zakopane-Harenda i Łysa Polana, wszystkie w zlewni górnego Dunajca) (tablica 2.2).



Rys. 2.10. Zależności wybranych jednostkowych przepływów prawdopodobnych $q_{p\%}$ (lewy panel) oraz przepływów charakterystycznych q_{char} (prawy panel), i wysokości H położenia zera wodowskazu, w 78 przekrojach.

Fig. 2.10. Selected unit probable flows $q_{p\%}$ (left panel) and characteristic flows q_{char} (right panel) depending on the gauging station elevation H , in 78 cross-sections.

Tablica 2.3.

Współczynniki korelacji $corr()$ wybranych jednostkowych przepływów prawdopodobnych $q_{p\%}$ i charakterystycznych q_{char} z wysokością H położenia zera wodowskazu w dwóch przypadkach, we wszystkich 78 przekrojach wodowskazowych oraz w 74 (z pominięciem czterech najwyżej położonych wodowskazów). Asterysk * oznacza istotną korelację (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$).

Table 2.3.

Correlation coefficients $corr()$ of the selected unit flows of probable $q_{p\%}$ and characteristic q_{char} with the gauging station elevation H in two cases, in all 78 water gauge sections and in 74 (excluding four the highest placed gauges). Asterisk * means a significant correlation (at the significance level $\alpha = 0.05$).

$q_{p\%} [\text{dm}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}]$		$q_{60\%}$	$q_{70\%}$	$q_{80\%}$	$q_{90\%}$	$q_{95\%}$
$corr(H, q_{p\%})$	78 wodowskazów	0,823*	0,808*	0,779*	0,759*	0,716*
	74 wodowskazy (bez wodowskazów na Dunajcu: Szaflary, Koniówka, Zakopane-Harenda i Łysa Polana)	0,686*	0,669*	0,633*	0,578*	0,498*
$q_{char} [\text{dm}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}]$		SSq	NSq	WNq	SNq	NNq
$corr(H, q_{char})$	78 wodowskazów	0,863*	0,852*	0,586*	0,622*	0,535*
	74 wodowskazy (bez wodowskazów na Dunajcu: Szaflary, Koniówka, Zakopane-Harenda i Łysa Polana)	0,772*	0,773*	0,317*	0,337*	0,216

Z punktu widzenia tej pracy, ciekawy jest rozkład przestrzenny wspomnianych przepływów oraz dynamika ich zmian w roku. Rozkład przestrzenny przepływów przedstawiono (na przykładzie jednostkowych przepływów charakterystycznych, SSq i SNq , obliczonych w wieloleciu 1984-2013 we wszystkich przekrojach w , $w = 1, 2, \dots, n_{wod}$, a zmienność w roku – na podstawie średnich z wielolecia średnich i minimalnych miesięcznych przepływów jednostkowych SSq_m^w i SNq_m^w , $m = 1, 2, \dots, 12$:

$$SSq_m^w = \frac{1}{30} \sum_{r=1}^{30} Sq_{r,m}^w, m = 1, 2, \dots, 12 \quad (2.2)$$

$$Sq_{r,m}^w = \frac{1}{l_m} \sum_{t=1}^{l_m} q_{r,m,t}^w, r = 1, 2, \dots, 30, m = 1, 2, \dots, 30 \quad (2.3)$$

$$SNq_m^w = \frac{1}{30} \sum_{r=1}^{30} Nq_{r,m}^w, m = 1, 2, \dots, 12 \quad (2.4)$$

$$Nq_{r,m}^w = \min_{t=1, \dots, l_m} (q_{r,m,t}^w), r = 1, 2, \dots, 30, m = 1, 2, \dots, 12 \quad (2.5)$$

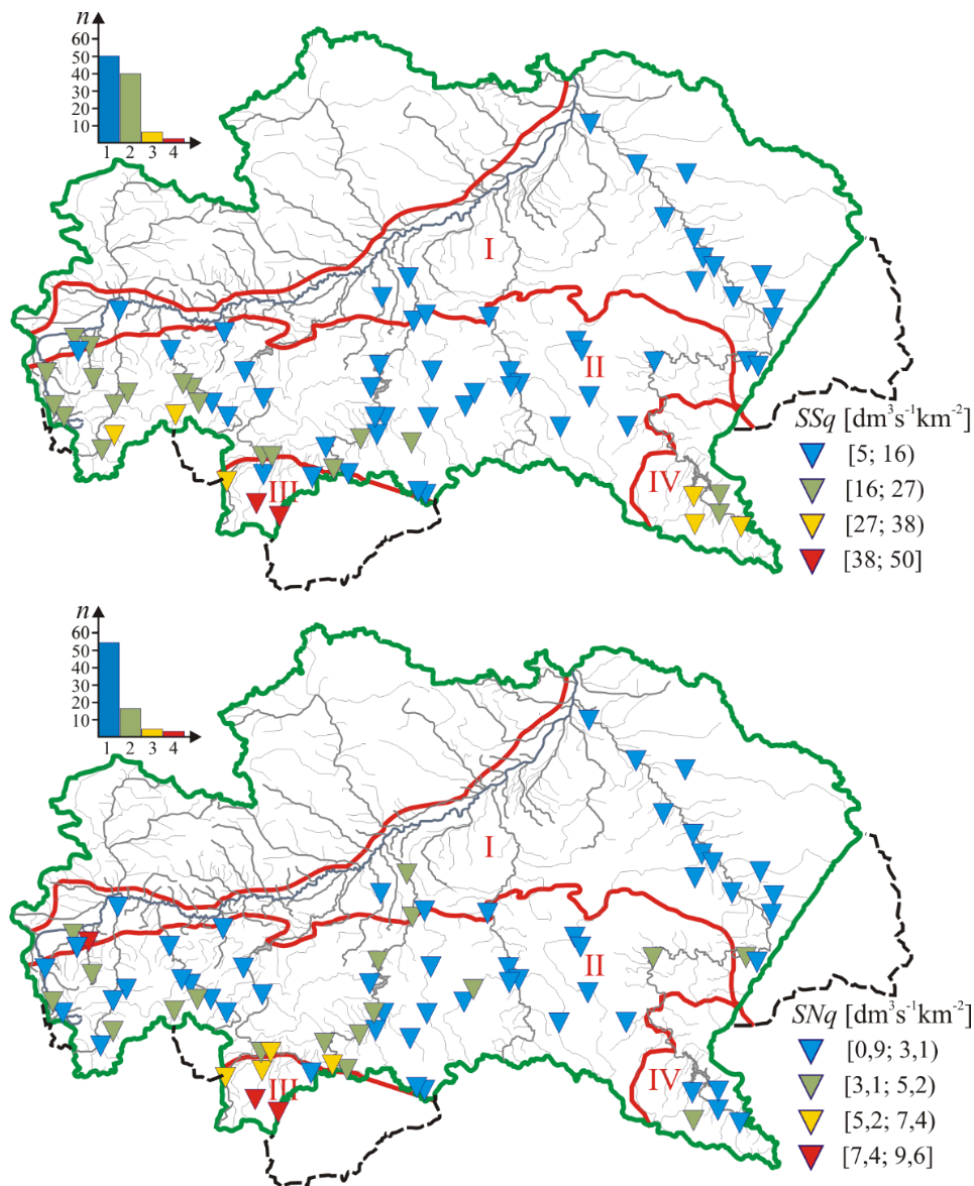
gdzie:

$q_{r,m,t}^w$ – jednostkowy przepływ w przekroju w w dniu t mies. m roku r [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$].

Średnie przepływy jednostkowe SSq wahają się na badanym obszarze od $5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ do $50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (rys. 2.11).

Zdefiniowane na rys. 2.11 cztery klasy zmienności SSq wykazują pewne grupowanie obszarowe. Klasa pierwsza, najliczniejsza (50 SSq na 78, tj. 62,5%), obejmująca SSq nie przekraczające czwartej części całego przedziału, tj. $16 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, obejmuje obszar środkowej i północnej części badanego obszaru. SSq klasy drugiej, niższe niż $27 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, występują głównie w południowo wschodniej części zlewni i w Bieszczadach. Najmniejsze wartości zaobserwowano w zlewni Sanu, gdzie 16 spośród 24 wodowskazów wykazuje wartości SSq poniżej $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (wszystkie w dolnej

części zlewni). SSq potoków płynących z Bieszczad przekracza $17 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (średnio wynosi $26 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). W Tatrach SSq przekracza $30 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; największe wartości SSq zaobserwowano w przekrojach najwyżej położonych: Zakopane Harenda – $40,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ i Łysa Polana – $50,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.



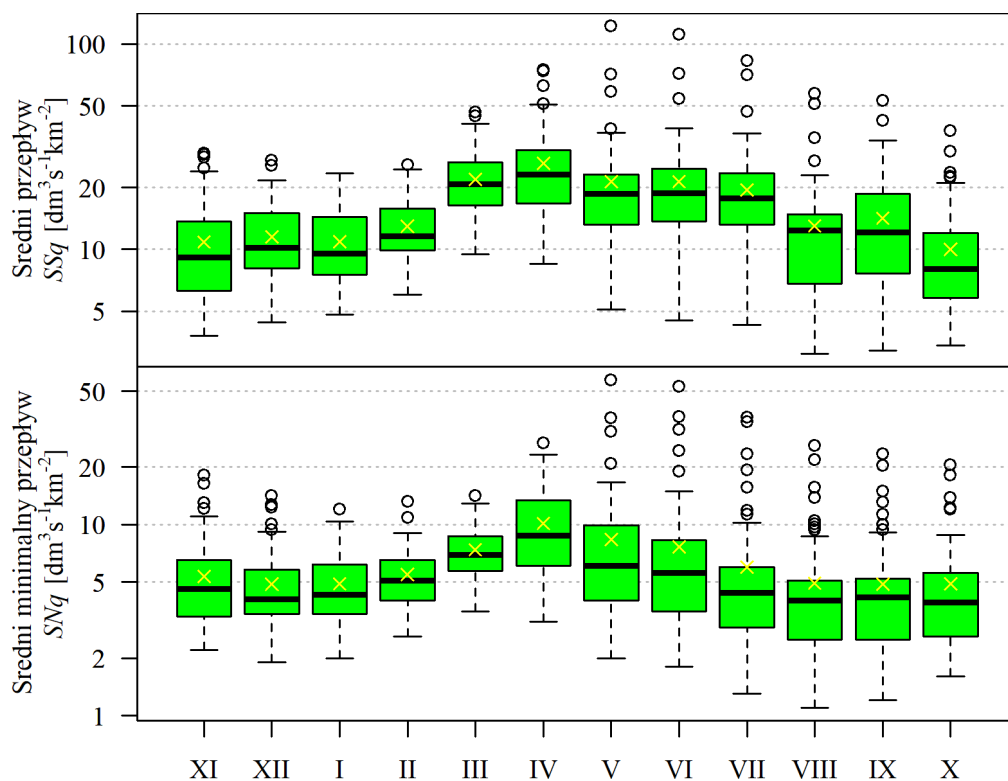
Rys. 2.11. Rozkład przepływów jednostkowych SSq i SNq w podziale na 4 kategorie na badanym obszarze na tle regionów fizyczno-geograficznych.

Fig. 2.11. Distribution of unit flows SSq and SNq divided into 4 categories in the studied area over physical and geographical regions.

Średni przepływ jednostkowy SNq na badanym obszarze nie przekracza $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (rys. 2.11). Podobnie jak w przypadku SSq , wyodrębniono cztery klasy zmienności SNq . Klasy pierwsza i druga, obejmujące przepływy niższe niż $5,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ występują w 71 z 78 wodowskazów na obszarze Podkarpacia, Beskidów i Bieszczad. Najliczniejsza jest klasa pierwsza (53 SNq z 78, tj. 67,9%) obejmująca SNq mniejsze niż $3,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Klasę trzecią zmienności SNq (pomiędzy $5,2$ a $7,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) zaobserwowano na Podhalu, Najwyższe wartości SNq (klasy

czwartej, powyżej $7,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), występują na najwyżej położonych wodowskazach, w Tatrach (Zakopane Harenda i Łysa Polana) oraz na wodowskazie Czechowice Bestwina, powyżej którego do Białej zrzucane są oczyszczone ścieki z oczyszczalni. Najmniejsze wartości SNq występują w zlewni Wisłoki (średnio $1,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) i Wisłoka (średnio $1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). W niektórych przekrojach wodowskazowych w tych zlewniach (Gorliczyna i Nowosielce w zlewni Wisłoka i Żółków na Wisłocy) wartości SNq nie przekraczają $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Średnie przepływy jednostkowe, zarówno SNq , jak i SSq , rosną wraz ze wzrostem wzniesienia H nad poziom morza, SNq średnio o $0,68$, a SSq – o $4,3 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ na każde 100 m wysokości (rys. 2.10), zatem przepływy te są większe w wyżej położonej południowej i południowo-zachodniej jego części, niż w północno-wschodniej (rys. 2.11).

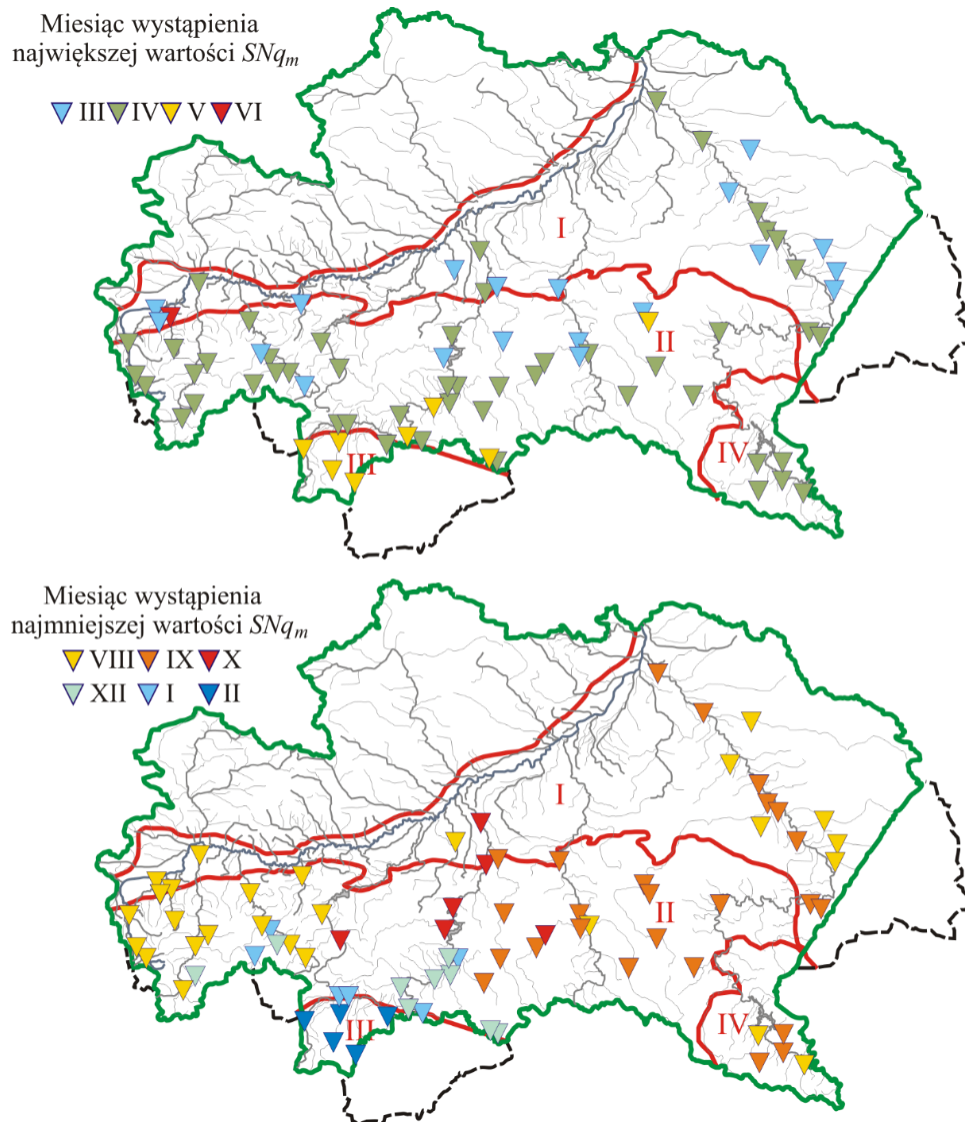
Najczęściej największy przepływ SSq_m w poszczególnych przekrojach wodowskazowych na badanym obszarze występuje w kwietniu, a najmniejszy – w październiku (rys. 2.12).



Rys. 2.12. Rozkłady średnich z wielolecia 1984-2013 miesięcznych średnich SSq i minimalnych SNq przepływów jednostkowych SSq_m i SNq_m , w 78 przekrojach wodowskazowych.

Fig. 2.12. Distributions of the average for the period 1984-2013 of monthly average SSq and monthly minimum SNq unit flows SSq_m and SNq_m , in 78 gauging cross-sections.

Największy przepływ SNq_m w poszczególnych przekrojach wodowskazowych na większości badanego obszaru (na obszarze Podkarpacia, Beskidów i Bieszczad) występuje w miesiącach wiosennych, najczęściej w kwietniu, a najmniejszy – późnym latem i jesienią (rys. 2.12 i rys. 2.13). W Tatrach i na Podhalu największe i najmniejsze wartości SNq_m w roku występują później niż na pozostałym obszarze, największy przepływ SNq_m obserwuje się w maju, a najmniejszy zaś – w lutym.



Rys. 2.13. Rozkład w zlewni Górnej Wisły miesięcy, w jakich wystąpił najmniejszy, a w jakich największy przepływ SNq_m z lat 1984-2013, na tle regionów fizyczno-geograficznych.
 Fig. 2.13. Distribution in the Upper Vistula catchment, of months in which the lowest and highest SNq_m flow occurred from 1984-2013, within the physical and geographical regions.

2.6. Zbiorniki retencyjne i antropopresja w zlewni Górnej Wisły

Wody powierzchniowe są jednym z najbardziej narażonych na antropopresję elementów środowiska. Naturalny reżim przepływu rzeki jest najbardziej zniekształcony przez zbiorniki retencyjne, przerzuty wody między zlewniami, ujęcia wody i zrzuty wód obcych, w tym kopalnianych (Bartnik 2005, Tomaszewski 2014, Jokić 2015).

W prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły znajduje się 16 zbiorników retencyjnych o pojemności powyżej 1 mln m³, których podstawowe dane zebrano w tablicy 2.4, a lokalizację przedstawiono na rys. 2.14).

Jako pierwszy z tych zbiorników wybudowany został zbiornik na Wapienicy oddany do użytku w 1932 roku, a ostatnimi oddanymi do eksploatacji zbiornikami są Czorsztyn-Niedzica na Dunajcu (w 1997 r.) i Świnna Poręba na Skawie (w 2017 r.).

Tablica 2.4.

Zbiorniki retencyjne zlokalizowane w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły
(na podstawie: Henning 1991, GUS 2017, Jokiel i in. 2017).

Table 2.4.

Retention reservoirs located in the right-bank part of the Upper Vistula catchment
(on the basis of: Henning 1991, GUS 2017, Jokiel i in. 2017).

Zbiornik	Rzeka	Kilometraż [km]	Całkowita pojemność zbiornika [mln m ³]	Maksymalna powierzchnia zalewu [km ²]	Rok oddania do eksploatacji
Wisła Czarne	Wisła	96,9	5,1	0,4	1974
Goczalkowice	Wisła	42,8	161,3	32	1956
Wapienica	Wapienica	17,4	1,1	0,2	1932
Tresna	Soła	40,0	96,1	9,6	1967
Porąbka	Soła	32,3	27,2	3,3	1936
Czaniec	Soła	28,8	1,3	0,5	1967
Świnna Poręba	Skawa	26,6	161,0	10,3	2017
Dobczyce	Raba	60,1	141,7	10,1	1986
Czorsztyn-Niedzica	Dunajec	173,3	231,9	12,3	1997
Sromowce Wyżne	Dunajec	171,4	7,5	0,9	1994
Rożnów	Dunajec	80,7	159,3	16,0	1942
Czechów	Dunajec	66,9	12,0	3,5	1949
Klimkówka	Ropa	54,4	42,6	3,1	1994
Besko	Wisłok	172,8	13,7	1,3	1978
Solina	San	325,2	472,4	22,0	1968
Myczkowce	San	318,9	10,6	2,0	1961

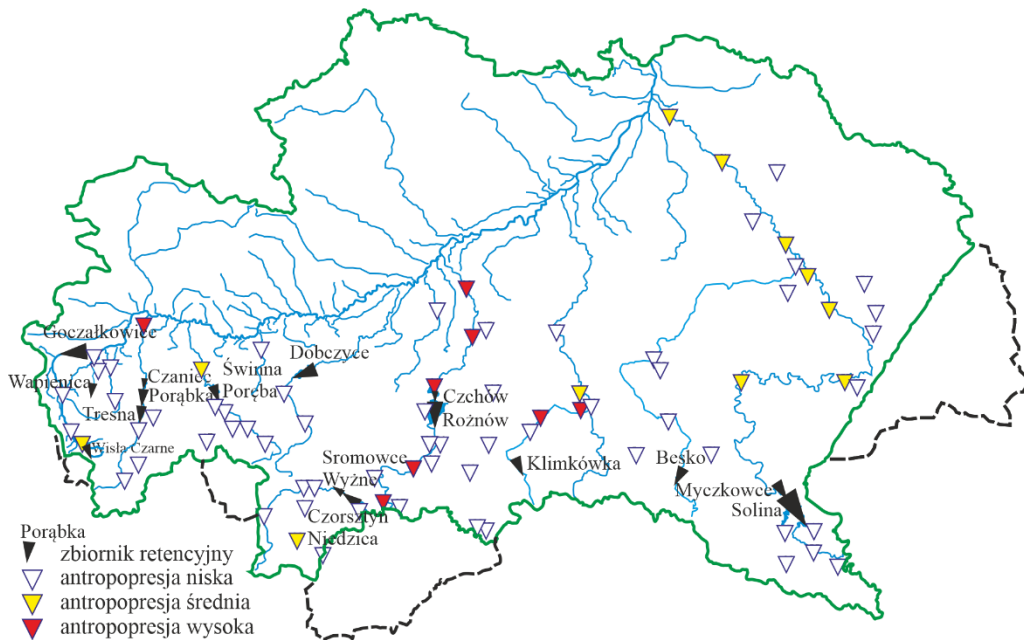
Zbiorniki w zlewni Górnej Wisły są wielozadaniowe: retencjonują wodę wykorzystywaną następnie do zaopatrzenia ludności i przemysłu, do nawodnień i hodowli ryb, a także służą ochronie przeciwpowodziowej terenów leżących poniżej zbiornika. Niektóre z nich wykorzystywane są dla celów energetycznych.

W rozpatrywanym w pracy wieloleciu hydrologicznym 1984-2013 oddano do użytku cztery zbiorniki retencyjne: w 1986 roku – Dobczyce na Rabie, w 1994 roku – 2 zbiorniki, Sromowce Wyżne na Dunajcu i Klimkówka na Ropie, a w 1997 roku Czorsztyn-Niedzica. Dostępne przepływy z badanego okresu obejmują przekrój Kłęczany na Ropie (poniżej zbiornika), Stróżę na Rabie (powyżej zbiornika) a także przekroje na Dunajcu Nowy Targ Kowaniec (powyżej zbiorników) i Krościenko (poniżej zbiorników).

Reżim hydrologiczny w rzece poniżej zbiorników retencyjnych ulega zmianie na skutek podniesienia przepływów minimalnych i obniżenia przepływów maksymalnych w stosunku do warunków naturalnych, jakie panowały w cieku przed uruchomieniem zbiornika (Dynowska 1984, Wiejaczka 2011). Fakt ten potwierdzili Chełmicki i Bieńkowski (2004-2005), którzy zauważyli, że zespół zbiorników Czorsztyn-Niedzica i Sromowce Wyżne istotnie zmniejszył sumę niedoborów niżówkowych, zarówno w półroczu letnim, jak i zimowym.

Interesującym zagadnieniem jest ocena zasięgu wpływu zbiornika retencyjnego na przepływ wzdłuż biegu rzeki. Dynowska (1984) stwierdziła, że zbiornik Solina na Sanie wywiera zauważalny wpływ na podniesienie przepływów niskich (podniesienie przepływów minimalnych wyniosło około 30% w stosunku do przepływów sprzed budowy zbiornika) do wodowskazu w Lesku, który zlokalizowany jest około 15 km od zapory. Z biegiem rzeki wpływ ten maleje, a w rejonie Przemyśla (około 130 km dalej), zupełnie zanika.

Na obszarze zlewni Górnej Wisły będącym w gestii RZGW Kraków, czyli na obszarze obejmującym większość prawobrzeżnego obszaru zlewni Górnej Wisły, oceniono antropopresję w poszczególnych przekrojach wodowskazowych (Rozporządzenie RZGW 4/2014). Wydzielono zlewnie o antropopresji wysokiej W, czyli zlewnie pod silnym oddziaływaniem zbiorników zaporowych i stopni wodnych, średniej S – będące pod wpływem zabudowy hydrotechnicznej oraz użytkowania wód oraz niskiej N – zlewnie o reżimie naturalnym lub quasi naturalnym. Wyniki tej oceny przedstawiono na rys. 2.14.

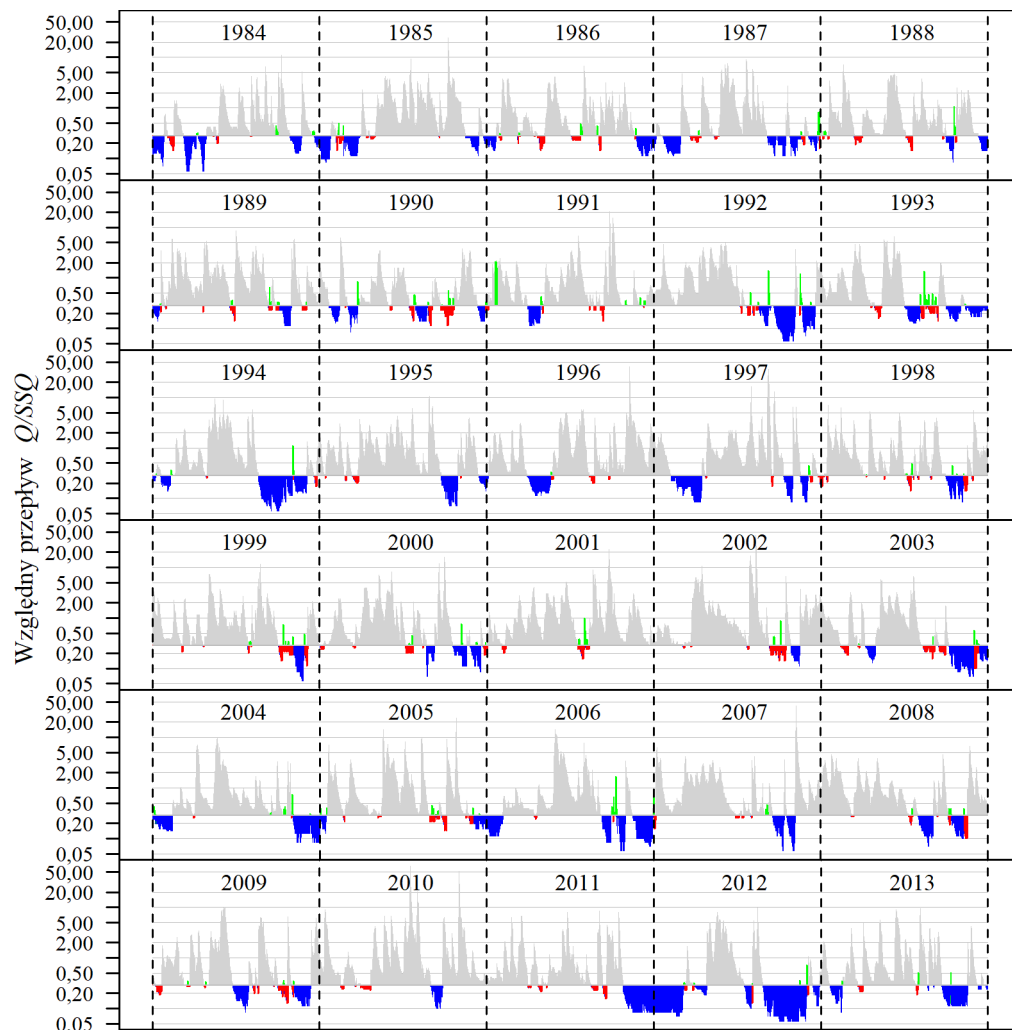


Rys. 2.14. Zbiorniki retencyjne wraz z oceną antropopresji w przekrojach wodowskazowych na prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły (na podstawie Rozporządzenia RZGW 4/2014).
 Fig. 2.14. Retention reservoirs with anthropopressure assessment in gauging cross-sections on the right-bank part of the Upper Vistula catchment (on the basis of: Rozporządzenie RZGW 4/2014).

3. NIŻÓWKI W BADANEJ CZĘŚCI ZLEWNI GÓRNEJ WISŁY

3.1. Wstęp

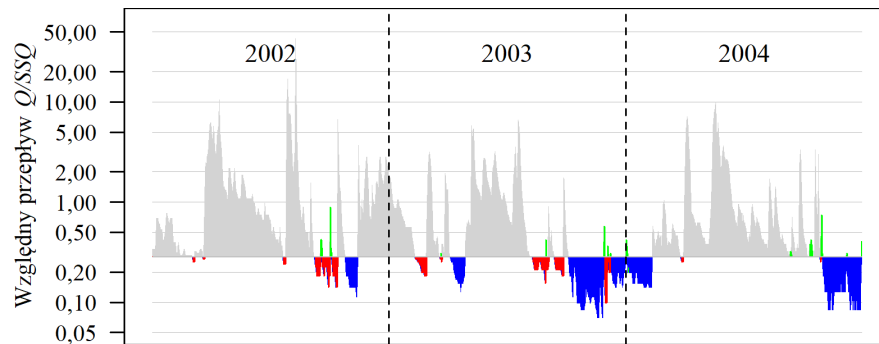
Pojęcie *niżówka* stosowane w literaturze przedmiotu jest pojęciem obciążonym znaczną dowolnością definicyjną. Niezależnie bowiem od przyjęcia arbitralnej (stałej lub zmiennej) wartości przepływu granicznego Q_g – pierwszego i zawsze stosowanego kryterium – badacze zwykle dokładają następne arbitralne warunki (por. rozdz. 1.3.2). Nie ulega wątpliwości, że taka mnogość propozycji dotyczących definicji niżówki komplikuje kontekst ewentualnego wnioskowania i utrudnia porównywanie niżówek. Rys. 3.1 ilustruje niektóre z tych trudności.



Rys. 3.1. Przykładowy ciąg niżówek POT-70% (Kocierzanka na Łękawicy) w okresie 30 lat hydrologicznych. Przyjęcie $Q_g = Q_{70\%}$ generuje niżówki zaznaczone kolorami niebieskim i czerwonym rozdzielone okresami z $Q_t \geq Q_{70\%}$ zaznaczonymi kolorami szarym i zielonym. Nałożenie na niżówkę warunku $V < 0,05V_{max}$ (V_{max} = największa objętość niżówki w 30-leciu) wyklucza niżówki zaznaczone na czerwono. Spełnienie warunku $\tau \leq 5$ dób (kolor zielony) łączący sąsiednie niżówki.

Fig. 3.1. An exemplary series of hydrological droughts POT-70% (Kocierzanka cross-section of the Łękawica river) in the period of 30 hydrological years. Assuming $Q_g = Q_{70\%}$ generates droughts marked in blue and red, separated by periods with $Q_t \geq Q_{70\%}$ marked in gray and green. Applying the condition $V < 0.05V_{max}$ to drought (V_{max} = the highest volume of the drought in 30 years) excludes droughts marked in red. The fulfillment of the condition $\tau \leq 5$ days (green) connecting the adjacent droughts.

Uwagę zwraca, między innymi, okres drugiej połowy roku 2002 i okres przełomu lat 2003 i 2004 (powiększone na rys. 3.2). Jeśli najpierw zostaną usunięte trzy niżówki z $V < 0,05V_{max}$ w roku 2002 (przedzielone "zielonymi" okresami), to wynikowa sytuacja będzie inna niż gdy najpierw zastosowane zostanie kryterium łączenia bliskich niżówek, bo wtedy owe trzy niżówki z $V < 0,05V_{max}$ zostaną połączone w jedną i dla niej $V < 0,05V_{max}$ może nie obowiązywać.



Rys. 3.2. Ciąg niżówek POT-70% w Kocierzance na Łękawicy, w latach hydrologicznych 2002-2004. Powiększony fragment rys. 3.1.

Fig. 3.2. Series of droughts POT-70% at Kocierzanka on Łękawica river, in hydrological years 2002-2004. Enlarged fragment of fig. 3.1 .

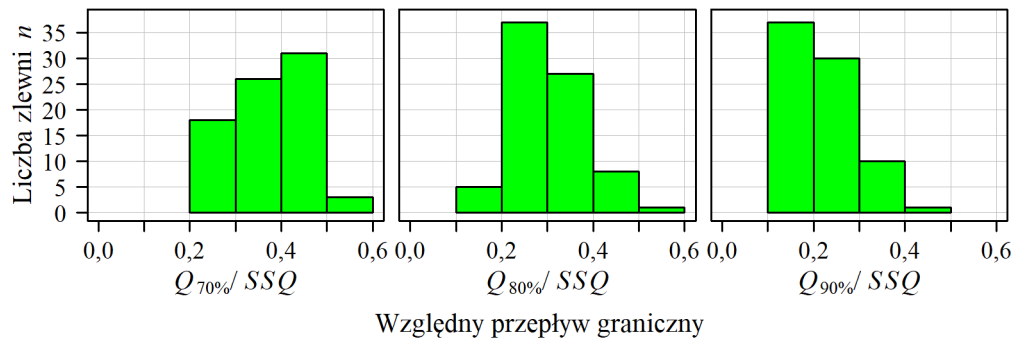
Przełom lat 2003 i 2004 ilustruje bardziej wyrazistą sytuację. Uwzględnienie najpierw kryterium $V < 0,05V_{max}$ a potem kryterium łączenia daje dwie duże niżówki, kolejność odwrotna przynosi w jedną bardzo dużą niżówkę.

W rozdziale niniejszym niżówka jest definiowana w najprostszy możliwy sposób. Polega on na przyjęciu jedynie jednej z trzech arbitralnych wartości Q_g ($Q_{70\%}$, $Q_{80\%}$ i $Q_{90\%}$) i zastosowanie jej do danego szeregu czasowego przepływów z wielolecia wyznaczając w rezultacie najbardziej pierwotną postać niżówki, niżówkę rozumianą jako nieprzerwany okres czasu w przepływie poniżej Q_g (metoda POT) lub okres czasu trwający od momentu przejścia przepływu poniżej Q_g do momentu, gdy suma przepływów powyżej Q_g zrówna się z taką sumą niedoborów przepływu (metoda SPA). Obie definicje różnią się jedynie kryterium końca niżówki. Taka najbardziej prymitywna i podstawowa forma niżówki będzie niekiedy w pracy - gdy potrzebne będzie takie rozróżnienie - nazywana niżówką surową. W niniejszym rozdziale ten określnik nie jest konieczny ponieważ tylko ta forma niżówki będzie omawiana.

Analiza ciągów takich niżówek – szczególnie niżówek POT surowych – wydaje się interesująca z poznawczego punktu widzenia; może też mieć znaczenie użytkowe choćby w definiowaniu niżówki za pomocą dodatkowych kryteriów. Według najlepszej wiedzy, brak jest prac na ten temat.

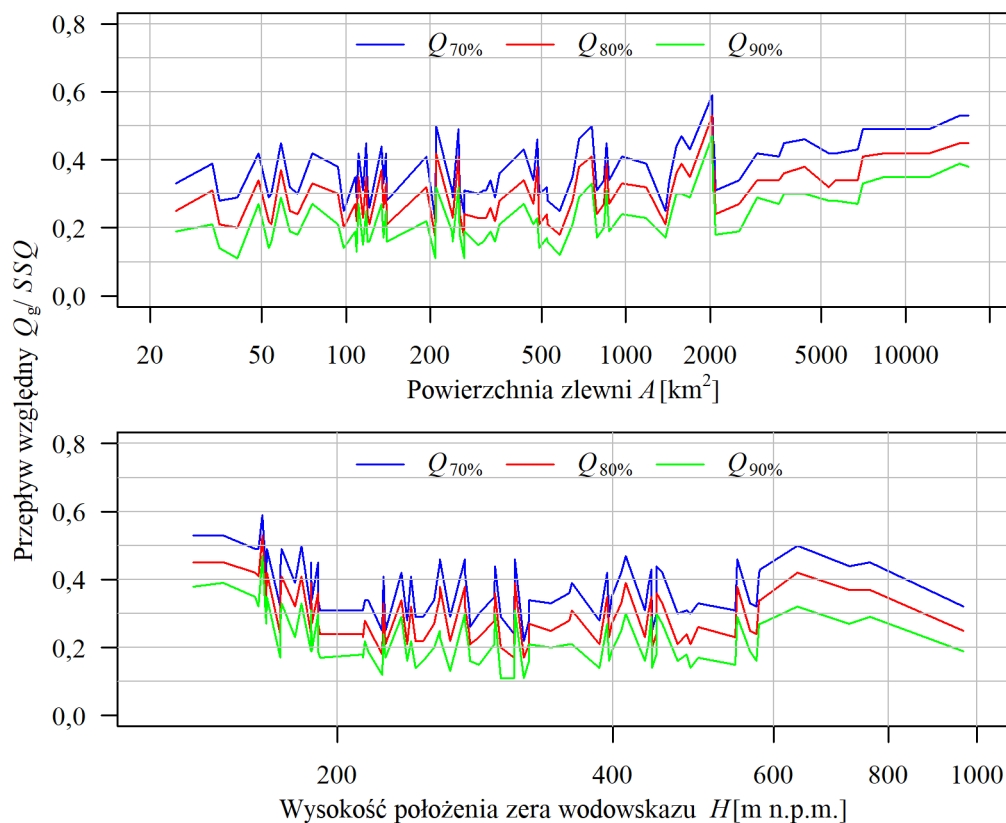
3.2. Przepływ graniczny i wyjściowe ciągi niżówek

Przyjęte trzy wartości przepływu granicznego Q_g : $Q_{70\%}$, $Q_{80\%}$ i $Q_{90\%}$, odczytane zostały z 30-letnich krzywych czasu przewyższenia. Największe względne wartości tych przepływów, Q_g/SSQ , zaobserwowano w przekroju Harasiuki na Tanwie ($Q_{70\%}/SSQ = 0,59$, $Q_{80\%}/SSQ = 0,53$ i $Q_{90\%}/SSQ = 0,47$). Względny przepływ graniczny $Q_{90\%}/SSQ$ jest w około połowie przypadków (37 na 78 przekrojów wodowskazowych) mniejszy niż 0,2; większość przepływów $Q_{70\%}/SSQ$ (44 na 78) jest mniejsza niż 0,4, a przepływ $Q_{80\%}/SSQ$ w 66 przekrojach wodowskazowych mieści się w zakresie 0,2-0,4 (rys. 3.3).

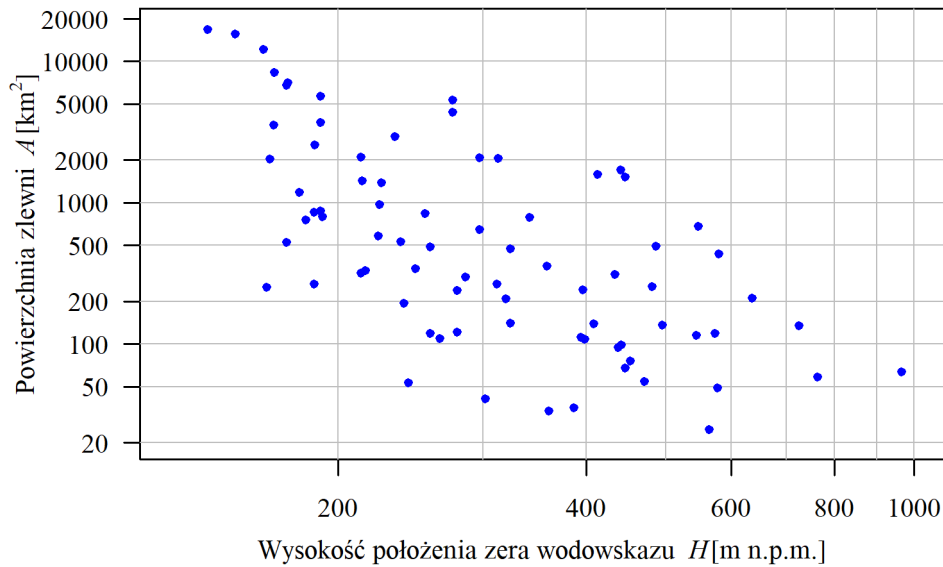


Rys. 3.3. Rozkład względnych przepływów granicznych Q_g/SSQ w 78 przekrojach wodowskazowych.
Fig. 3.3. Distribution of the relative threshold flows Q_g/SSQ in 78 gauging cross-sections.

Uporządkowanie wartości Q_g/SSQ według powierzchni zlewni lub wysokości wodowskazu (rys. 3.4) wprowadza pewną regularność. W pierwszym przypadku oszacowanie przebiegów "na oko" wykazuje lekki trend rosnący; w drugim – Q_g/SSQ dla najniższych i najwyższych wysokości maleją; pomiędzy tymi wysokościami nie wykazują tendencji rosnącej czy malejącej. Fakt ten częściowo tłumaczy związek pomiędzy H a A pokazany na rys. 3.5.



Rys. 3.4. Względne przepływy graniczne Q_g/SSQ uporządkowane według rosnącej powierzchni zlewni A do przekroju wodowskazowego oraz według rosnącej wysokości H wodowskazu.
Fig. 3.4. Relative threshold flows Q_g/SSQ ordered according to the growing area of the catchment A to the gauging cross-section and according to the increasing gauging station elevation H .



Rys. 3.5. Zależność pola A powierzchni zlewni od wysokości H położenia zera wodowskazu dla 78 wodowskazów położonych w badanej części zlewni Górnej Wisły.

Fig. 3.5. Relationship between the area A of the catchment and gauging station elevation H for 78 gauging cross-sections located in the studied part of the Upper Vistula catchment.

Każdy z trzech przepływów granicznych, stałych w wieloleciu 1984-2013, posłużył do wyznaczenia ciągu niżówek POT i SPA poprzez określenie dla każdej z nich czasu początku t_p i końca t_k , co pozwoliło wyznaczyć dalej czas trwania T oraz objętość V , wyrażoną w wielokrotności SSQ według wzoru (1-7) dla POT i (1-11) dla SPA. Taki sposób wyrażania objętości pokazuje przez ile dób w danym przekroju wodowskazowym objętość niżówki może zostać wypełniona przepływem średnim z wielolecia (SSQ) i pozwala na lepsze porównywanie objętości niżówek w różnych przekrojach wodowskazowych.

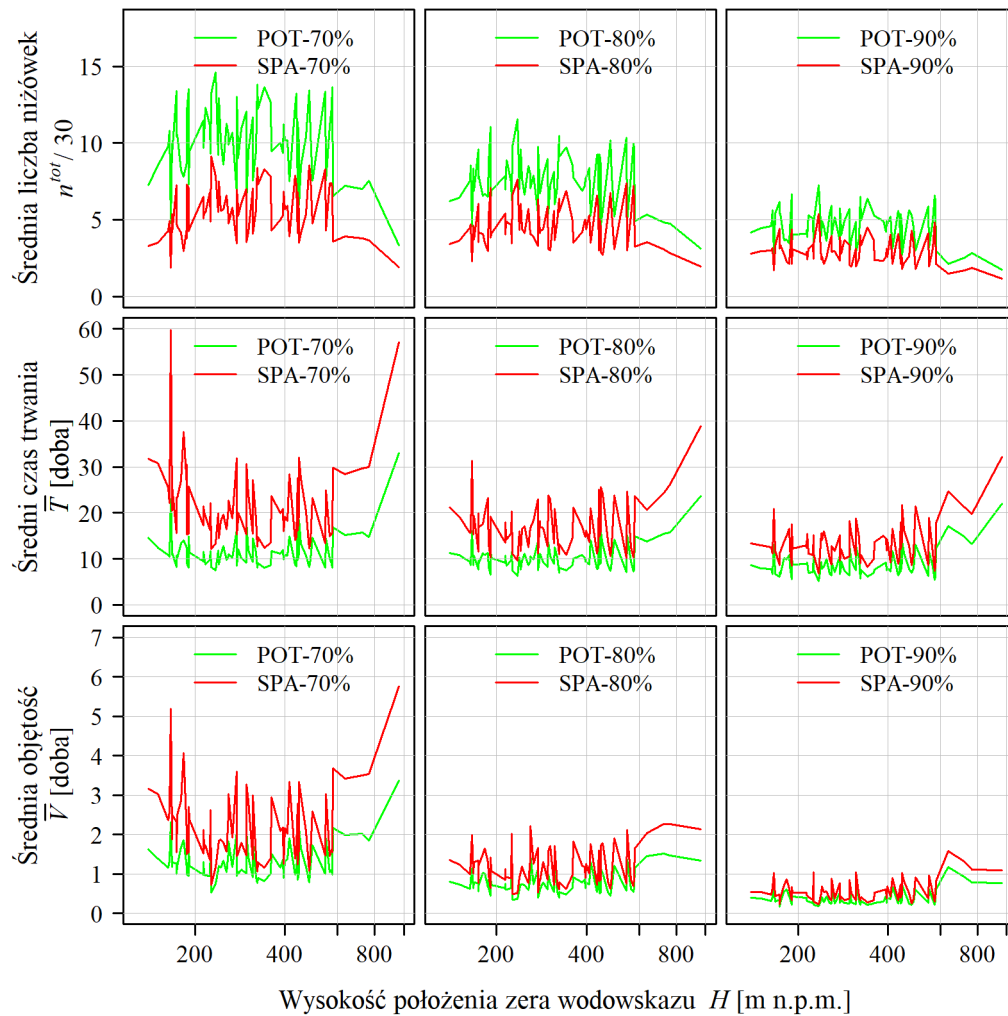
Uzyskane w ten sposób ciągi danych $\{t_{p,i}, t_{k,i}, T_i, V_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n^{w,tot}$, $w = 1, 2, \dots, n_{wod}$, są podstawą wszystkich dalszych analiz.

W dalszej części pracy niżówki oznaczane będą skrótem nazwy metody jej wyznaczenia i prawdopodobieństwem przewyższenia przepływu granicznego – np. zapis POT-80% oznaczać będzie niżówkę zdefiniowaną metodą POT przy założonym przepływie granicznym $Q_g = Q_{80\%}$.

Ogólna charakterystyka niżówek na badanym obszarze

Rys. 3.6 ilustruje zbiorczo dla wszystkich 78 wodowskazów i wielolecia hydrologicznego 1984-2013 pewne charakterystyki niżówek uporządkowane według wysokości wodowskazu nad poziom morza: średnią liczbę niżówek POT i SPA w 30-leciu, $n^{tot}/30$, średni czas \bar{T} trwania niżówki oraz średnią objętość \bar{V} niżówki.

Wszystkie charakterystyki układają się coraz niżej wraz ze zmniejszaniem się Q_g , co jest efektem oczekiwanym. Podobna zmienność przebiegu charakterystyk liczonych metodami POT i SPA sugeruje skorelowanie tych charakterystyk na badanym obszarze. Ponadto, odpowiadające sobie przebiegi charakterystyk POT i SPA są przesunięte względem siebie w konsekwentny sposób: średnia liczba niżówek POT w 30-leciu, $n^{tot}/30$, jest we wszystkich wodowskazach wyższa od odpowiadającej liczby niżówek SPA. Pozostałe dwie charakterystyki wykazują konsekwentną "przewagę" liczbą SPA.



Rys. 3.6. Zmienność trzech charakterystyk niżówek POT i SPA z wysokością H wodowskazu, w okresie 1984-2013, dla trzech wartości Q_g , w 78 przekrojach.

Fig. 3.6. Variability of three characteristics of POT and SPA droughts along with the gauging station elevation H , in the period 1984-2013, for three Q_g values, in 78 cross-sections.

3.3. Lata z niżówkami i bez niżówek. Niżówki na przelomie lat

Niekoniecznie każdy rok spośród trzydziestu w wieloleciu 1984-2013 w dowolnym z 78 przekrojów wodowskazowych zawiera co najmniej jedną niżówkę. Fakt ten oznacza, że oprócz lat 'niżówkowych' występują także lata 'beźniżówkowe'.

Liczba n_R^w lat niżówkowych w przekroju w wynosi

$$n_R^w = \#R^w, \quad w = 1, 2, \dots, n_{wod}, \quad n_R^w \leq 30 \quad (3.1)$$

gdzie:

n_{wod} – liczba przekrojów wodowskazowych w ,

R^w – zbiór numerów porządkowych lat niżówkowych w latach 1984-2013:

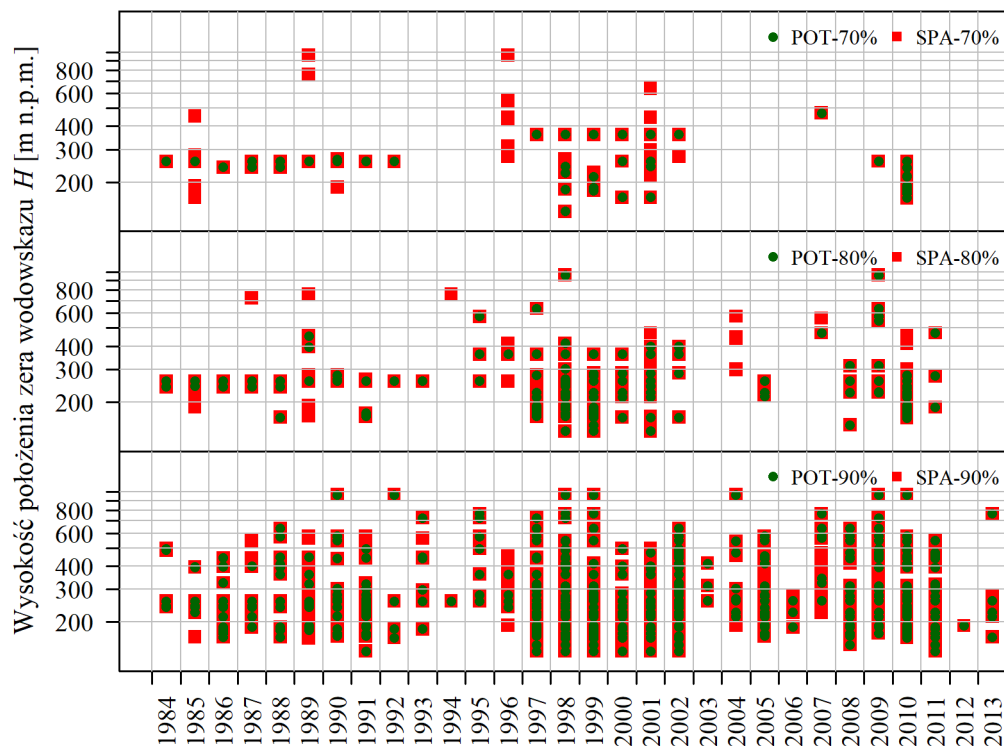
$$R^w = \bigcup_{r=1}^{30} (r : n_r^w > 0), \quad w = 1, 2, \dots, n_{wod} \quad (3.2)$$

Jeśli, na przykład, w przekroju w lata 1984 i 1986 były beźniżówkowe, to zbiór R^w zawiera 28 numerów: $R^w = \{2, 4, 5, \dots, 30\}$.

Zbiór $\{R^w\} = \{R^1, R^2, \dots, R^{n_{wod}}\}$ zawiera informację o synchroniczności lat (bez)

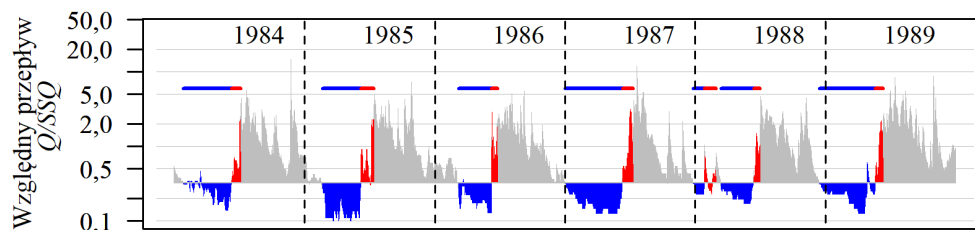
niżówkowych POT i SPA na całym badanym obszarze. Zbiór ten, uporządkowany według rosnącej wysokości położenia wodowskazu nad poziomem morza dla kolejnych przepływów granicznych, jest zilustrowany na rys. 3.7. Widać wyraźny wzrost liczby lat bez niżówki wraz z obniżaniem przepływu granicznego oraz niemal identyczny rozkład lat (bez)niżówkowych POT i SPA.

Rok beźniżówkowy (rys. 3.7), to rok niezawierający ani jednego początku niżówki. Dobrym tego przykładem jest rok 1989 na rys. 3.8, rok bez niżówki, chociaż większość ostatniej niżówki z poprzedniego, 1988, roku należy do roku 1989. Taka niżówka, niżówka 'przejściowa', jest przypisywana niekoniecznie do roku z jej początkiem, a zwykle – co jest bardziej naturalne – do roku z jej środkiem. W tej konwencji rok 1989 nie jest rokiem beźniżówkowym.



Rys. 3.7. Lata bez niżówek POT i SPA w wieloletniu 1984-2013 dla wszystkich przekrojów wodowskazowych uporządkowanych według rosnącej wysokości położenia wodowskazu nad poziomem morza.

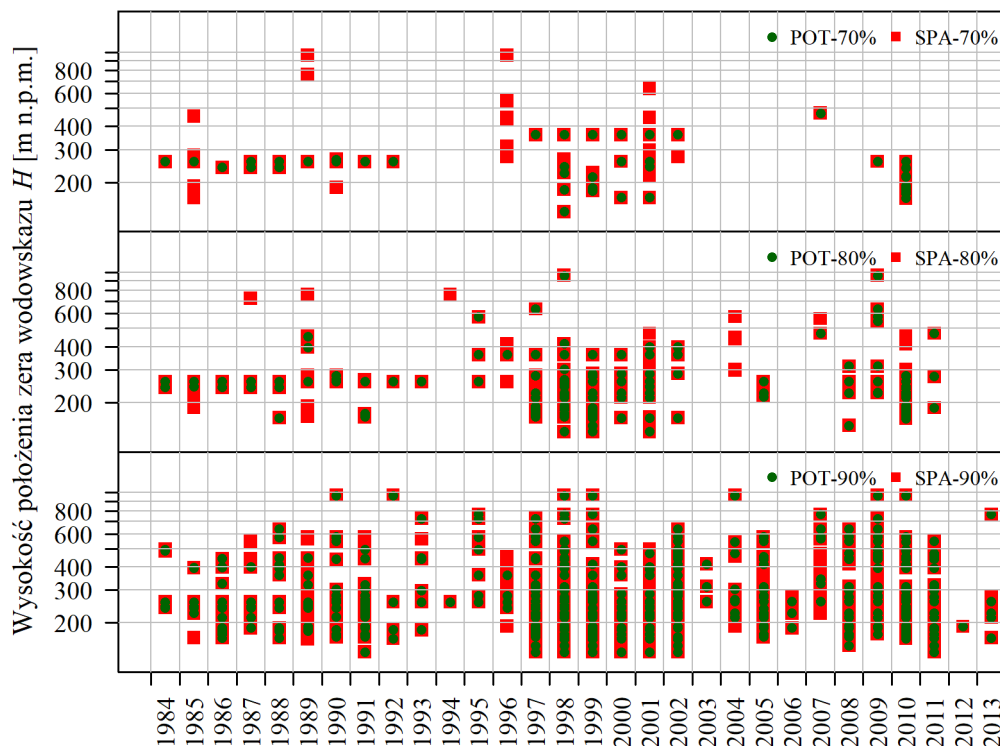
Fig. 3.7. Years without POT and SPA droughts in the multi-year period 1984-2013 for all gauging cross-sections arranged according to the increasing height of the gauging station above sea level.



Rys. 3.8. Niżówki SPA-70% w okresie 1984-1989, w przekroju Łysa Polana na Białce. Czas trwania niżówki jest równy długości niebieskiej linii, moment końca czerwonej linii oznacza moment osiągnięcia wypełnienia objętości niżówki przez przepływy ponad Q_g .

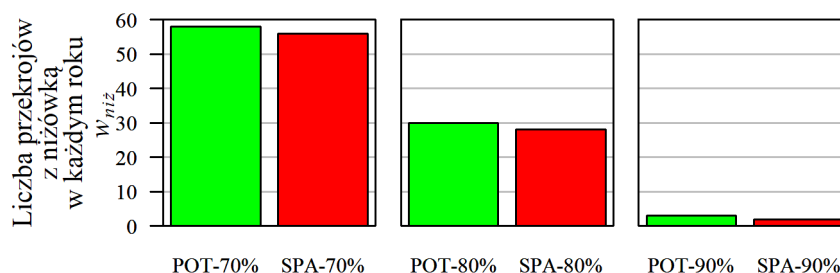
Fig. 3.8. SPA-70% droughts in the period 1984-1989, at the Łysa Polana cross-section of the Białka river. Drought duration is equal to the length of the blue line, the moment of the end of the red line marks the moment when the drought volume is filled by flows exceeding Q_g .

Zastosowanie powyższej konwencji do wszystkich niżówek tworzy inny od pokazanego na rys. 3.7 obraz lat beźniżówkowych i jest pokazany na rys. 3.9.



Rys. 3.9. Lata bez niżówek POT i SPA w wieloleciu 1984-2013 dla wszystkich przekrojów wodowskazowych. Niżówki "przejściowe" są teraz przypisane do roku zawierającego ich środek.
Fig. 3.9. Years without POT and SPA droughts in the multi-year period 1984-2013 for all gauging cross-sections. "Transitional" droughts are now assigned to the year containing their center.

Najwięcej lat z niżówkami występuje przy najwyższym przepływie granicznym $Q_g = Q_{70\%}$ (rys. 3.8). Przy przepływie tym, w 58 przekrojach wodowskazowych (dla niżówek POT) i 56 przekrojach (dla niżówek SPA) zaobserwowano co najmniej jeden dzień niżówkowy w każdym roku wielolecia 1984-2013 (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Liczba przekrojów, w których wszystkie lata badanego 30-letniego okresu są niżówkowe.
Fig. 3.10. Number of cross-sections with drought occurring in all years of the analyzed 30-year period.

Średnia liczba \bar{n}_R lat niżówkowych waha się od około 29 (POT-70%, SPA-70%), poprzez około 28 (POT-80%, SPA-80%), do 24,0 (POT-90%) i 23,3 (SPA-90%) (tablica 3.1, rys. 3.11).

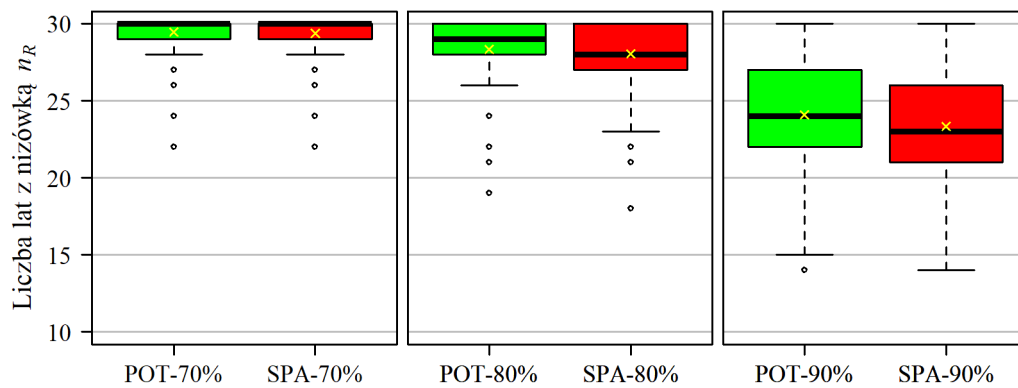
Tablica 3.1

Średnia liczba \bar{n}_R lat z niżówkami POT i SPA, dla trzech Q_g , w 78 przekrojach.

Table 3.1

Average number \bar{n}_R of years with the POT and SPA droughts, for three Q_g , in 78 cross-sections.

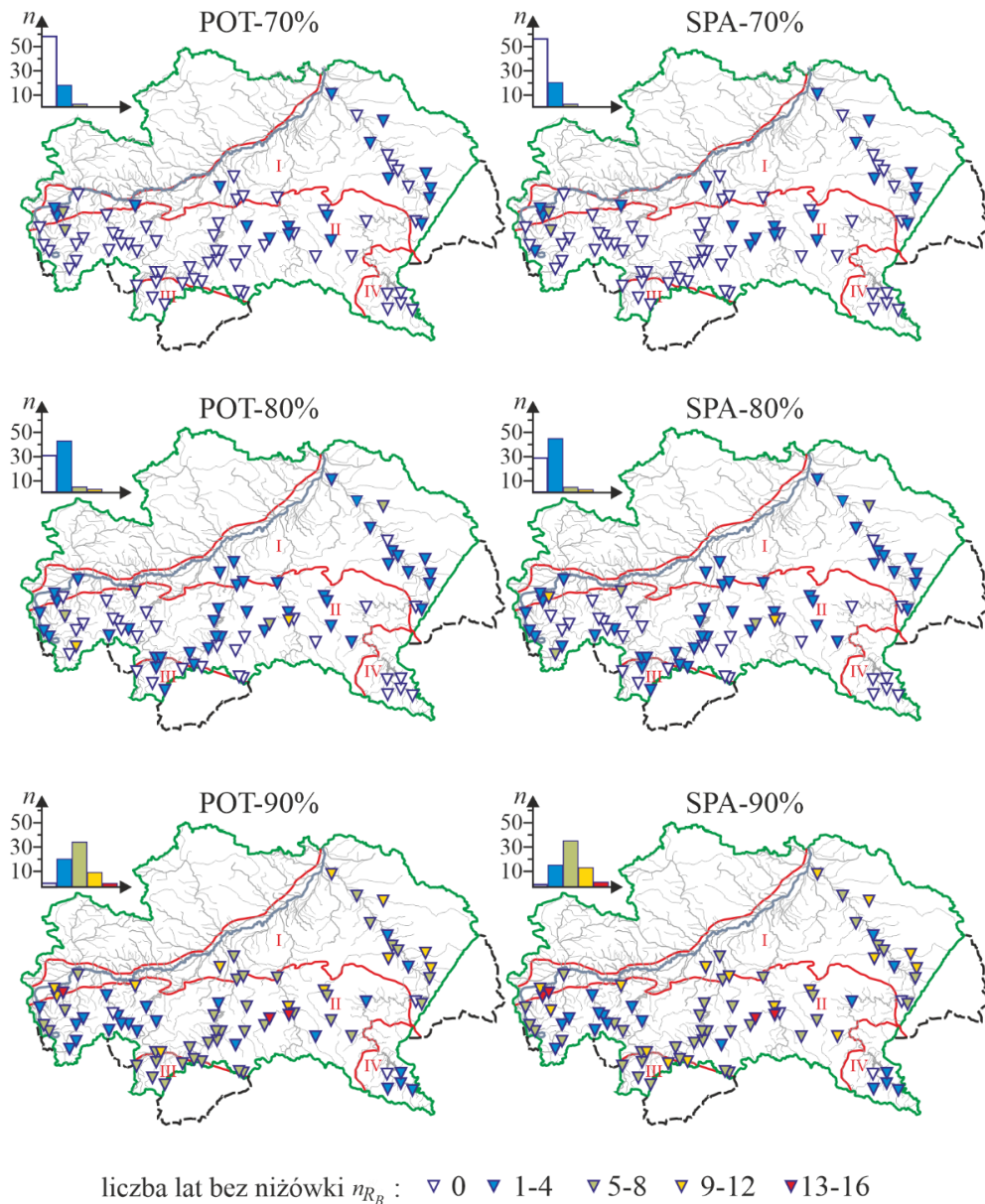
	$Q_{70\%}$	$Q_{80\%}$	$Q_{90\%}$
POT	29,45	28,35	24,09
SPA	29,36	28,05	23,33

Rys. 3.11. Rozkład liczby n_R lat z niżówką.Fig. 3.11. Distribution of number n_R of years with the drought.

Przestrzenny rozkład liczby lat beźniżówkowych (rys. 3.12) wykazuje pewne grupowania wodowskazów. Najwyższy przepływ graniczny zapewnił w większości przekrojów niżówki w każdym roku, niezależnie od metody jej obliczania. Kilka lat bez niżówki pojawiło się w kilku wodowskazach środkowej i dolnej części zlewni Sanu oraz w środkowych i wschodnich Beskidach.

Wybór $Q_{80\%}$ skutkowało zmniejszeniem liczby wodowskazów z zerową liczbą lat bez niżówki, zwiększył natomiast liczbę wodowskazów z kilkoma latami beźniżówkowymi i to nie tylko w zlewni Sanu, ale (czego nie było dla $Q_{70\%}$) również w środkowej części badanego obszaru – w zlewni Dunajca. W przekrojach bieszczadzkich, w zlewni górnego Sanu nadal na wszystkich wodowskazach zaobserwowano niżówki w każdym roku wielolecia.

Przyjęcie do obliczeń przepływu granicznego $Q_{90\%}$ powoduje zmniejszenie liczby wodowskazów z zerową liczbą lat beźniżówkowych do trzech dla niżówek POT (Sucha na Stryżawce, Przemyśl na Sanie i Terka na Solince) i dwóch dla niżówek SPA (Przemyśl na Sanie i Terka na Solince). W stosunku do $Q_{80\%}$ zmalała liczba wodowskazów z maksymalnie czterema latami bez niżówek kosztem powiększenia się liczby wodowskazów na których lata beźniżówkowe trwały ponad 5 lat – głównie na Podkarpaciu i w zlewni Dunajca. Najwięcej, 16 lat bez niżówek POT i SPA, zaobserwowano w przekroju wodowskazowym Czechowice-Bestwina na Białej.



Rys. 3.12. Rozkład przestrzenny liczby lat beźniżówkowych, podzielonych na 4 kategorie (przedziały) na badanym obszarze, na tle regionów fizyczno-geograficznych. Histogramy w lewych górnych rogach pokazują liczebności kategorii.

Fig. 3.12. Spatial distribution of number of years without drought, divided into 4 categories (intervals) in the study area, within the physical and geographical regions. Histograms in the upper left corners show the number of categories.

3.4. Liczba niżówek, średni czas ich trwania oraz średnia ich objętość w badanym wieloleciu

Jak należało oczekiwać, liczba n^{tot} niżówek POT i SPA w badanym wieloleciu silnie zależy od przepływu granicznego oraz metody ich definiowania (rys. 3.13). We wszystkich przekrojach liczba niżówek POT w wieloleciu jest większa niż niżówek SPA, a liczba n^{tot} maleje z obniżeniem Q_g . Nie ma natomiast zależności między liczbą niżówek a wysokością H położenia wodowskazu.