



University of Białystok  
Faculty of Biology

The author of the PhD dissertation: Katarzyna Puczko

**Nutrients circulation specificity in the urbanised area:  
a case study in Białystok city**

**PhD dissertation**  
abstract

Supervisor: PhD Elżbieta Jekatierynczuk-Rudczyk

Białystok 2020

## Streszczenie

Łądowa faza obiegu wody jest skomplikowanym procesem, na który oddziałuje szereg czynników zarówno meteorologicznych, jak i tych związanych ze środowiskiem przyrodniczym zlewni. Zgodnie z koncepcją kontinuum rzeczno (River Continuum Concept – RCC), rzeki to złożone i bardzo dynamiczne ekosystemy, w których komponenty abiotyczne i biotyczne wchodząc we wzajemne interakcje zmieniają się stopniowo od źródeł do ujścia (Vannote et al. 1980). Na obszarach przekształconych antropogenicznie ciągłość i strefowość ekosystemów rzecznych jest zakłócona. Alternatywą dla RCC stała się koncepcja nieciągłości seryjnej (Serial Discontinuity Concept – SDC) (Ward and Stanford, 1995). Uwzględnia ona wpływ oddziaływań w wymiarze lateralnym i wertykalnym na zmiany ekosystemu rzeczno w profilu podłużnym.

Szczególnym przypadkiem są zlewnie położone na obszarach zurbanizowanych, gdzie zróżnicowanie pokrycia terenu ma swoje odbicie w jakości hydrosfery. Charakter zlewni wpływa przede wszystkim na przebieg lądowej fazy obiegu wody. Zlewnia o ograniczonych zdolnościach infiltracyjnych powoduje nasilenie spływu powierzchniowego i przepływów maksymalnych. Naturalne drogi spływu w zlewni zurbanizowanej są zwykle zastępowane bądź „uzupełniane” uszczelnionymi kanałami burzowymi lub innymi elementami inżynierskich systemów odwadniających. Zubożenie zasobów wód gruntowych prowadzi do zmniejszenia niskich przepływów w rzekach i utratę kontaktu hydraulicznego koryta z wodami podziemnymi (Chmiel 2005). Dodatkowo, na obszarach przekształconych antropogenicznie, częstym problemem są zanieczyszczenia wód powierzchniowych i podziemnych. Wody miejskie cechują się wysoką zawartością biogenów i materii organicznej, co w połączeniu z niewielkim natlenieniem prowadzi do zmniejszenia różnorodności biologicznej (Marsalek et al. 2008).

W ramach rozprawy doktorskiej analizowałam kilka aspektów kształtowania się jakości wody na obszarze zurbanizowanym. Badaniami objęłam obszary źródliskowe, początkowe odcinki rzek, rzeki w środkowym i dolnym biegu oraz stawy położone na terenie Białegostoku.

Istotnym elementem obiegu wody w mieście są obszary źródliskowe. Niewiele miast w Polsce może poszczycić się występowaniem tak cennych obiektów hydrograficznych. W czasie kartowania hydrologicznego zarejestrowałam 11 nisz źródliskowych i opisałam 5 z nich

położonych na obszarze miejskim i podmiejskim Białegostoku (Załącznik 1). Prowadzone analizy wykazały istotny wpływ czynników antropogenicznych na jakość płytkich wód podziemnych. Zaobserwowano wyższe wartości pH, przewodnictwa elektrolitycznego, jonów chlorkowych oraz siarczanów (VI) w porównaniu do wielkości tych samych parametrów w płytkich wodach podziemnych położonych na terenie Parku Krajobrazowego Puszczy Knyszyńskiej (PKPK). Moje badania pokazały, że płytkie wody podziemne charakteryzują się większą stabilnością warunków fizyczno-chemicznych w porównaniu do rzek, co szczególnie widać w przypadku związków azotu i fosforu. Na terenie Białegostoku woda rzeczna wykazywała większe przekształcenia fizyczno-chemiczne niż woda ze źródeł. Wody powierzchniowe charakteryzowały się wyższymi wartościami przewodnictwa elektrolitycznego, wyższym stężeniem biogenów i rozpuszczonej materii organicznej w porównaniu do wartości tych parametrów w wodach podziemnych. Na podstawie współczynnika zmienności policzonego w półroczu zimowym i letnim stwierdzono, iż w półroczu zimowym obserwuje się mniejsze wahania parametrów chemicznych wody niż w półroczu letnim. Zależność ta była szczególnie widoczna dla związków azotu i fosforu w źródłach. Większa stabilność hydrochemiczna jest istotnym czynnikiem decydującym o występowaniu krenofitów (Kucharski 2007). Porównanie bogactwa gatunkowego roślin naczyniowych i mszaków w niszach źródłiskowych Białegostoku i na obszarze PKPK potwierdziło słuszność tezy o wciąż wysokim stopniu naturalności źródeł w mieście. Obecność krenofitów obligatoryjnych oraz gatunków chronionych w niszach źródłiskowych sugeruje potrzebę ochrony prawnej tych obiektów.

Podstawowe różnice w obiegu wody na obszarach naturalnych i przekształconych antropogenicznie wynikają z uszczelnienia zlewni. Istotnym czynnikiem kształtującym jakość wody na obszarze miejskim jest heterogeniczność zlewni. W swoich badaniach wykorzystałam model HERCULES stworzony przez Prof. Mary Cadenasso i współpracowników na Uniwersytecie w Kalifornii (Cadenasso et al. 2007, Zhou et al. 2011) (Załącznik 2). Jest to model opisujący heterogeniczność krajobrazu miejskiego, który uwzględnia takie elementy przestrzeni miejskiej jak: zabudowania (typologię i pokrycie), powierzchnie otwarte (odsłoniętą strefę aeracji, wybetonowane powierzchnie oraz obiekty hydrologiczne: doliny rzek, zbiorniki wodne) oraz tereny zielone (zadrzewienia, zakrzaczenia i trawniki). Szczegółowe analizy geoprzestrzenne skonfrontowane z jakością wody z 5 letniego okresu badań pokazały, że ograniczona infiltracja i nasilenie spływu powierzchniowego, wynikające z uszczelnienia strefy aeracji, były głównymi czynnikami wpływającymi na pogorszenie jakości wody w rzekach i stawach terenu miejskiego. Przejawiało się to wzrostem stężenia związków

fosforu oraz węgla organicznego. Odsłonięta strefa aeracji wpływała na mniejsze dostawy jonów do wody i w efekcie obniżenie wartości przewodnictwa elektrolitycznego. Zadrzewienia i zakrzaczenia pełniły funkcję strefy buforowej ograniczając spływ związków azotowych do wód powierzchniowych.

Ważnym czynnikiem w analizie zmian jakości wody są ekstremalne zjawiska hydrometeorologiczne, będące przedmiotem badań klimatologów i hydrologów. W swojej pracy analizowałam wpływ niskich stanów wody, wezbrań nawałnych i rozlewnych na jakość wód lotycznych i lenitycznych w Białymstoku (Załącznik 3). Na podstawie szczegółowych danych meteorologicznych i hydrologicznych pozyskanych z baz danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej stwierdziłam, iż lata 2014, 2015 charakteryzowały się niewielką dynamiką stanów wód i natężenia przepływów wody. W 2015 roku zaobserwowano najniższe stany wód i najniższe przepływy. Lata 2016 i 2017 charakteryzowały się większą dynamiką hydrologiczną i wystąpieniem ekstremalnych przepływów i stanów wody wynikających z gwałtownych zjawisk meteorologicznych. Daty poboru próbek wody pokryły się z wystąpieniem ekstremów hydrologicznych. Niskie stany wody uchwycono w czerwcu i sierpniu 2015 roku. W czerwcu zaobserwowano średni niski przepływ, zaś w sierpniu najniższy niski przepływ. W przypadku wezbrań, woda została pobrana po opadzie nawałnym – w maju 2017 i po opadzie rozlewnym w sierpniu 2017. Opad nawałny to 9 godzinne intensywne opady deszczu, które spowodowały podniesienie się wód do poziomu 385 cm, a natężenie przepływu w rzece Białej osiągnęło wartość 12 m<sup>3</sup>/s. Opad rozlewny skutkowało wzrostem poziomu wody w rzece do 267 cm i przepływem 1,3m<sup>3</sup>/s. Największy wpływ ilości opadu na jakość wody zanotowano w rzekach. Większość związków chemicznych ulegała rozcieńczeniu (wyjątek stanowią związki fosforu i rozpuszczonego węgla organicznego (DOC), których stężenie wzrastało). Wzrost stężenia form fosforu zanotowano też w wodach limnicznych. W płytkich wodach podziemnych, po wystąpieniu opadu zanotowano wzrost stężenia DOC, azotanów, siarczanów, żelaza reaktywnego i wszystkich form fosforu. Analiza jakości wody w profilu zamykającym rzekę Białą w trakcie wezbrań pokazała, że większość związków uległo rozcieńczeniu, a podczas niskich stanów wód te same związki uległy zatężeniu. Wyjątkiem od powyższej reguły były związki węgla i fosforu, których stężenie podczas wezbrania wzrosło, a zmalało w okresie niskich stanów wody. Allochtoniczny dopływ związków węgla i fosforu ze spływem powierzchniowym stanowił dominujące źródło tych związków w wodach powierzchniowych zlewni miejskiej. Inaczej przedstawiała się reakcja zawartości biogenów w wodzie na opad nawałny i rozlewny. Opad nawałny skutkowało natychmiastowym wzrostem zawartości związków węgla i fosforu, które dostały się do wód ze spływem powierzchniowym.

Po opadzie rozlewnym te same związki uległy rozcieńczeniu. Opad rozlewny generował spływ powierzchniowy o mniejszym natężeniu, co wpływało na niewielką dostawę związków węgla i fosforu ze zlewni i rozcieńczenie związków w rzece. Odwrotnie zachowały się związki azotowe, które po opadzie nawalnym uległy rozcieńczeniu. Wzrost natlenienia wody po opadzie rozlewnym zintensyfikował procesy nityfikacji, co przyczyniło się do wzrostu stężenia związków azotu w wodzie.

Szczegółowe analizy jakości płytkich wód podziemnych, rzek i stawów na terenie miasta potwierdziły negatywny wpływ urbanizacji na jakość wody, przy czym stopień przekształcenia zależał od typu wód. Płytkie wody podziemne, o lepszych parametrach fizyczno-chemicznych wody, miały ograniczony wpływ na jakość wód powierzchniowych, tym bardziej, że modyfikacje koryt rzecznych na terenie zurbanizowanym lokalnie ograniczają kontakt hydrauliczny wód gruntowych z wodami powierzchniowymi. Każde ekstremum hydro-meteorologiczne rzutowało na jakość wody powodując pojawianie się skrajnych wartości parametrów fizyczno-chemicznych wody. Wzrost częstości występowania powodzi błyskawicznych, które skutkują paraliżem miasta, zmusza lokalne władze do działania. Obecność licznych terenów zielonych, zrealizowane i realizowane projekty renaturyzacji rzek i stawów świadczą o właściwym kierunku zmian prowadzących do zwiększenia retencji wodnej i poprawy jakości wody na obszarze Białegostoku.

## Abstract

The land phase of the hydrological cycle is complex and influenced by a number of factors, both meteorological and related to the natural environment of the catchment area. According to the river continuum concept (RCC), rivers are highly dynamic ecosystems in which the abiotic and biotic components interact gradually (Vannote et al. 1980). In the anthropogenically transformed areas, most rivers experience breaks or discontinuities in the continuum, and the zonation of the river ecosystem is disturbed. A later alternative to RCC is the serial discontinuity concept of Ward and Stanford (1995) that considers the impact of interaction between the lateral and vertical dimensions on changes in the river ecosystem along its longitudinal profile.

The diversification of land cover is reflected in the quality of the hydrosphere in urbanised catchments and affects the course of the land phase of the hydrological cycle. A catchment with limited infiltration capacity caused an increase in surface runoff and maximum flow. Natural runoff is usually replaced by sealed storm sewers or other elements of engineered drainage systems. Depletion of groundwater reduces low flows in rivers and promotes loss of hydraulic contact with groundwater (Chmiel 2005). Urban runoff, streams, and waterways frequently experience contamination. Urbanised catchments can contain nutrients and organic matter as pollution which, combined with low oxygenation, reduces biodiversity (Marsalek et al. 2008).

Within my doctoral studies, I investigated several factors that influence water quality in an urbanised area. The study area included natural springs, the headwaters of rivers, the middle and lower reaches of rivers, and ponds located in the city of Białystok, Poland.

Natural springs are an important element in the hydrological cycle in Białystok. Few cities in Poland take pride in the presence of such valuable hydrographic features. Based on the conducted crenological mapping in the urban and suburban areas of Białystok, the presence of 11 spring niches was found and 5 of them were described (Appendix 1). The analysis showed that anthropogenic factors influence the quality of shallow groundwater. Values of pH, electrolytic conductivity, chloride ions, and sulphates (VI) were higher in Białystok than in the same parameters in shallow groundwater located in the Knyszyn Forest Landscape Park

(KFLP). The results show that shallow groundwater has greater stability of physical-chemical conditions compared to rivers, especially noticeable in the case of nitrogen and phosphorus compounds. River water showed greater physical and chemical transformations than water from springs. Surface waters were characterised by higher values of electrolytic conductivity and higher concentrations of nutrients and dissolved organic matter (DOM) compared to these parameters in shallow groundwater. The coefficients of variation were calculated and found to differ as a function of time of year (season). It was found that in the winter period, fewer fluctuations in the chemical parameters of the water were documented compared to the summer period. This pattern was particularly noticeable for nitrogen and phosphorus compounds in spring water. Greater hydro-chemical stability was an important factor controlling the occurrence of crenophytes (Kucharski 2007). Comparison of species richness of vascular plants and bryophytes in spring niches of Białystok and KFLP confirmed the validity of the hypothesis that naturalness of the environment is high in the springs in the city. The presence of obligatory crenophytes and protected species in spring niches suggests the need for legal protection of these organisms.

The hydrological cycle in natural and anthropogenically-modified areas differ with the land cover of the catchment area. An ecological approach facilitates understanding the fine structure of surface water networks in urban areas. Catchment heterogeneity is an important factor influencing the water quality in the urban area. In my research, I used the HERCULES model—an urban landscape classification system—created by Professor Mary Cadenasso and colleagues at the University of California (Cadenasso et al. 2007, Zhou et al. 2011, Appendix 2). The model integrates built and natural components and helps clarify the structure of urban heterogeneity. The model considers elements of urban space such as buildings (typology and cover), open areas (exposed aeration zone, concrete surfaces, and hydrological features: river valleys, water reservoirs), and green areas (trees, bushes, and lawns). Detailed geospatial analysis combined with water quality data from the five-year research period showed that limited infiltration and intensity of surface runoff resulted from the permeability of the aeration zone and were the main factors contributing to the deterioration of water quality in rivers and ponds in Białystok and manifested by increased concentrations of phosphorus compounds and organic carbon. The exposed aeration zone resulted in a low supply of ions to the water causing a reduction in electrolytic conductivity values. The trees and bushes act as a buffer zone, limiting the runoff of nitrogen compounds to surface waters.

Extreme hydro-meteorological events can negatively impact water quality, so it is a common subject of research by climatologists and hydrologists. The aim of my research was to

show how the physical and chemical parameters of lotic and lentic waters in Białystok change after heavy precipitations, intense continuous rainfall, and drought conditions (Appendix 3). Based on meteorological and hydrological data obtained from databases of the Institute of Meteorology and Water Management in Poland, I conclude that the years 2014 and 2015 were characterised by low water levels and low intensity of water flow. The lowest water levels and the lowest flows were observed in 2015. The years 2016 and 2017 were characterised by greater hydrological dynamics, extreme water flows, and water levels resulting from extreme meteorological phenomena. The water sampling dates coincided with the occurrence of hydrological extremes. Low water levels were captured in June and August 2015. Other water samples were collected after a flash flood in May 2017. Heavy rainfall caused a rise of 385 cm in water level, and the flow rate reached a value of  $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Continuous rain in August 2016 increased the water level to 267 cm and a flow of  $1.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

The rivers had the greatest impact on water quality. Most of the chemical compounds were diluted (with the exception of phosphorus and dissolved organic carbon (DOC) compounds, the concentrations of which increased). An increase in the concentration of phosphorus forms was also noted in limnic waters. While in shallow groundwater, an increase in concentrations of DOC, nitrates, sulphates, reactive iron, and all forms of phosphorus was observed. Analysis of water quality in the final profile of the Biala River during floods showed that most of the compounds were diluted. During low water levels, the same compounds were concentrated. Carbon and phosphorus compounds were exceptions to this trend; instead, the concentrations of these compounds increased during the flood stage and decreased during periods of low water levels. The allochthonous carbon and phosphorus compounds that inflow with surface runoff were the dominant source of these compounds in the surface waters of the urban catchment. Depending on whether there is continuous or storm precipitation, we observe changes in concentrations of nutrients. Heavy rainfall resulted in an abrupt increase in the content of carbon and phosphorus compounds, which were transported with the surface runoff. Continuous rainfall resulted in dilution of these compounds because of less intense surface runoff, which produced only a small supply of carbon and phosphorus compounds from the catchment area. The nitrogen compounds behaved in the opposite way. Continuous rainfall resulted in the concentration of nitrogen compounds, while these compounds were diluted after heavy precipitation. The increase in water oxygenation after continuous rainfall intensified the nitrification process which in turn increased the concentration of nitrogen compounds in the water.



The variability in physical-chemical parameters of shallow groundwater, river water, and ponds confirmed the negative impact of urbanisation on water quality as a function of limnic or lotic types. Shallow groundwater, with better physical and chemical parameters, had a limited impact on the quality of surface water. Modifications of riverbeds in an urbanised area locally limit the hydraulic contact of groundwater with surface waters. Each hydro-meteorological extreme had an impact on the water quality, causing the appearance of extreme values in both physical and chemical parameters of the water. The increasing frequency of flash floods, which can paralyse Białystok and forces local authorities to act. Development of green areas along rivers and ponds prove to be an appropriate solution leading to restoration, increased water retention, and improved water quality in the city.