

Paweł JOKIEL

Uniwersytet Łódzki

Wydział Nauk Geograficznych

e-mail: pawel.jokiel@geo.uni.lodz.pl

WPŁYW ANTROPOPRESJI NA ZMIANY PRZEPIYU NERU W PRZEKROJU DĄBIE

Human impact on the Ner flow changes within Dąbie water-gauge cross section

Zarys treści: Zmieniający się w czasie dopływ wód allochtonicznych i antropogeniczne zmiany w sposobie zasilania większości lewostronnych, miejskich dopływów Neru, spowodowały przekształcenia sezonowego odpływu ze zlewni. W ciągu ostatnich 70 lat, zmieniły się również przepływy maksymalne i minimalne, a także ustrój rzeki i kształty rocznych hydrogramów przepływu (średniego i ekstremalnych). Analizę kierunków i wielkości tych przemian w aspekcie przyczyn naturalnych i antropogenicznych zawiera poniższy artykuł. Do badań zastosowano podstawowy zbiór miar hydrologicznych poszerzony o charakterystyki sezonowości odpływu.

Abstract: The unstable inflow of allochthone waters and antropogenic changes in the supply of most of the city's left-sided tributaries of Ner changed seasonal pattern of outflow. In the last 70 years they also contributed to changes of the maximum and the minimum discharge values, as well as to transformation of the river flow regime and the annual hydrographs (mean values and extremes). The aim of the article is to analyse directions and magnitude of mentioned changes in a light of natural and human-induced changes. The analysis is based on hydrological data including seasonal characteristics of runoff.

Słowa kluczowe: hydrologia, zmiany odpływu, antropopresja, Ner

Key words: hydrology, flow changes, human impact, Ner river

HYDROGRAFIA NERU

Ner jest prawostronnym dopływem Warty, a wschodnia granica jego zlewni jest fragmentem działu wodnego I rzędu, który rozdziela dorzecza Odry i Wisły. Jest to rzeka III rzędu, o aktualnej długości 125,9 km i powierzchni zlewni 1866,5 km². Obie te liczby są obecnie znacząco mniejsze od podawanych kilkadziesiąt lat temu, z uwagi na duże zmiany hydrograficzne jakie zaszły w górnej części zlewni Neru w ostatnich 200 latach. Aktualnie, za początek Neru uznaje się niewielki ciek płynący okresowo na południowo-wschodnich obrzeżach Łodzi w okolicach Huty Szklanej, a zaczynający się na rzędnej ok. 250 m n.p.m. Jego ujście do Warty znajduje się na 444,4 km biegu, na wysokości ok. 94 m n.p.m., w pobliżu wsi Majdany. Nachylenie doliny Neru jest niewielkie; od 0,2‰ w odcinku ujściowym do 3‰ w źródłowym.

Wpłynęło: 03.03.2018

Zaakceptowano: 15.06.2018

Zalecany sposób cytowania: Jokiel P., 2018, Wpływ antropopresji na zmiany przepływu Neru w przekroju Dąbie, *Prace i Studia Geograficzne*, 63.3, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 103-118.

W górnym biegu Ner płynie początkowo w kierunku południowo-zachodnim, by po kilku kilometrach zmienić kierunek na północno-zachodni. Poniżej ujścia Pisi, Ner zaczyna płynąć na północ, ale w obrębie pradoliny warszawsko-berlińskiej kierunek ten zmienia się na zachodni i północno-zachodni. Koryto Neru jest zwykle proste, na wielu odcinkach uregulowane i dość głębokie. Średnia szerokość rzeki w jej środkowym i dolnym biegu wynosi od 10 do 36 m, średnio ok. 18 m, zaś średnia głębokość ok. 1,2 m. Wahania stanu wody są tu znaczne i sięgają nawet 1,5 m (Czarnecka 1983; *Wojewódzki program...2003; Plan nawodnień...2007*). Ner nie jest rzeką miejską, gdyż płynie właściwie wzdłuż południowych i zachodnich krańców aglomeracji łódzkiej. Będąc jednak recypientem kilku rzek i cieków miejskich oraz wskutek zrzutu dużych ilości wód zużytych w miastach położonych w jego zlewni (zwłaszcza w Łodzi) nabrał wielu cech charakterystycznych dla rzek miejskich, zarówno w odniesieniu do ilości wody i reżimu odpływu, jak też jej cech fizykochemicznych.

„Brzegi iego po większej części niskie, albo w niedostępnym leżą błotach, albo na coroczne wystawione zalewy, o znaczne przyprawiają szkody bliższe i dalsze dziedziny. Całe te okolice uposażone w żyzną ziemię, obfitują w znaczne lasy, które dla trudności lub niepodobieństwa wywozu, żadney prawie nie mają wartości.” (Surowiecki 1811). Dziś po tych bagnach i lasach w zlewni Neru pozostały nieliczne, objęte zwykle ochroną, uroczyska i mokradła. Tworzą one m.in. Specjalny Obszar Ochrony Siedlisk w Dąbrowie Grotnickiej, o powierzchni ok. 101 ha, będący częścią ponad 100-letniego lasu sosnowo-dębowego oraz zabagniony fragment Pradoliny Bzury–Neru, o powierzchni 17 696 ha, obejmujący niewielkie kompleksy łąkowe, torfowiska niskie i przejściowe, a także starorzeczka, doły potorfowe oraz turzycowiska. W dolinie Neru jest także kilka niewielkich rezerwatów leśnych i torfowych np. Jodły Oleśnickie, Mianów, Rąbień oraz Błonie (halofity).

W całym biegu Ner przyjmuje 11 większych dopływów, z tego 6 lewobrzeżnych i 5 prawobrzeżnych. Ich łączna długość wynosi ok. 186 km, a powierzchnia zlewni – 847 km². Największe zlewnie mają Beldówka (180 km²) i Dobrzyńka (136,3 km²). W zlewni Neru i na samej rzece znajdują się też liczne stawy o różnym przeznaczeniu, zasilaniu i wielkości. Największe z nich zbudowano w zlewni Beldówki. W zlewni Neru działało okresowo kilka wodowskazów – głównie na ciekach odwadniających Łódź. Dziś, systematyczne obserwacje są prowadzone tylko na rzece głównej. Od 1921 roku funkcjonuje wodowskaz w Dąbiu, a od 1929 działał wodowskaz w Chocianowicach. Ten ostatni został zlikwidowany w roku 1965. Wodowskaz w Dąbiu znajduje się na 12,8 km Neru i zamyka zlewnię o powierzchni 1712,5 km² (91,6% całej zlewni). Należy też dodać, że sam Ner ma dziś relatywnie dużą zlewnię zerowego odpływu – efekt przekształceń hydrograficznych w źródłowej części rzeki - obejmującą powierzchnię ok. 30 km².

Ner jest rzeką zagospodarowaną i od wielu już lat intensywnie zabudowywaną urządzeniami hydrotechnicznymi. W zlewni funkcjonuje wiele różnych obiektów w tym urządzenia: piętrzące wodę, regulujące przepływ i odprowadzające ścieki. Tylko na Nerze znajdują się 24 obiekty piętrzące wodę, w tym 20 to jazy zastawkowe. Ich stan techniczny i sposób wykorzystania jest zróżnicowany, ale większość z nich służy do prowadzenia nawodnień rolniczych. Powierzchnia łąk nawadnianych wodami z Neru wynosi ok. 5 000 ha, a ich obszar rozciąga się głównie w dolinie rzeki, na odcinku od Konstantynowa Łódzkiego do Dąbia (Lik, Sołtuniak 2012). Niektóre z tych piętrzeń (8) wykorzystano też do budowy Małych Elektrowni Wodnych (MEW). Z uwagi na fakt, że Ner odbiera dużą i stabilną w czasie ilość oczyszczonych dziś wód zużytych z Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi, małe elektrownie wodne mogą na nim pracować prawie przez cały rok. Korzystny dla ich funkcjonowania jest też fakt, że wody te są relatywnie ciepłe, wskutek czego Ner prawie nigdy nie zamarza. Pierwsza, do dziś działająca MEW na Nerze powstała w 1993 roku w Kolonii Borek. Jej

moc wynosiła 44 kW. Dziesięć lat później, w Puczniewie oddano do użytku elektrownię o największej tu mocy równej ok. 110 kW, a w 2005 roku w Małyniu pracę rozpoczęła elektrownia o mocy 29 kW. Nie tak dawno, bo w 2013 roku w Zygmuntowie uruchomiono kolejną na Nerze MEW o mocy 66 kW. Wszystkie elektrownie znajdują się w środkowym biegu rzeki, poniżej dużych kolektorów wód zużytych, odprowadzanych z Łodzi. Oprócz elektrowni wodnych, koryto Neru przegradza 35 stopni wodnych (głównie w środkowym i dolnym biegu), a na dwu odcinkach liczących po ok. 3–4 km na obu jego brzegach usypano wały przeciwpowodziowe. Pierwszy przy ujściu do Warty (wał cofkowy), drugi w miejscu gdzie Ner wpływa do pradoliny.

Na odcinku od Rzgowa do Dąbia, bezpośrednio do Neru, doprowadza oczyszczone, rzadziej podczyszczone ścieki 8 dużych kolektorów. Ogromną większość tych wód zrzuca Grupowa Oczyszczalnia Ścieków (GOŚ) w Łodzi (fot. 1). W 2016 roku ich objętość wynosiła ok. 61,5 mln m³ wód oczyszczonych. Łącznie, w w/w roku, kolektorami tymi zrzucano do Neru prawie 62,4 mln m³ wód zużytych. Łatwo obliczyć, że średnio w ciągu sekundy, dopływało do rzeki ponad 1,9 m³ wód pościekowych. Minimalnie ilość ta wynosiła ok. 1,0 m³, a maksymalnie ponad 5,0 m³ (*Dane techniczno-eksploatacyjne...* 2017). W rzeczywistości objętość zrzucanych wód jest jeszcze większa, bowiem kolektory ściekowe z innych lokalnych ognisk doprowadzone są również do większości dopływów Neru np. do Dobrzyńki.



Fot. 1. Ujście kolektora wód zużytych z Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi do Neru
Photo. 1. Lodz Sewage Treatment Plant used waste water collector outlet to the Ner river

Źródło: fot. Paulina Stusio, lipiec 2016.
Source: photo by Paulina Stusio, July 2016.

MATERIAŁY DO POZNANIA HYDROLOGII NERU

Zlewnia Neru należy w całości do dziedziny, w której rzeki mają reżim niwalny średnio wykształcony, a zasilanie podziemne mieści się w przedziale 40-60% (Wrześniński 2017) i wynosi 2-3 dm³·s⁻¹·km⁻² (Jokiel, Tomalski 2017a). Zarówno reżim, jak i przytoczone wartości dla Neru są czysto

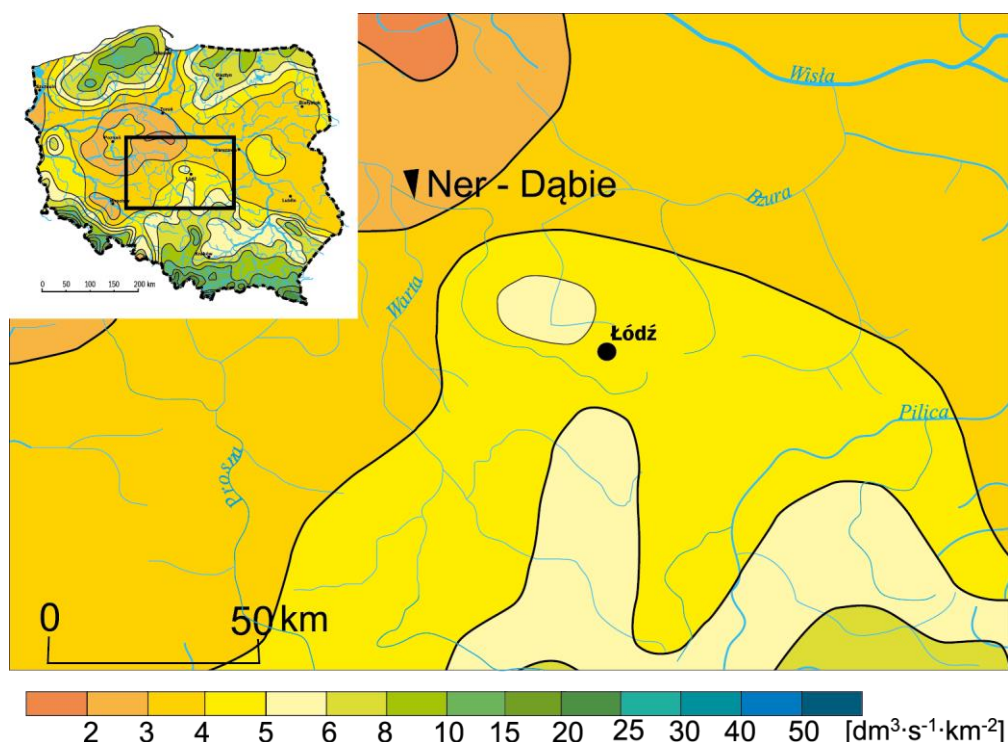
teoretyczne, bowiem są one intensywnie modyfikowane przez czynniki związane z urbanizacją i alimentacją wodami allochtonicznymi (powierzchniowymi i podziemnymi), pochodzącymi z międzylewniowego przetrzutu ze zlewni Pilicy, poprzez Łódź do zlewni Neru. Między innymi dlatego podany niżej średni wieloletni odpływ jednostkowy ze zlewni Neru, równy $5,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, przekracza wyraźnie średnią krajową, wynoszącą $5,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, choć obszar ten znajduje się w dziedzinie o odpływach mieszczących się w przedziale $3\text{-}5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Michalczyk 2017).

Struktura sezonowa przepływu Neru jest mało zróżnicowana. W przekroju Dąbie zidentyfikowano 4 sezony hydrologiczne (Jokiel, Tomalski 2015). W półroczu chłodnym są to, ułożone na przemian, sezony średnich przepływów o przeciętnej zmienności wieloletniej i bardzo wysokich przepływów o bardzo dużej zmienności. W półroczu ciepłym występują zaś kolejno sezony: średnich przepływów o przeciętnej zmienności, niskich przepływów o bardzo dużej zmienności i niskich przepływów o małej zmienności. Przepływy w sezonach drugim i ostatnim charakteryzują się trendami rosnącymi. Może to wskazywać na powolny wzrost liczby i wysokości wezbrań zimowych i wiosennych oraz jednoczesny spadek liczby i głębokości niżówek jesiennych. Zapewne dlatego w Nerze obserwuje się istotny wzrost miesięcznych przepływów minimalnych i maksymalnych, przy czym w pierwszym przypadku dotyczy on prawie wszystkich miesięcy, a w drugim: stycznia i kwietnia oraz czerwca, września i października (Jokiel 2010).

Przepływy i odpływy charakterystyczne Neru w Dąbiu obliczone przez autora dla wielolecia 1951-2014 wynoszą odpowiednio:

- najniższy przepływ (odpływ) – NNQ (NNq): $0,70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($0,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$),
- średni niski przepływ (odpływ) – SNQ (SNq): $3,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($1,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$),
- średni przepływ (odpływ) – SSQ (SSq): $10,14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($5,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$),
- średni wysoki przepływ (odpływ) – WSQ (WSq): $35,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($20,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$),
- najwyższy przepływ (odpływ) – WWQ (WWq): $86,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($50,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$).

Wspomniany wyżej dopływ wód allochtonicznych z GOŚ do Neru, bliski $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, daje w efekcie dodatkowy odpływ jednostkowy w zlewni bliski $1,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, a w konsekwencji powoduje wzrost odpływu jednostkowego i wyjaśnia dużą część różnicy między odpływem „strefowym” i odpływem faktycznym (ok. $4,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ wobec $5,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) (ryc. 1). Podobne wnioski można wyciągnąć analizując strefowe i faktyczne odpływy średnie niskie i niskie. W pierwszym przypadku zlewnia Neru zaliczona jest do dziedziny o SNq bliskim $1,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Bartnik 2005). Faktyczne SNq jest natomiast o 80% większe ($1,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Porównując różnicę między obiema wartościami z objętością minimalnego zrzutu ścieków z GOŚ ($1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) odniesioną do powierzchni zlewni ($0,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), łatwo zauważyć, że obie wartości są podobne. Zatem znaczna część trwałego w czasie odpływu niskiego pochodzi spoza zlewni. Są to powierzchniowe wody allochtoniczne przetrzucane z Pilicy, powiększone o zużyte, głębokie wody podziemne ze strefy hydrologicznie biernej pozyskane w zlewni Neru dla celów użytkowych z apotamicznych poziomów wodonośnych, w tym z pięt górnej i dolnej kredy.



Ryc. 1. Odprężenie jednostkowe w środkowej Polsce

Objaśnienia: 1,2,3,...7 – odprężenie jednostkowe [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]; 8 – wodowskaz w Dąbiu

Fig. 1. Specific outflows in central Poland

Explanations: 1,2,3,...7 – specific outflows [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]; 8 – water-gauge in Dąbie

Źródło: Jokiel (2004, s.30).

Source: Jokiel (2004, p.30).

Na podstawie rozkładu rocznych przepływów maksymalnych aproksymowanego funkcją Pearsona typ III, oszacowane przepływy i odprężenie maksymalne o prawdopodobieństwie przekroczenia 10%, 1% i 0,2% wynoszą:

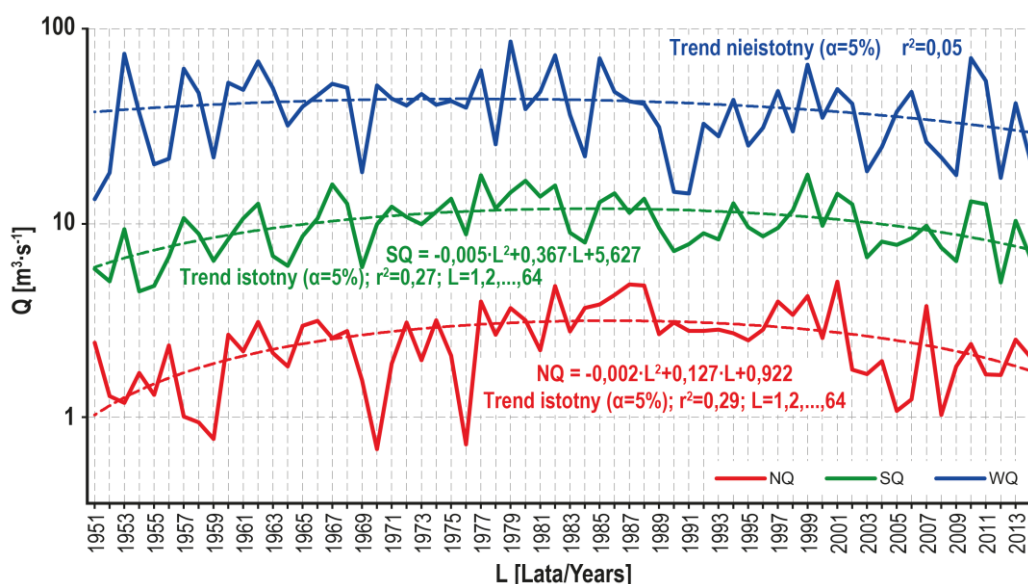
- $Q_{10\%} = 64,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($37,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$),
- $Q_{1\%} = 94,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($55,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$),
- $Q_{0,2\%} = 113,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($66,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$).

Wezbrania w Nerze występują zwykle w dwu okresach od stycznia do lutego oraz od sierpnia do listopada, a ich liczba wynosi średnio 5 w roku (Jokiel, Bartnik 2017). Indeks powodziowości Françou-Rodiera obliczony dla Neru w Dąbiu jest niski i wynosi 1,48 (Jokiel 2016a). Zagrożenia powodziowe są tu zatem niewielkie, choć występują lokalnie, zwłaszcza w dolinie dolnego Neru, w gminach: Zadzim, Poddębice, Wartkowie, Świnice Warckie, Łęczycza, Grabów i Lutomiernik (*Raport...2013*).

Niżówki w Nerze są stosunkowo płytkie, trwają dość krótko (średnio 33 dni w roku) i mają charakter niżówek ewapotranspiracyjnych letnio-jesiennych z porą koncentracji w drugiej połowie sierpnia (Tomaszewski 2012). Deficyty odprężenia niżówkowego są tu jednak wysokie, gdyż o ok. 50% przekraczają przeciętne deficyty w środkowej Polsce (9,5 mm wobec 6,2 mm). Biorąc pod uwagę zmienność niżówek, to w Nerze zmienność sezonowa jest przeciętna w skali Polski (cecha typowa dla rzek środkowej Polski), ale zmienność wieloletnia podobna jest do cechującej rzeki wyżynne (np. w zlewni górnej Pilicy i Warty).

WIELOLETNIE ZMIANY PRZEPIYWU NERU

Analiza 64 letnich serii rocznych przepływów charakterystycznych: wysokich (WQ), średnich (SQ) i niskich (NQ) Neru w Dąbiu wskazuje, że dwie z nich, obok losowych zmian i fluktuacji, zawierają elementy trwałych tendencji (ryc. 2). Statystycznie istotne na poziomie 5% (test Snedecora) są trendy rocznych przepływów średnich i niskich. Paraboliczny charakter funkcji aproksymujących ich wieloletnią zmienność wskazują, że kierunki i przyczyny obserwowanych tendencji zmieniły się w czasie zarówno w sensie ilościowym, jak i jakościowym. Wieloletnie fluktuacje kierunku trendu są szczególnie wyraźne w przypadku przepływów niskich, które od 1951 do końca lat 80. rosły, a potem zaczęły maleć. W odniesieniu do przepływów średnich trend ma podobny charakter, przy czym najwyższe wartości notowano na początku lat 80. W ogólności wydaje się, że w połowie lat 80. widoczny jest swoisty przełom w reżimie odpływu Neru polegający na zmianie kierunków trendów przepływów charakterystycznych, które były widoczne w pierwszej połowie badanej serii.



Ryc. 2. Wieloletnie zmiany rocznych przepływów charakterystycznych Neru w przekroju Dąbie
Objaśnienia WQ – roczny przepływ maksymalny, SQ – średni przepływ roczny, NQ – roczny przepływ minimalny;
 r^2 – współczynnik dopasowania funkcji trendu

Fig. 2. Long-term changes in annual flow characteristics in the Ner river within water-gauge cross section in Dąbie

Explanations: WQ – annual flow maximum, SQ – mean annual flow, NQ – annual flow minimum;
 r^2 – determination coefficient

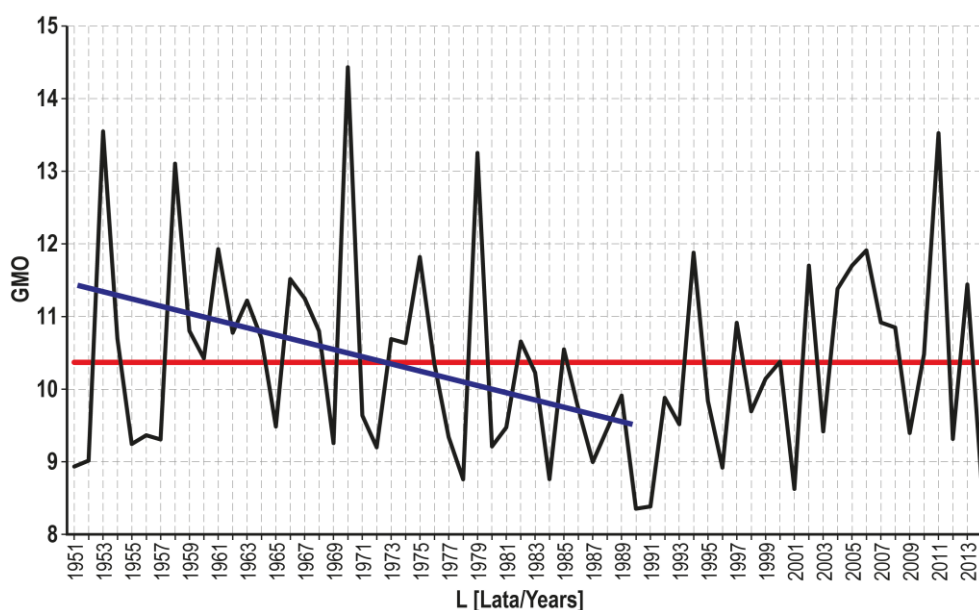
Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

Połowa lat 80. była właściwie w całej Polsce okresem dość specyficznym w skali wielolecia. Po 1987 roku zaczęła w kraju dominować silna cyrkulacja strefowa i częstszy niż wcześniej napływ mas powietrza z południa (Kozuchowski 2000). Wyraźnie, bo aż o 10% w skali dwu lat (1982-1983), zmalał wtedy średni współczynnik odpływu z całego kraju. Potem zaczął on systematycznie rosnąć, stabilizując się pod koniec lat 90. Odbyło się to wraz ze wzrostem średniej temperatury i parowania terenowego, a właściwie na przekór tym wzrostom (Jokiel 2004). Jednocześnie, w latach 1983

i 1984, w rzekach dorzeczy Wisły i Odry zanotowano ponad 20% wszystkich przepływów minimalnych z wielolecia 1951-2010 (Jokiel, Stanisławczyk 2012). W tym samym czasie, zauważalnej zmianie uległa także relacja między poborem wody przez gospodarkę, a opadem i odpływem. W Polsce i co ważne również w Łodzi i województwie łódzkim, dla gospodarki pobierano wtedy największe ilości wody w skali wielolecia – ok. 16 km³ rocznie (lata: 1982, 1983). Rok 1982 był też w Polsce rokiem o bardzo niskim deficycie odpływu (94,6 km³), a rok 1983 cechowało bardzo wysokie w skali wielolecia parowanie penmanowskie (225 km³) (Jokiel 2004). Wszystkie te zjawiska i procesy spowodowały szereg skutków hydrologicznych możliwych do zaobserwowania w wieloletnim przebiegu różnych charakterystyk odzwierciedlających reżim odpływu Neru.

W badanym wieloleciu, zmianie ulegał sezonowy rozkład przepływu w Nerze. Od początku serii do końca lat 80., roczne wskaźniki koncentracji przepływu GMO i indeksy jego sezonowości *I_s* (Oliver 1980; Soja 2002; Jokiel, Tomalski 2017b), obliczone na podstawie średnich przepływów miesięcznych, dość wyraźnie malały (ryc. 3, 4). Zatem roczne hydrogramy przepływu rzeki stawały się coraz bardziej „wygładzone”, a odpływ był w coraz mniejszym stopniu „sezonowy”. Od połowy lat 80. trend ten uległ zmianie, wskaźniki koncentracji i indeksy sezonowości najpierw się ustabilizowały, a następnie zaczęły rosnąć, osiągając w ostatniej dekadzie średnią i dyspersję bliskie typowym dla dwudziestolecia 1951-1970. Warto również podkreślić, że przeciętny wskaźnik GMO Neru w Dąbiu równy 10,6 jest dość niski (dużo niższy od uzyskanych dla rzek karpackich), ale bliski wartościom typowym dla środkowych i dolnych przekrojów Wisły (Jokiel, Tomalski 2017b, 2017c).



Ryc. 3. Wieloletnia zmienność wskaźników koncentracji przepływu (GMO) Neru w przekroju Dąbie

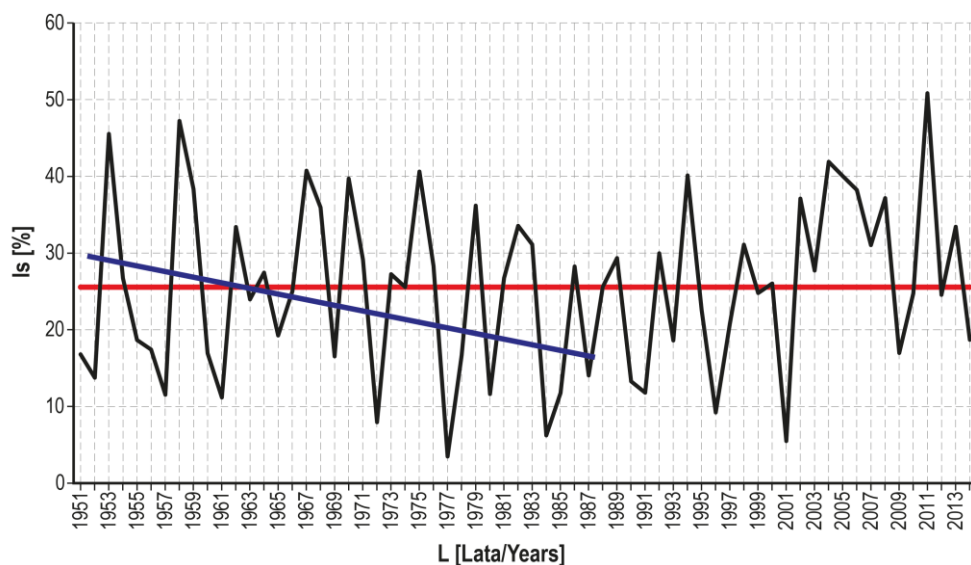
Objaśnienia: linia czerwona – średni GMO; linia niebieska – tendencja GMO w okresie 1951-1990

Fig. 3. Long-term variability of GMO flow concentration index for the Ner river within water-gauge cross section in Dąbie

Explanations: red line – mean GMO index; blue line – GMO index trend in the 1951-1990 period

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.



Ryc. 4. Wieloletnia zmienność indeksów sezonowości I_s odpływu Neru w Dąbiu

Objaśnienia: linia czerwona – średni indeks sezonowości; linia niebieska – tendencja indeksów w latach 1951-1985

Fig. 4. Markham seasonality index multiannual variability of the Ner river flow in Dąbie

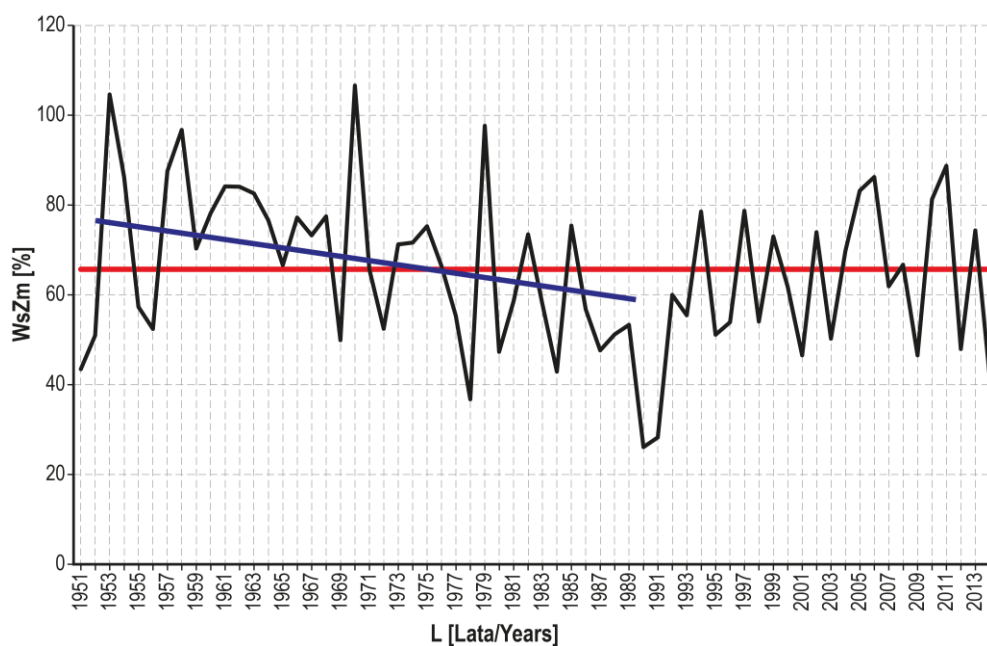
Explanations: red line – mean flow seasonality index; blue line – flow seasonality index trend in the 1951-1985 period

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

Indeks sezonowości odpływu I_s charakteryzował się w wieloleciu dużą zmiennością: od poniżej 5% do ponad 50%; średni wynosił ok. 26% (ryc. 4). Ner jest zatem rzeką, której przepływ w ciągu roku może być bardzo mało zróżnicowany (np. w latach 1977 i 2001) albo może charakteryzować się bardzo dużą zmiennością sezonową (np. w latach 1958 i 2011). Bardzo charakterystyczny jest też obraz wieloletniej zmienności rocznych współczynników zmienności przepływów dobowych $WsZm$ (ryc. 5). Łatwo na nim dostrzec systematyczny spadek wartości tego współczynnika od początku serii do końca lat 80. i jego późniejszą stabilizację na poziomie bliskim średniej z wielolecia równej ok. 66%.

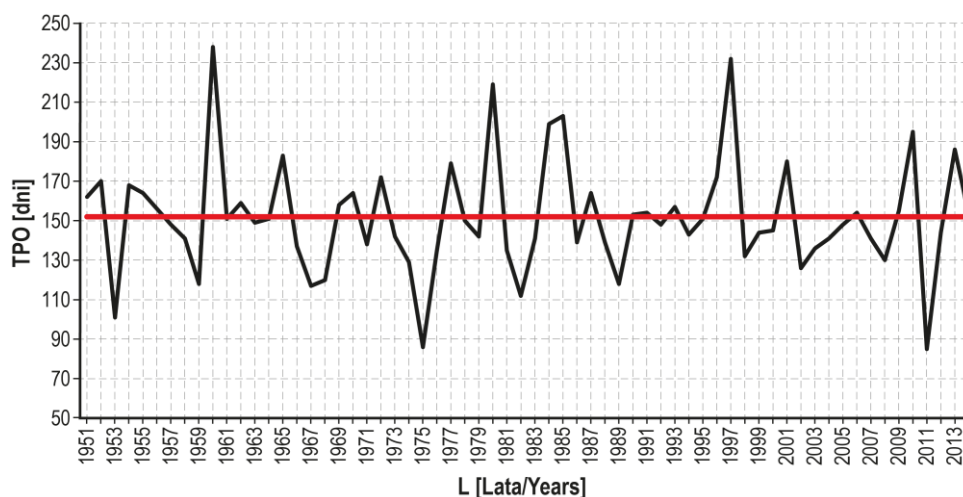
Nieco inaczej zmieniał się w wieloleciu termin połowy odpływu (TPO), czyli dzień (data) liczona od początku roku hydrologicznego, w którym odpływała ze zlewni Neru połowa jego rocznych zasobów wodnych (Jokiel 2016b). Dyspersja tej charakterystyki była w wieloleciu duża: od 86 (25 stycznia) do 232 (20 czerwca) dnia roku hydrologicznego (ryc. 6). Przeciętnie połowa zasobów wodnych Neru odpływała 153 dnia roku (2 kwietnia). Mimo dużego zróżnicowania TPO w wieloleciu trudno doszukać się w jego biegu jednoznacznych tendencji podobnych do opisanych wyżej w odniesieniu do GMO i I_s . Należy też podkreślić, że średni termin połowy odpływu Neru jest bliski przeciętnej uzyskanej dla rzek środkowej Polski, ale rozstęp między ekstremalnymi TPO należy do najmniejszych w regionie – 143 dni. Wczesne TPO (kwantyl 10%) wskazuje na 118 dzień roku hydrologicznego (25 lutego), a bardzo późne (kwantyl 90%) na 190 dzień – 9 maja (Jokiel 2016b).



Ryc. 5. Wieloletnia dynamika rocznych współczynników zmienności przepływu Neru w Dąbie
 Objaśnienia: linia czerwona – średni współczynnik zmienności; linia niebieska – tendencja współczynnika zmienności w latach 1951-1988

Fig. 5. Long-term dynamics of the annual flow variability coefficients of the Ner in Dąbie
 Explanations: red line – mean variability coefficient; blue line – annual flow variability coefficient trend in the 1951-1988 period

Źródło: opracowanie własne.
 Source: author's own elaboration.



Ryc. 6. Wieloletnia zmienność terminu połowy odpływu TPO Neru w Dąbie
 Objaśnienia: linia czerwona – średni termin połowy odpływu

Fig. 6. Long-term variability of the half-outflow term (TPO) in the Ner river in Dąbie
 Explanations: red line – mean half-outflow term

Źródło: opracowanie własne.
 Source: author's own elaboration.

Przełom lat 80. i 90. był okresem specyficznym w odniesieniu do gospodarki wodnej w Łodzi i województwie łódzkim. Przemiany gospodarcze, w tym upadek łódzkiego przemysłu oraz wzrost

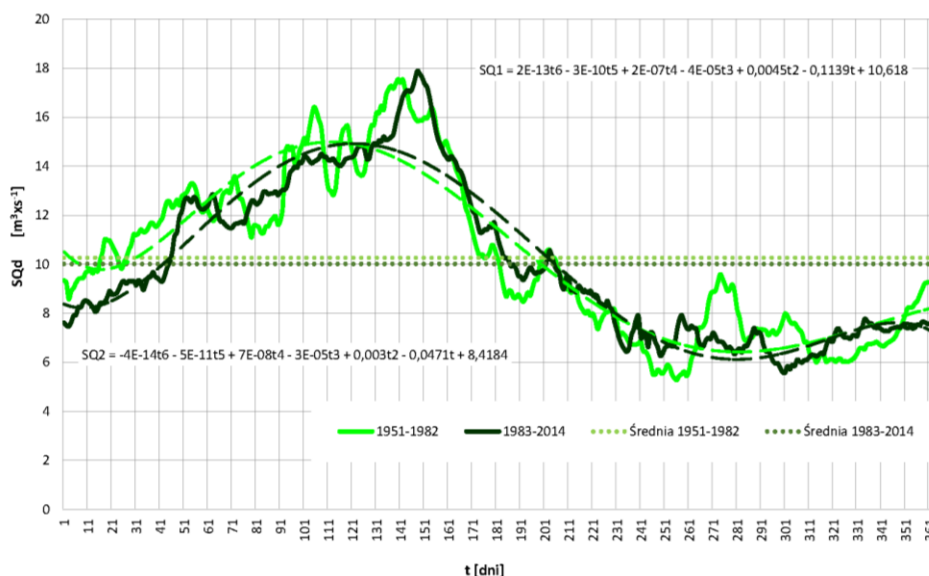
i urynkowanie cen wody spowodowały, najpierw gwałtowny, a potem stopniowy spadek jej zużycia w aglomeracji i w zlewni Neru, a w konsekwencji zmniejszenie ilości wód zużytych (ścieków) które odprowadzano do rzeki. Jednocześnie, szybko postępujący proces urbanizacji Łodzi i aglomeracji łódzkiej doprowadził do istotnych w skali wielolecia, wielkoskalowych przemian w sposobie obiegu wody na tych terenach. Przejawiały się one zmniejszeniem infiltracji na rzecz spływu powierzchniowego, głównie wskutek rozrostu systemu kanalizacji i wzrostu odsetka powierzchni nieprzepuszczalnych, a także obniżenia lub zaniku zwierciadła wody podziemnej, izolacji koryt od poziomów wodonośnych i wielu innych zjawisk związanych z urbanizacją (Bartnik 2017). Zmalał jednocześnie pobór wody i zrzut wód zużytych do Neru, przy czym nadal ogromna ich większość pochodziła spoza jego zlewni powierzchniowej i podziemnej – strefy hydrologicznie czynnej.

Podana dynamika przepływu Neru wskazuje, że rzeka ma cechy typowe dla wielu rzek wyżynnych środkowej Polski. Jest to skutkiem odbierania przez Ner i jego niektóre dopływy szybko spływających wód opadowych pochodzących z kanalizacji burzowej Łodzi i miast aglomeracji, które tworzą odpływ szybki (suma spływu powierzchniowego i podpowierzchniowego), przejawiający się na hydrogramie licznymi falami wezbraniowymi. Jednocześnie system Neru koncentruje mało zmienne sezonowo, allochtoniczne wody pościekowe, zużyte w aglomeracji łódzkiej, tworząc relatywnie duży odpływ trwały będący odpowiednikiem, a w zurbanizowanej części zlewni, zamiennikiem zasilania podziemnego. Wywołuje to efekt hydrologiczny podobny do występującego w rzekach wyżynnych, gdzie na relatywnie duży i mało zmienny w czasie odpływ podziemny (podstawa hydrogramu przepływu) nakładają się szybko spływające wody z intensywnych opadów półrocza ciepłego lub wezbrań roztopowych półrocza chłodnego – tworząc wysokie, ale krótkotrwałe fale wezbraniowe (Jokił 2016a; Bartnik 2017).

ROCZNE HYDROGRAMY PRZEPLÝWÓW DOBOWYCH NERU W DĄBIU

Wskazane wyżej prawidłowości i skutki klimatycznie oraz antropogenicznie uwarunkowanej presji na reżim odpływu Neru zrodziły potrzebę analizy, która by je uwzględniała. Próby takiej dokonano dzieląc dostępną serię przepływów dobowych (1951-2014) na dwa wieloletnie odcinki obejmujące okresy: 1951-1982 i 1983-2014. Uzyskane w ten sposób dwie serie mają długość taką samą i na dodatek wystarczającą (>30 lat), by uzyskane wnioski uznać za wiarygodne i naukowo wartościowe. Jednocześnie warto zauważyć, że miejsce rozcięcia całej serii wieloletniej, a więc lata 1982/1983, były dla Neru i całej środkowej Polski okresem pod wieloma względami specyficznym, mającym charakter swoistego „punktu nieciągłości”.

Materiałem analitycznym będą: średnie, maksymalne i minimalne przepływy Neru uzyskane dla poszczególnych dni w roku na podstawie przepływów dobowych wielolecia 1951-2014. Wartości te zestawione zostaną w formie dwu rocznych hydrogramów (dla wielolecia: 1951-1982 i 1983-2014) uzyskanych dla średnich i ekstremów przepływu (ryc. 7, 9, 10). Analizy tych hydrogramów uzupełnione zostaną identyfikacją cech wyestymowanych dla nich wielomianów modeli regresyjnych oraz analizą zmian przepływów średnich miesięcznych.



Ryc. 7. Średnie dobowe hydrogramy przepływu Neru w Dąbiu dla wieloleci: 1951-1982 i 1983-2014

Objaśnienia: SQ1, SQ2 – odpowiednio średnie hydrogramy roczne serii: 1951-1982 i 1983-2014

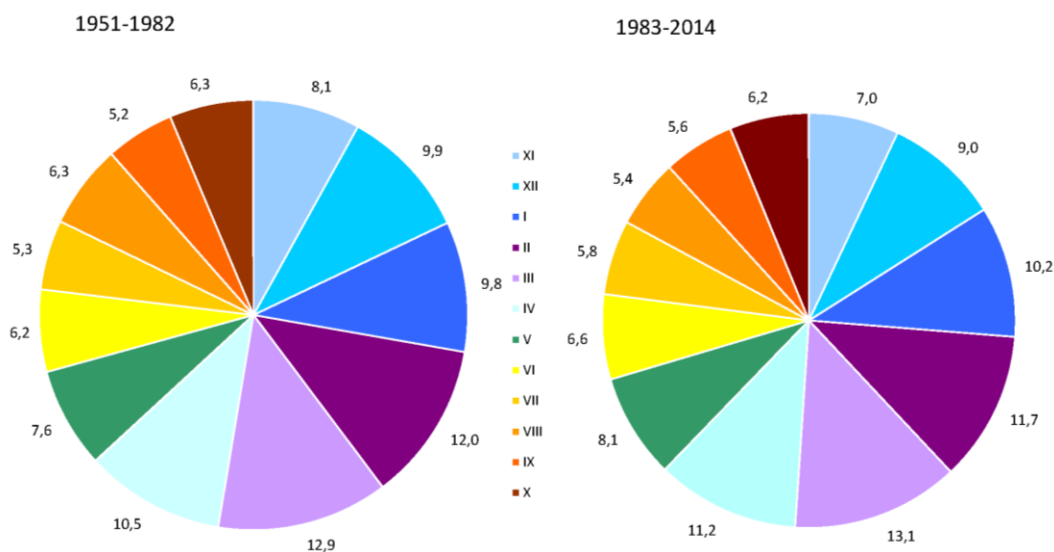
Fig. 7. Mean daily flow annual hydrographs of the Ner in the following periods 1951-1982 and 1983-2014

Explanations: SQ1, SQ2 – mean daily flow annual hydrographs in the following periods: 1951-1983 and 1983-2014

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

Analizy rozpoczęto od oceny zmian jakie zaszły w obrębie przeciętnego, rocznego hydrogramu przepływu, uzyskanego w oparciu o średnie przepływy obliczone dla jednoimiennych dni w roku (ryc. 7). Z przebiegu obu przeciętnych hydrogramów, jak też z uzyskanych dla nich wyrównujących linii trendów jasno wynika, że w serii późniejszej, obejmującej lata 1983-2014, w stosunku do wcześniejszej (1951-1982), przepływy były wyraźnie niższe jesienią i zimą, bardzo podobne wiosną, ale nieco wyższe wczesnym latem (Stusio 2017). Średni hydrogram przepływu uzyskany dla serii 1983-2014 jest zatem bardziej wygładzony niż uzyskany dla okresu wcześniejszego, a sezonowe różnice przepływu Neru zmniejszyły się istotnie. Należy przy tym podkreślić, że objętość wody jaka odpływała Nerem przez przekrój w Dąbiu nie zmieniła się istotnie. Przepływ średni nawet nieco zmalał: z $SSQ1=10,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $SSQ2=10,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast wyraźnie zmniejszył się współczynnik zmienności przepływów średnich rocznych (z 71% do 60%).



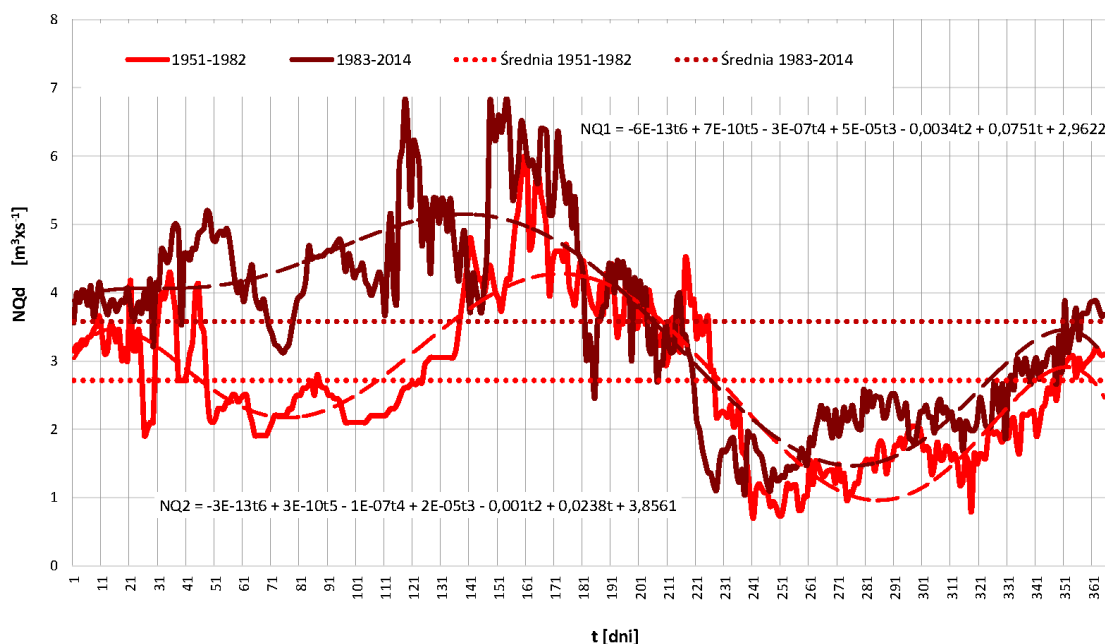
Ryc. 8. Udział poszczególnych miesięcy (w %) w rocznej sumie odpływu ze zlewni Neru w Dąbiu
Fig. 8. Share of individual months in the annual total outflow (in %) from the Ner catchment in Dąbie

Źródło: opracowanie własne.
 Source: author's own elaboration.

Różnice przedstawione wyżej potwierdza również analiza przepływów średnich miesięcznych (ryc. 8). Udział odpływów z listopada i grudnia oraz z sierpnia i września zmalał, natomiast wzrosło znaczenie miesięcy od kwietnia do lipca. Zmiany ilościowe nie były jednak duże i nie przekraczały 1,1% rocznej sumy odpływu (największa dotyczyła listopada). We wcześniejszym wieloleciu, w półroczu chłodnym odpływało 63,2% rocznych zasobów wodnych, w wieloleciu późniejszym o 1% mniej (62,2%).

Duże zmiany zaszły natomiast w odniesieniu do dobowych przepływów niskich (Stusio 2017). Dobowe minima przepływu uzyskane dla obu wieloleci różnią się istotnie i nie są to zmiany które można uznać za przypadkowe (ryc. 9). W pierwszym wieloleciu, minima półroczna chłodnego były wyraźnie niższe niż w serii późniejszej, przy czym największe odchylenia dotyczyły półroczna chłodnego: od grudnia do marca. Wiosną i wczesnym latem różnice były natomiast niewielkie, zaś od sierpnia do listopada minima dobowe nawet wzrosły, choć w stopniu znacznie mniejszym niż zimą. Różnice sezonowe dobrze oddają wyestymowane regresyjne modele dobowych przepływów minimalnych, a skalę zmian w roku – wartości średnie. Przeciętne wieloletnie dobowe minimum przepływu Neru w Dąbiu wzrosło o $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, czyli o ok. 30%.

Głębokie niżówki zimowe, związane ze zlodzeniem, trwałą pokrywą lodową oraz ograniczeniem zasilania płytkimi wodami z aluwii już właściwie w Nerze nie występują. Bazowy i sezonowy odpływ podziemny ze znacznej części powierzchni zlewni Neru został w półroczu chłodnym, niemal całkowicie zastąpiony zasilaniem ciepłymi, mało zmiennymi sezonowo i trwałymi w wieloleciu, wodami użytymi w aglomeracji łódzkiej. Podobny skutek dotknął niżówek letnio-jesiennych w czasie których, trwałe podziemne zasilanie rzeki, i tak już ograniczone na zurbanizowanym obszarze zlewni (uszczelnione koryta, zanik płytkich i aluwialnych poziomów wodonośnych), zostało uzupełnione, a lokalnie zastąpione stabilnym w czasie dopływem obcych wód pościekowych.



Ryc. 9. Dobowe minima przepływu Neru w Dąbie w wieloletniach: 1951-1982 i 1983-2014

Objaśnienia: NQ1, NQ2 – odpowiednio dobowe przepływy niskie serii 1951-1982 i 1983-2014

Fig. 9. The daily low flow of the Ner river in Dąbie; periods: 1951-1982 and 1983-2014

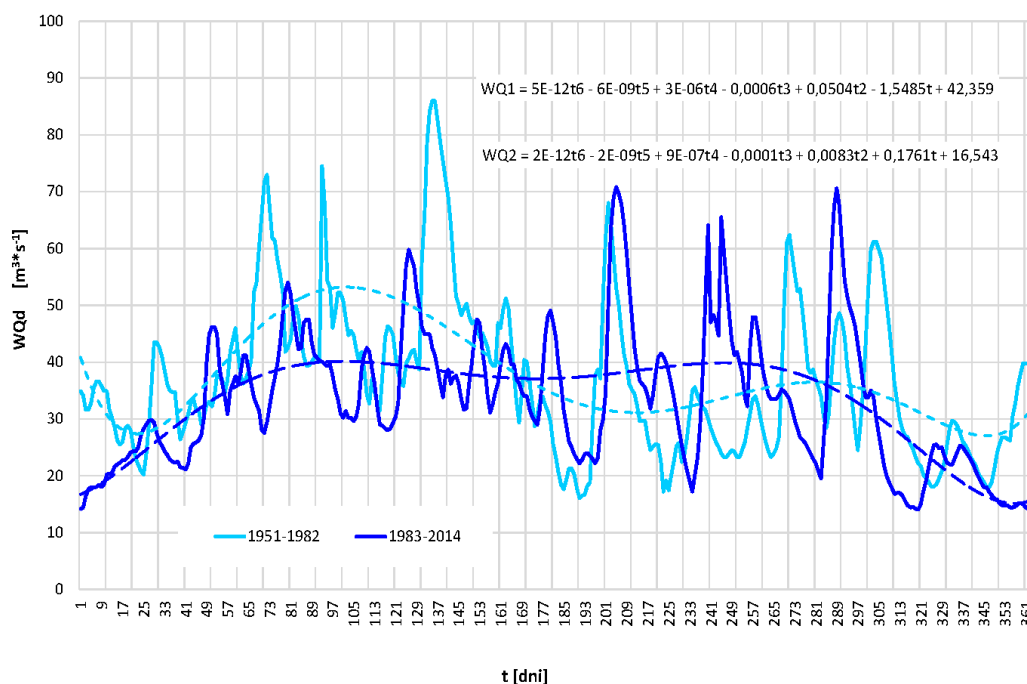
Explanations: NQ1, NQ2 – daily low flows in the following periods: 1951-1983 and 1983-2014

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

Nieco inny obraz uzyskano dla dobowych przepływów maksymalnych (ryc. 10). Łatwo dostrzec, że przepływy wysokie w półroczu chłodnym wyraźnie zmalały. Zimowe i wczesnowiosenne wezbrania Neru stały się niższe (ekstrema w późniejszym wieloleciu nie przekraczały $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ale zdarzały się nieco częściej i trwały zwykle krócej. Hydrogram maksimów dobowych stał się w tym okresie dość wyrównany. W półroczu ciepłym, zwłaszcza w jego części wiosenno-letniej, przepływy maksymalne były wyraźnie wyższe od notowanych w poprzednim wieloleciu, ale wezbrania zdarzały się równie często i miały podobny czas trwania jak wcześniejsze. Równocześnie zmalały wyraźnie maksima dobowe jesienią.

Analizując kształt obu hydrogramów dobowych przepływów maksymalnych zauważymy, że ich wartości wiosną i latem nieco wzrosły, aż do poziomu charakterystycznego dla półroczu chłodnego, a nawet nieco go przekroczyły (Stusio 2017). Natomiast zmalały przepływy wysokie jesienią. W ogólności wezbrania w półroczu chłodnym zmalały, a w ciepłym nawet nieco wzrosły. Prawidłowości te dobrze oddają uzyskane modele regresyjne maksimów dobowych. Niepewność i błędy wszystkich prezentowanych modeli (ryc. 7, 9, 10) są oczywiście duże, ale ich kształt dobrze oddaje charakter zmian w obrębie rocznych hydrogramów przepływu.



Ryc. 10. Dobowe maksima przepływu Neru w Dąbie w wieloletniach: 1951-1982 i 1983-2014

Objaśnienia: WQ1, WQ2 – odpowiednio dobowe przepływy wysokie serii 1951-1982 i 1983-2014

Fig. 10. The daily high flows of the Ner in Dąbie in the following periods: 1951-1982 and 1983-2014

Explanations: WQ1, WQ2 – daily high flows in the following periods: 1951-1983 and 1983-2014

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

WNIOSKI

Odptyw średni ze zlewni Neru jest o ok. $0,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ większy od średniej krajowej ($5,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Jest też o ok. $1,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ większy od odpływu charakterystycznego dla tej części Polski (odptyw strefowy). Prawie 80% tej różnicy tworzy dopływ wód allochtonicznych doprowadzanych do rzeki kolektorami wód zużytych w Łodzi. Biorąc pod uwagę tylko ilość wody jaką w latach 1951-2014 odprowadzał Ner do Warty, zaobserwowane wieloletnie zmiany przepływu należy uznać za niewielkie. Średnie roczne hydrogramy przepływu z wielolecia 1951-1982 i 1983-2014 nie różnią się bowiem istotnie, a średnie przepływy są do siebie bardzo podobne. Jeśli jednak przeanalizujemy odpływ w kategoriach struktury genetycznej i sezonowej oraz szeroko pojętej dynamiki rocznej i wieloletniej, obserwowane zmiany i fluktuacje stają się wyraźne i genetycznie uzasadnione. Ciepłe zimy w ostatnim 30. leciu oraz pojawienie się miejskiej, zimowej wyspy ciepła w Łodzi przyniosły w efekcie wzrost ewapotranspiracji w półroczu chłodnym na znaczącym obszarze zlewni, a w skutek tego częstsze, ale jednocześnie niższe i o mniejszej objętości wezbrania zimowe i wiosenne. Jednocześnie niżówki zimowe stały się płytsze, a to głównie wskutek odprowadzania przez rzekę, stabilnej w czasie objętości, allochtonicznych i stosunkowo ciepłych wód zużytych w aglomeracji łódzkiej. Zmienność przepływu w półroczu chłodnym wyraźnie zmalała.

W półroczach ciepłych drugiego 30. lecia, podobnie jak w okresach chłodnych, niżówki (tu: letnio-jesienne) również stały się płytsze niż wcześniej. Względnie stabilny w czasie zrzut wód obcych stał się bardzo widoczny w reżimie przepływu. Wzrosły natomiast nieco maksima letnich wezbrań opadowych oraz ich łączna objętość. W efekcie reżim wezbraniowy zmienił się ze śnieżnego średnio wykształconego na śnieżny słabo wykształcony z dużym udziałem wód z letnich wezbrań opadowych. Maksima dobowe przepływu stały się mniej zróżnicowane sezonowo. Jednocześnie znacząco wzrosły przepływy minimalne właściwie w całym roku (poza wiosną). Przyczynił się do tego systematyczny przyrost względnie trwałego odpływu wywołanego zrzutem allochtonicznych wód zużytych w Łodzi, przy jednoczesnym zaniku zasilania podziemnego w znaczącej, zurbanizowanej części zlewni Neru oraz zanik zimowych niżówek związanych ze zjawiskami lodowymi (dopływ stosunkowo ciepłych wód pościekowych).

Literatura

- Bartnik A., 2005, *Odptyw niski w Polsce*, Acta Geographica Lodziensia, 91, 95-120.
- Bartnik A., 2017, *Mała rzeka w dużym mieście. Wybrane aspekty obiegu wody w obszarze zurbanizowanym na przykładzie łódzkiej Sokółki*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Czarniecka H. (red.), 1983, *Podział hydrograficzny Polski*, cz. I: *Zestawienia liczbowo-opisowe*, IMGW, WKiŁ, Warszawa.
- Dane techniczno-eksploatacyjne GOŚ ŁAM*, 2017, Łódź.
- Jokiel P., 2004, *Zasoby wodne środkowej Polski na progę XXI wieku*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Jokiel P., 2010, Kilka uwag o wieloletniej zmienności odpływów ekstremalnych w środkowej Polsce, [w:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Wyd. Inst. Geogr. Uniw. Hum. Przyrod., Kielce, 111-127.
- Jokiel P., 2016a, Przepływy i odpływy maksymalne w środkowej Polsce, *Geography & Tourism*, 4(2), 7-21.
- Jokiel P., 2016b, Sezonowa struktura odpływu rzecznoego w środkowej Polsce i jej zmiany w wieloleciu w świetle krzywych sumowych i terminów połowy odpływu, *Przegląd Geograficzny*, 88(1), 5-26.
- Jokiel P., Bartnik A., 2017, Wezbrania i powódzie, [w:] P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 167-175.
- Jokiel P., Stanisławczyk B., 2012, Roczne odpływy maksymalne i minimalne w dorzeczach Odry i Wisły w przekroju wieloletnim, *Czasopismo Geograficzne*, 83(3), 133-143.
- Jokiel P., Tomalski P., 2015, Sezony hydrologiczne w rzekach środkowej Polski, *Przegląd Geograficzny*, 87(1), 71-93.
- Jokiel P., Tomalski P., 2017a, Formy odpływu rzecznoego i ich zróżnicowanie przestrzenne, [w:] P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 160-167.
- Jokiel P., Tomalski P., 2017b, Sezonowość odpływu z wybranych zlewniach karpackich, *Przegląd Geograficzny*, 89(1), 29-44.
- Jokiel P., Tomalski P., 2017c, Zmiany sezonowości przepływu z biegiem Wisły, [w:] W. Marszelewski (red.), *Monografie Komisji Hydrologicznej PTG*, 4, Toruń, 99-116.
- Kożuchowski K. (red.), 2000, *Pory roku w Polsce*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Lik J., Sołtuniak J., 2012, *Wykorzystanie zasobów wodnych województwa łódzkiego na cele energetyki i towarzyszącej jej turystyki*, PAN, Łódź.
- Michalczyk Z., 2017, Odpływ średni, zmienność w czasie i zróżnicowanie przestrzenne, [w:] P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 152-160.

- Oliver J.E., 1980, Monthly precipitation distribution: a comparative index, *Professional Geographer*, 32(3), 300-309.
- Plan nawodnień rolniczych dla województwa łódzkiego*, część III, 2007, Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska Biprowodmel, Poznań.
- Raport z wykonania Map Zagrożenia Powodziowego i Map Ryzyka Powodziowego*, 2013, Projekt ISOK, Poznań; zmienione.
- Soja R., 2002, Hydrologiczne aspekty antropopresji w polskich Karpatach, *Prace Geograficzne*, 186, IGI PAN, Warszawa.
- Stusio P., 2017, *Dynamika zmian przepływu w przekroju wodowskazowym Neru w Dąbiu*, Wydział Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego (maszynopis pracy magisterskiej).
- Surowiecki W., 1811, *O rzekach y splawach Kraiów Xięstwa Warszawskiego*, Drukarnia Rządowa, Warszawa.
- Tomaszewski E., 2012, *Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Wojewódzki program ochrony i rozwoju zasobów wodnych dla województwa łódzkiego*, 2003, Biuro Projektów Wodnych Melioracji i Inżynierii Środowiska Biprowodmel, Poznań.
- Wrzesiński D., 2017, Reżimy rzek Polski, [w:] P. Jokieli, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 215-221.

Summary

The Ner is a right, lowland influent creek of the Warta River. It is a river that for almost 100 years has been collecting water used in Łódź city and its agglomeration (Fig. 1 and Phot. 1). The length of the Ner is almost 126 km, and the basin area for the water-gauge in Dąbie is about 1712.5 km². The mean flow of the Ner at this water-gauge is approx. 10.14 m³·s⁻¹. The specific outflow from this basin is therefore approximated to 5.9 dm³·s⁻¹·km⁻². In recent years, almost 19% of this river flow and the outflow from its basin are allochthon waters from the outside. These are surface waters collected from the Pilica river and displaced by the 1st order watershed and groundwater from the deep storage zone. The stable inflow of allochthon waters and changes in the way of supplying most of the city's left-sided creeks depend on the seasonal distribution of the outflow. They also contribute to changes of the maximum and the minimum runoff, as well as the transformation of the river flow regime and the annual hydrographs (mean value and extremes).

Over the last 65 years, the mean and low flows of the Ner in the Dąbie water-gauge have been increasing (Fig. 2). They decreased and increased simultaneously with the concentration ratio (GMO), seasonal index (Is) and annual flow variability coefficient (WsZm) – Fig.3-5. Only the half-outflow term indicator TPO has remained relatively stable over time. Medium and extreme annual flow hydrographs also changed (Fig. 7, 9, 10). In the years 1983-2014, compared to the previous period, daily low flows significantly increased. This change concerned the entire year. Mean daily flows slightly decreased in autumn and winter, and increased in spring. Daily maxima of the cool half-year (XI-IV) markedly decreased, but at the same time, daily maxima in the warm half-year (V-X) increased. As a result, flow variability over the years decreased and the regime of the river has changed from nivo-pluvial into pluvio-nival.