

Koncepcja możliwości kształtowania bioretencji w zlewni Serafy z wykorzystaniem analiz przestrzennych naturalnych dróg spływu wód opadowych

The concept of formability of bioretention in the Serafa catchment using spatial analyses of natural rainwater runoff paths

KRZYSZTOF MUSZYŃSKI, IZABELA GODYŃ, ANNA PORĘBSKA, KINGA RACOŃ-LEJA

DOI 10.36119/15.2022.7-8.8

Postępująca urbanizacja oraz zmiany klimatyczne sprawiły, że w wielu miastach nasila się występowanie poważnych zagrożeń powodzią rzeczno- i opadowymi. Powszechnie stosowane zabiegi w ochronie przed powodzią mają charakter rozwiązań technicznych, dominują postępowania ograniczające zagrożenie w miejscach wylewów w dolnych partiach zlewni. Tymczasem na występowanie zagrożenia powodziowego ma wpływ cała zlewnia położona powyżej. Jednym z istotnych rozwiązań ograniczania zagrożenia powodziowego jest przywracanie i rozwój retencji, w tym retencji naturalnej – bioretencji. Proponowane w niniejszej pracy podejście zlewniowe pozwala na rozwiązywanie problemów „u źródła” ich powstawania. Metoda uwzględnia analizy stanu bioretencji i opracowania koncepcji jej rozwoju, które bazuje na ocenie uszczelnienia, spływu powierzchniowego oraz istniejących terenów zielonych. W ramach niniejszej pracy poddano analizie fragment zlewni rzeki Serafa w Krakowie i Wieliczce w zakresie istniejących zasobów naturalnej retencji, możliwości odtworzenia ciągłości naturalnych dróg spływu i bioretencji w celu minimalizacji zagrożenia od powodzi.

Przykładowa aplikacja zaproponowanego narzędzia opartego na ogólnie dostępnych danych i oprogramowaniu pokazuje możliwość uwzględnienia w praktyce przybliżonych zależności procesu opad-retencja-odpływ w obszarze miasta, w efekcie pokazując jak rozwój bioretencji w wyżej położonych obszarach może wpłynąć na redukcję zagrożenia powodziowego na terenie Bieżanowa. Szacunkowe obliczenie wielkości spływu powierzchniowego powstającego w każdym obrębie ewidencyjnym i zagregowanie spływów z obrębów zlokalizowanych powyżej może dostarczyć urbanistom niezbędnych informacji do prac studialnych dla potrzeb planowania przestrzennego, w tym rozwoju zieleni.

Słowa kluczowe: uszczelnienie, spływ powierzchniowy, zagrożenie powodziowe, bioretencja, ścieżki spływu, adaptacja do zmian klimatu, planowanie przestrzenne i urbanistyczne

Due to the progressive urbanization and climate change, in many cities the occurrence of serious threats of fluvial and pluvial floods is increasing. Commonly used flood protection measures are technical solutions, and the procedures to reduce the risk in flooding places in the lower parts of the catchment area are dominant.

Meanwhile, the occurrence of flood risk is influenced by the entire catchment area located upstream. One of the important solutions to reduce the risk of flooding is the restoration and development of retention, including natural retention – bioretention. The catchment approach proposed in this paper allows to solve problems “at the source” of their formation. The method takes into account the analysis of the state of bioretention and the elaboration of a concept for its development, which is based on the assessment of sealing, surface runoff and existing green areas. As part of this study a fragment of the Serafa River catchment in Krakow and Wieliczka was analyzed in terms of the existing natural retention resources, the possibility of restoring the continuity of natural runoff routes and bioretention in order to minimize the risk of flooding. The exemplary application of the proposed tool based on publicly available data and software demonstrates the possibilities to consider in practice the approximate dependencies of the precipitation-retention-runoff process in an urban area, as a result showing how the

dr inż. Krzysztof Muszyński <https://orcid.org/0000-0003-0073-789X>, dr inż. Izabela Godyń <https://orcid.org/0000-0002-2749-1167> – Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska, dr inż. arch. Anna Porębska <https://orcid.org/0000-0001-7939-9947> – Katedra Architektury Miejsc Pracy Sportu i Usług, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska, dr hab. inż. arch. Kinga Racoń-Leja, prof. PK, <https://orcid.org/0000-0003-4762-8404> – Katedra Urbanistyki i Architektury Struktur Miejskich, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska. Adres do korespondencji/ Corresponding author: krzysztof.muszynski@pk.edu.pl

development of bioretention in upstream areas can reduce the flood risk in Biezanów. Estimating the amount of surface runoff generated in each cadastral unit and aggregating the runoff from the upstream units may provide urban planners with the necessary information for study work for the purposes of spatial planning, including greenery development.

Keywords: sealing, surface runoff, flood risk, bioretention, runoff paths, adaptation to climate change, spatial and urban planning

Wprowadzenie

W celu przeciwdziałania skutkom zmian klimatu oraz poprawy jakości życia, miasta opracowują m.in. plany adaptacji do zmian klimatu oraz programy rozwoju zieleni. Jednak brak efektywnych narzędzi analitycznych może prowadzić do powstania chaotycznych koncepcji, które pomimo zaplanowanych licznych działań mogą nie przynieść oczekiwanych rezultatów. Postępująca urbanizacja determinuje zmiany w cyklu hydrologicznym: uszczelnienie powierzchni zlewni powoduje zmniejszenie infiltracji, intercepcji i parowania, kosztem zwiększenia spływu powierzchniowego co w efekcie zwiększa ryzyko powodzi i podtopień w obszarach miejskich [9, 21, 23]. Rozszerzające się obszary zabudowy mieszkaniowej i towarzyszącej jej infrastruktury drogowej powodują znaczące przyspieszenie odpływu wód opadowych po powierzchni terenu do studni kanalizacji deszczowej i sanitarnej oraz bezpośrednio do cieków powierzchniowych. Występowanie gwałtowniejszych i bardziej nierównomiernych czasowo i przestrzennie zjawisk atmosferycznych (m.in. nawalne deszcze z coraz wyższą amplitudą i niższą częstotliwością występowania) oraz wzmożona urbanizacja przestrzeni miejskich determinują zagrożenia podtopieniami i powodziami opadowymi.

Badania miały na celu wskazać na możliwość poprawy w zakresie koordynowania hydro-urbanistycznego systemu [20] chroniąc obszary mieszkaniowe i dziedzictwa kulturowego [26]. W artykule zostało przedstawione podejście, które w oparciu o dostępne otwarte źródła danych oraz ogólnodostępne oprogramowanie pozwala na szybką i skuteczną analizę planistyczną terenów biologicznie czynnych. Zaproponowana metodyka została zaimplementowana dla fragmentu zlewni Serafy od źródła do przekroju osiedla Biezanów w Krakowie – obszarze o wysokim zagrożeniu powodziami rzecznyymi i opadowymi.

Metodyka badań

Do oceny wpływu zmiany użytkowania gruntów na bilans wodny wykorzystywane są m.in.: metoda SCS-CN [11, 13,

27, 32], model SWAT [12, 17, 24], modele oparte na analizach GIS [10, 19, 22], a także inne podejścia szacujące spływ powierzchniowy oraz bilans wody zlewni [1, 4, 18]. W ww. podejściach poziom uszczelnienia jest odzwierciedlany przez współczynnik spływu, który jest określany jako stosunek wielkości spływu z danej powierzchni do ilości opadu, która spadła na tę powierzchnię [14, 15]:

$$\psi = \frac{Q_{spf}}{Q_{opad}} < 1 \quad (1)$$

gdzie:

ψ – współczynnik spływu,
 Q_{spf} – wielkość spływu powierzchniowego z danej powierzchni [m^3/s],
 Q_{opad} – wielkość opadu na daną powierzchnię [m^3/s].

Wartość współczynnika spływu ściśle zależy od pokrycia/sposobu zagospodarowania terenu, dodatkowo ważny wpływ na jego wielkość ma także spadek terenu. W uproszczonych szacunkach wielkości spływu, wartości współczynnika spływu przyjmowane są wg danych literaturowych. W niniejszej pracy wykorzystano dane literaturowe wielkości współczynników spływu (Ψ) wg [5].

Dla obszarów o wielu klasach/typach użytkowania gruntów można oszacować średni współczynnik spływu (średnia ważona powierzchniowo) [4, 28]:

$$\Psi_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

gdzie:

i – i -ty podobszar o danym typie użytkowania gruntów,
 n – całkowita liczba typów użytkowania gruntów w zlewni,
 ψ_i – współczynnik spływu oparty na literaturze dla i -tej klasy użytkowania gruntów,
 A_i – wielkość podobszaru dla i -tej klasy użytkowania gruntów w analizowanym obszarze [m^2].

Współczynnik spływu może być wykorzystany do oszacowania spływu powierzchniowego z danego obszaru [4, 7, 8, 28]:

$$Q_{spf} = \alpha \cdot \psi_{sr} \cdot A \cdot I \quad (3)$$

gdzie:

α – współczynnik przeliczeniowy jednostek zależny od przyjętej jednostki czasu,
 I – natężenie opadu, [mm/jedn. czasu],
 pozostałe j.w.

Analiza zagospodarowania, w tym powierzchni bioretencyjnych, została przeprowadzona z wykorzystaniem ogólnodostępnych danych przestrzennych BDOT [3], danych katastralnych obrębów ewidencyjnych [2] oraz oprogramowania GIS. Wszystkim wyodrębnionym obszarom przyporządkowano współczynniki spływu Ψ wg [5] na podstawie informacji zawartych w BDOT: rodzajów zagospodarowania (klas obiektów) oraz dodatkowej informacji zawartej w szczegółowych cechach poszczególnych obiektów (m.in. rodzaj obiektu, rodzaj roślinności, rodzaj wykorzystanego materiału, rodzaj powierzchni i charakter poszczególnych obszarów). Ponadto uwzględniono spadek powierzchni poszczególnych obiektów z uwzględnieniem wysokości terenu na podstawie Numerycznego Modelu Terenu (NMT).

Zazwyczaj analizy pozwalają na interpretację procesów hydrologicznych zachodzących w układzie hydrograficznym, tj. w wytyczonych zgodnie z MPHP granicach wododziałów zlewni elementarnych. Do celów planistycznych i dla potrzeb zagospodarowania przestrzennego operowanie jednostkami hydrologicznymi – zlewniami jest dla urbanistów niepraktyczne, z tego powodu w niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie znanych urbanistom i planistom jednostek administracyjnych – obrębów ewidencyjnych. Są to podstawowe, powszechnie stosowane i wystarczająco duże powierzchniowo jednostki podziału powierzchni kraju, które w swoich granicach zawierają rozpoznawalne fragmenty dzielnic bądź całe dzielnice, których granice stanowią najczęściej ciągi komunikacyjne (drogi, tory). Propozycja przejścia z jednostek hydrograficznych na obręby ewidencyjne (z zachowaniem stosownych danych), wnosi dodatkowe informacje dla urbanistów i planistów w decyzjach dotyczących

zmian istniejącego oraz planowania przyszłego zagospodarowania przestrzeni miejskiej w zakresie gospodarowania wodami opadowymi.

Wyniki badań

Opis obszaru badań

Analizowany obszar to fragment zlewni Serafy, zlokalizowany w województwie małopolskim w południowo-wschodniej części miasta Krakowa oraz północno-zachodniej części miasta i gminy Wieliczka. Wybrany fragment Serafy jest zlewnią obszaru krakowskiego osiedla Biezańów, podlegającego w ostatnich kilkunastu latach systematycznym podtopieniom [16], w tym wielokrotnie w 2021 r. (m.in. 24 maj, 5-7 i 31 sierpień, 4 październik).

Przyjęty do badań obszar zlewni Serafy obejmuje Serafę do ujścia Drwiny Długiej oraz dopływy Serafy: Malinówkę, Potok Grabówkę i Potok Krzyszkowice. Zgodnie z podziałem MPHP na tym obszarze wyodrębniła się 7 zlewni elementarnych o łącznej powierzchni 2956,15 ha, są to zlewnie: Malinówka, Potok Grabówka, Potok Krzyszkowice, Serafa do Potoku Grabówka, Serafa od Potoku Grabówka do Potoku Krzyszkowice, Serafa od Potoku Krzyszkowice do Malinówki, Serafa od Malinówki do Drwiny Długiej.

Analiza uszczelnienia zlewni

Przygotowany zestaw danych pozwolił na zobrazowanie całego badanego obszaru w podziale na obręby ewidencyjne. W formie mapowej na rysunku 1 przedstawiono uśrednione współczynniki spływu Ψ dla poszczególnych obrębów

ewidencyjnych z jednoczesnym wyszczególnieniem uszczelnienia poszczególnych klas obiektów BDOT.

Rzeczywiste uśrednione współczynniki spływu Ψ dla badanego obszaru wskazują na jego bardzo silne zurbanizowanie, tylko 3 obręby (nr 97, 98, 99 znajdujące się w górnej zlewni Malinówki) posiadają Ψ mniejsze od 0,7, natomiast Ψ wyższe od 0,7 odnotowuje się dla wszystkich pozostałych obrębów, osiągając najwyższe wartości dla obrębów zlokalizowanych w najniższych obszarach badanego obszaru – obejmujących osiedle Biezańów (nr 100 i 101). Jest to wynik silnej urbanizacji i poważny problem w zagospodarowaniu zlewni rzeki Serafa, w szczególności spowodowany ilością i rodzajem nieprzepuszczalnych materiałów wykorzystywanych w zbudowanych ciągach komunikacyjnych oraz otoczenia kompleksów mieszkaniowych i usługowych z jednoczesnym brakiem wystarczającej powierzchni terenów zadrzewionych. Tak zorganizowana zabudowa zlewni powoduje znaczące przyśpieszenie odpływu wód opadowych bezpośrednio do istniejących studzienek kanalizacji deszczowej oraz pośrednio do odbiorników, którymi są cieki powierzchniowe [6, 21, 30, 31, 33].

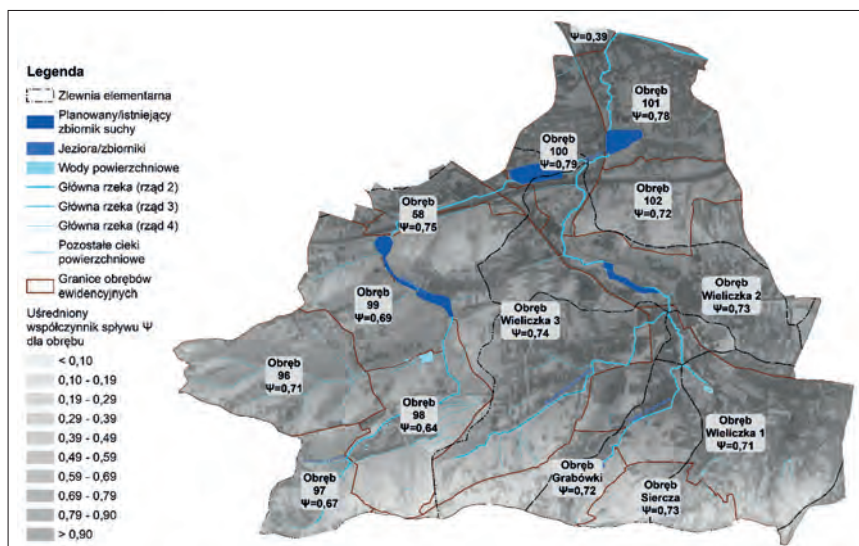
Skutkiem są cyklicznie występujące podtopienia w całości badanego obszaru. Dane interwencji Państwowej Straży Pożarnej (PSP) z lat 2018-2020, mających na celu likwidację przyboru lub podtopienia pochodzącego od wody opadowej i rzecznej wskazują, że najwyższa łączna ich ilość wystąpiła w obrębach Wieliczka 1, Wieliczka 2 i Wieliczka 3 – odpowiednio 74, 40 i 15 zdarzeń oraz w obrębach

100, 101 i 102 w Krakowie (głównie osiedle Biezańów) – odpowiednio 7, 26 i 9 przypadków interwencji. Dla pozostałego obszaru łącznie zliczono 17 przypadków interwencji PSP.

W zlewni Serafy istnieją obręby, w granicach których nie przepływają cieki powierzchniowe (Wieliczka 2) lub przepływają tylko w niewielkim fragmencie, na skraju obszaru (Wieliczka 1). W takich obszarach kluczową rolę odgrywają sieci kanalizacji deszczowej oraz infrastruktura towarzysząca, w postaci np. przepływowych zbiorników retencyjnych. Zlewnia źródłowa rzeki Serafa, Serafa do Potoku Grabówka znajduje się niemal w całości w granicach obrębu ewidencyjnego Wieliczka 1. Obręb ten stanowi bardzo dobry przykład silnie zurbanizowanego i uszczelnionego obrębu w górnym biegu rzeki Serafa z $\Psi=0,71$, który obsługiwany jest tylko i wyłącznie przez sieć kanalizacji deszczowej. Gospodarka wodami deszczowymi na tym obszarze koncentruje się głównie na modernizacji i rozbudowie istniejącego, niewydolnego systemu kanalizacji deszczowej, a nie na gromadzeniu wody i naturalnym spowolnieniu jej odpływu.

Analiza obszarów biologicznie czynnych

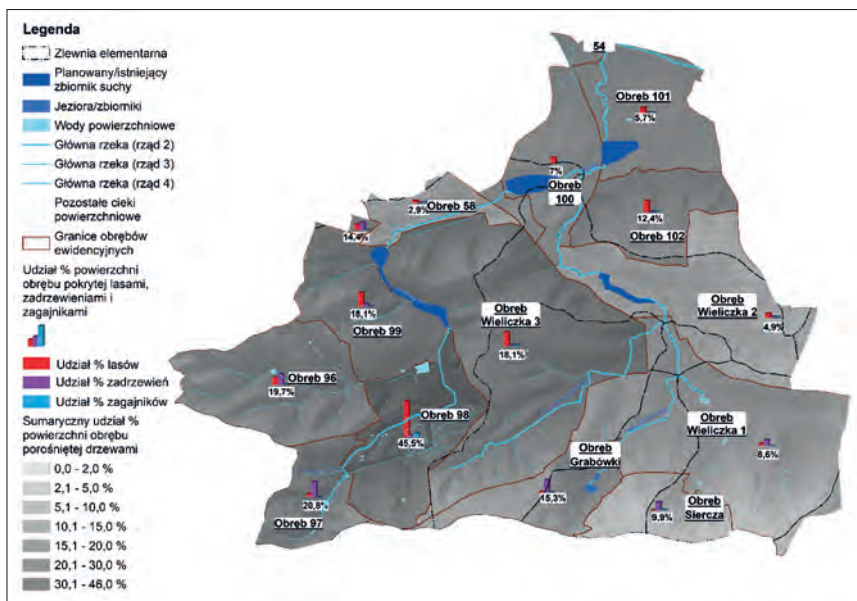
W kolejnym etapie przeprowadzono analizę powierzchni biologicznie czynnych w poszczególnych obrębach ze szczególnym uwzględnieniem terenów porośniętych drzewami (kategoria PTLZ w BDOT), które mają duże znaczenie dla procesów retencji bądź spowolnienia odpływu. Rysunek 2 przedstawia modulację koloru reprezentującą sumaryczny udział powierzchni porośniętej drzewami (lasy, zadrzewienia i zagajniki) w każdym obrębie ewidencyjnym na badanym obszarze. Analiza wykazuje, że obszary porośnięte drzewami zajmują niewielką powierzchnię zlewni, tylko w jednym obrębie (nr 98) odnotowuje się ponad 45% powierzchni z drzewami. Wyraźnie widoczne są jaśniejsze odcienie w obrębach Wieliczka 1 i Wieliczka 2 będących najbardziej narażonymi na podtopienia (wg danych PSP z lat 2018-2020), a szacowana powierzchnia obszaru porośniętego drzewami to odpowiednio: 43,44 ha i 19,80 ha, co stanowi 8,6% i 4,9% powierzchni tych obrębów. W obrębach pozbawionych drzew znacząco bardziej zostały zakłócone naturalne procesy hydrologiczne, woda opadowa odprowadzana jest po uszczelnionych powierzchniach zgodnie ze spadkiem terenu do niżej zlokalizowanych obszarów, potęgując tym samym zagrożenie powstawania powodzi



Rysunek 1.

Analiza uszczelnienia powierzchni obrębów ewidencyjnych dla analizowanego obszaru górnej zlewni rzeki Serafa

Figure 1. Analysis of the sealing of the surface of cadastral units for the analyzed area of the upper Serafa River catchment



Rysunek 2.
Analiza udziału procentowego terenów porośniętych drzewami – lasy, zadrzewienia i zagajniki w analizowanych obrębach ewidencyjnych obszaru górnej zlewni rzeki Serafa
Figure 2. Analysis of the share of areas covered with trees – forests, wooded areas and groves in the analyzed cadastral units of the upper Serafa River catchment

Tabela 1. Symulowany spływ powierzchniowy w analizowanych obrębach ewidencyjnych (q) oraz skumulowany (Q)
Table 1. Simulated surface runoff in the analyzed cadastral units (q) and cumulative surface runoff (Q)

Nr obrębu	Zlewnia elementarna	Lokalizacja obrębu	Symulowany średnioroczny spływ aktualny		Symulowany spływ średnioroczny wg wariantu A		Symulowany spływ średnioroczny wg wariantu B	
			Skumulowany spływ z całej zlewni Q [dam3]	Jednostkowy spływ z obrębu q [dam3]	Skumulowany spływ z całej zlewni Q [dam3]	Jednostkowy spływ z obrębu q [dam3]	Skumulowany spływ z całej zlewni Q [dam3]	Jednostkowy spływ z obrębu q [dam3]
94	Malinówka	źródłowy 1	23.25	23.25	23.25	23.25	20.05	20.05
95	Malinówka	źródłowy 1	42.95	42.95	42.95	42.95	36.95	36.95
96	Malinówka	źródłowy 1	399.65	376.41	399.65	376.41	329.54	309.49
99	Malinówka	złączenie 2	730.33	287.73	730.33	287.73	604.34	237.86
97	Malinówka	źródłowy 1	173.08	170.89	173.08	170.89	141.66	139.56
98	Malinówka	złączenie 2	472.93	299.85	472.93	299.85	417.29	275.62
Wieliczka 3	Malinówka	złączenie 3	1485.21	281.95	1485.21	281.95	1263.35	241.72
60	Malinówka	źródłowy 1	7.58	7.58	7.58	7.58	6.41	6.41
58	Malinówka	złączenie 2	181.11	173.53	181.11	173.53	168.02	161.61
57	Malinówka	złączenie 4	1715.91	49.59	1715.91	49.59	1479.78	48.41
Grabówki	Potok Grabówka	źródłowy 1	84.56	84.56	84.56	84.56	70.29	70.29
Siercza	Potok Grabówka	źródłowy 1	96.6	24.4	96.6	24.4	80.97	20.46
Wieliczka 1	Potok Grabówka	złączenie 2	336.1	154.61	336.1	154.61	290.92	139.4
Grabówki	Potok Krzyszkowice	źródłowy 1	159.58	159.58	159.58	159.58	132.65	132.65
Wieliczka 1	Potok Krzyszkowice	złączenie 2	299.44	139.86	299.44	139.86	258.75	126.11
Wieliczka 3	Potok Krzyszkowice	złączenie 3	959.57	660.13	959.57	660.13	824.72	565.96
Siercza	Serafa	źródłowy 1	96.93	24.72	96.93	24.72	81.24	20.73
Wieliczka 1	Serafa	złączenie 2	915.72	819.11	915.72	819.11	819.53	738.56
Wieliczka 2	Serafa	źródłowy 1	63.64	63.64	63.64	63.64	56.1	56.1
Wieliczka 1	Serafa Potok Krzyszkowice Potok Grabówka	złączenie 5	2362.14	87.11	2362.14	87.11	2069.82	78.55
Wieliczka 2	Serafa	złączenie 6	2966.91	604.77	2966.91	604.77	2602.95	533.13
Wieliczka 3	Serafa	źródłowy 1	195.07	195.07	195.07	195.07	167.25	167.25
100	Serafa	złączenie 7	3248.37	86.39	3237.77	75.79	2845.98	75.79
100	Malinówka Serafa	złączenie 8	5086.31	122.03	5060.74	107.05	4432.82	107.05
100	Serafa	złączenie 9	5245.41	159.1	5200.31	139.57	4572.39	139.57
Wieliczka 2	Serafa	źródłowy 1	58.86	58.86	58.86	58.86	51.89	51.89
102	Serafa	złączenie 2	332.59	273.73	332.59	273.73	285.16	233.27
56	Serafa	źródłowy 1	33.03	33.03	33.03	33.03	29.74	29.74
101	Serafa	odpływ 10	6059.67	448.64	5950.68	384.75	5272.04	384.75

i podtopień – kumulacja negatywnych skutków jest szczególnie widoczna w obrębach 100 i 101 – na terenie osiedla Bieżanów, które zamyka analizowany fragment zlewni. Działania polegające na rozbudowie infrastruktury systemu odwodnienia odcciążają lokalnie problematyczne obszary, powodując jednak przesunięcie zagrożenia powodziowego na niżej położone obręby.

Analiza spływu powierzchniowego w układzie hydrograficznym i obrębów ewidencyjnych

W tabeli 1 przedstawiono rezultat przeniesienia wyników analizy spływu powierzchniowego wykonanej dla zlewni elementarnych, na proponowane jednostki administracyjne – obręby ewidencyjne. Tabela przedstawia szacunkowy średni roczny spływ powierzchniowy dla każdego obrębu. Z uwagi na znacząco zdegradowaną antropogeniczną powierzchnię terenu w zlewniach miejskich, obszary

obrębów ewidencyjnych, które nie pokrywają się w całości obszaru z granicami wododziałów, zostały poddane geoprze-strzennej analizie, polegającej na ich dopasowaniu do granic poszczególnych zlewni elementarnych. Przyjęto zasadę, że obręby zostaną docięte z wykorzystaniem działek ewidencyjnych, na których zlokalizowane są główne ciągi drogowe lub kolejowe. Taki sposób wydaje się rozwiązaniem najłatwiejszym do przeprowadzenia, ponadto uwzględnią całe fragmenty zagospodarowania (osiedla, parki, zespoły zabudowań itp.) łącznie z infrastrukturą kanalizacji deszczowej, z których woda spływa w ustalonym kierunku. Spływ powierzchniowy został obliczony na podstawie średniej rocznej sumy opadów ze stacji klimatologicznej Kraków – Obserwatorium z okresu 1981-2015, w wysokości 670 mm/rok [25] oraz wyznaczonych średnich współczynników spływu Ψ dla poszczególnych obrębów, wg wzoru (3). Dla obrębów poddanych podziałowi spływ skalkulowano proporcjonalnie do jego powierzchni.

Tabela 1 prezentuje spływ powierzchniowy w [dam^3] z konkretnego obszaru obrębu oraz skumulowany spływ uwzględniający całość wód opadowych spływających w granicach danej zlewni z obrębów powyżej. Autorzy uważają, że taki przegląd będzie łatwym w odbiorze i czytelnym zestawieniem procesu spływu powierzchniowego wewnątrz obrębów ewidencyjnych. Z wykorzystaniem analiz obrębowych spływu powierzchniowego, jednostki planistyczne i urbanistyczne posiadają wiedzę w zakresie ilości wód powierzchniowych dopływających do obszarów o niższych średnich wysokościach n.p.m. Tym samym analiza taka umożliwia zaplanowanie przestrzenne ewentualnych dróg spływu z wykorzystaniem terenów zadrzewionych oraz niebiesko-zielonej i szarej infrastruktury oraz ułatwi zbilansowanie przepływu wód powierzchniowych w całej zlewni.

Warianty rozwoju bioretencji

Przeprowadzono symulacje dwóch hipotetycznych wariantów działań naprawczych, które mogłyby być podjęte przez miasta Kraków i Wieliczka w odpowiedzi na zagrożenie powodziowe występujące w rejonie gęsto zabudowanego osiedla mieszkaniowego Bieżanów (obręby 100 i 101). Wariant A dotyczy prowadzenia działań naprawczych tylko w obrębach 100 i 101, natomiast wariant B polega na prowadzeniu działań naprawczych zarówno w obrębach 100 i 101 oraz we wszystkich obrębach zlokalizowanych po-

wyżej. Symulowane działania naprawcze polegają na zwiększeniu zadrzewienia i nasadzeniu roślinności wysokiej na terenach niezagospodarowanych. Założono, że 20% istniejących powierzchni terenów biologicznie czynnych porośniętych roślinnością niską (trawy, krzewy) oraz 20% terenów posesji i upraw na gruntach rolnych, zostanie zadrzewionych.

W analizie spływu uwzględniono wielkość retencji terenów leśnych i zadrzewionych, czyli wody opadowej zatrzymanej i wykorzystanej do procesów biologicznych przez drzewa i krzewy. Odpływ z terenów porośniętych drzewami jest równomierny i spowolniony, a efekt retencyjny na powierzchni 1 ha terenu lasu wynosi $9,05 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{rok}$ dla obszaru zalesionego w 1% powierzchni [29]. Na wielkość średniego odpływu rocznego mają wpływ składowe powierzchni obszarów zieleni, obszarów drzew i krzewów, terenów zagospodarowanych, obliczonych skorygowanych (spadek terenu, wykorzystane materiały, charakter zabudowy) współczynników spływu powierzchniowego Ψ oraz ilość pozostałych terenów biologicznie czynnych (zieleni miejska, trawniki, uprawy rolne). Średni spływ oznacza więc wartość przybliżoną, stanowiącą jednak odwzorowanie rzeczywistego zagospodarowania badanych zlewni elementarnych. Nie uwzględniono wielkości ewentualnych dopływów wód opadowych transportowanych kanalizacją deszczową na obszar przedmiotowych obrębów z zewnątrz. Wyniki analizy przedstawia tabela 1, gdzie obręby umieszczono zgodnie z kolejnością spływu (lokalizacja obrębu): źródłowy oraz złączenie – obręb na powierzchni którego łączą się spływy, wraz z numeracją (1 – obr. źródłowy położony najwyżej, 10 obr. odpływ położony najniżej).

Średni roczny spływ z badanego fragmentu wlewni rzeki Serafa wynosi obecnie $6059,67 \text{ dam}^3$ wody rocznie. Symulowany spływ dla wariantu A w obrębie 101, został zmniejszony o $108,99 \text{ dam}^3$ (1,8%), podczas gdy realizacja tak samo szerokiego zakresu działań na całym analizowanym obszarze, pozwala zredukować odpływ o $787,63 \text{ dam}^3$ (13%). Powyższa zgrubna analiza dwóch wariantów porównuje efekty lokalnej i holistycznej (zlewniowej) ingerencji w istniejące zagospodarowanie powierzchni z wykorzystaniem dostępnych i ogólnie znanych technik. Podejście rozwiązania problemu podtopień występujących na osiedlu Bieżanów (obręby 100 i 101) przedstawione w wariantcie A ukazuje niewłaściwy sposób planowania, który jest daleko niewy-

starczającym i nie generującym korzystnych efektów. Wariant B, czyli podejście holistyczne polegające na systemowym postępowaniu, wykorzystującym symulacje hydrologiczne oraz poprawne rozwiązania planistyczne, jest właściwym działaniem. Działania przedstawione w wariantcie B wymagają wyższych nakładów finansowych, jednak uzyskany efekt w postaci 13% redukcji spływu wód opadowych, może przynieść wymierne korzyści w zakresie minimalizacji wystąpienia ryzyka podtopień, a co za tym idzie zmniejszenia strat powodziowych. Ponadto przeprowadzone nasadzenia roślinności, zwłaszcza drzew będzie stanowić czynnik minimalizujący miejskie wyspy ciepła, tym samym regulując wilgotność i temperaturę powietrza w otoczeniu.

Powyższe założenia nie zwiększają terenów biologicznie czynnych, nie eliminują obecnego uszczelnienia powierzchni, a jedynie zastępują niską roślinność trawiastą drzewami. Nasadzenia powinny być prowadzone zgodnie z **wytyczonymi drogami spływu powierzchniowego**. Do planowania lokalizacji skoncentrowanych dróg spływu należy możliwie kompletnie wykorzystać istniejący system terenów biologicznie czynnych. Na rysunku 3 został przedstawiony badany obszar z naniesionym systemem skoncentrowanych dróg spływu powierzchniowego (SDSP), który wyznaczono z wykorzystaniem NMT i modelu SWAT (*The Soil & Water Assessment Tool*). Nałożenie wyników analizy na aktualne zagospodarowanie obszaru zlewni rzeki Serafa ukazuje brak spójności i jednorodności terenów biologicznie czynnych. Jednocześnie widać, że główne i boczne SDSP w górnych obrębach układają się przeważnie w pozostałościach terenów leśnych i zadrzewionych (PTLZ) jak pokazuje szczegół (b) na rysunku 3, zachowując ciągłość spływu wód opadowych. Szczegół (a) ukazuje natomiast obszar zurbanizowany blisko centrum miasta Wieliczka, gdzie widać fragmentaryczne odcinki terenów PTLZ, podzielone zabudową mieszkaniową i drogową. Wytyczone SDSP lokalizują kierunki odpływu wód w dolne partie zlewni, umożliwiając tym samym rozpoznanie błędów planistycznych i urbanistycznych. Dążenie do spójności i powiązania istniejących fragmentów oraz tworzenie nowych powierzchni biologicznie czynnych będzie stanowić w przyszłości o minimalizacji zagrożenia powodziowego. Realizacja działań naprawczych w wariantcie B, polegających na nasadzeniach drzew na powierzchni 20% istniejących powierzchni biologicznie czynnych, powinna być prowadzona

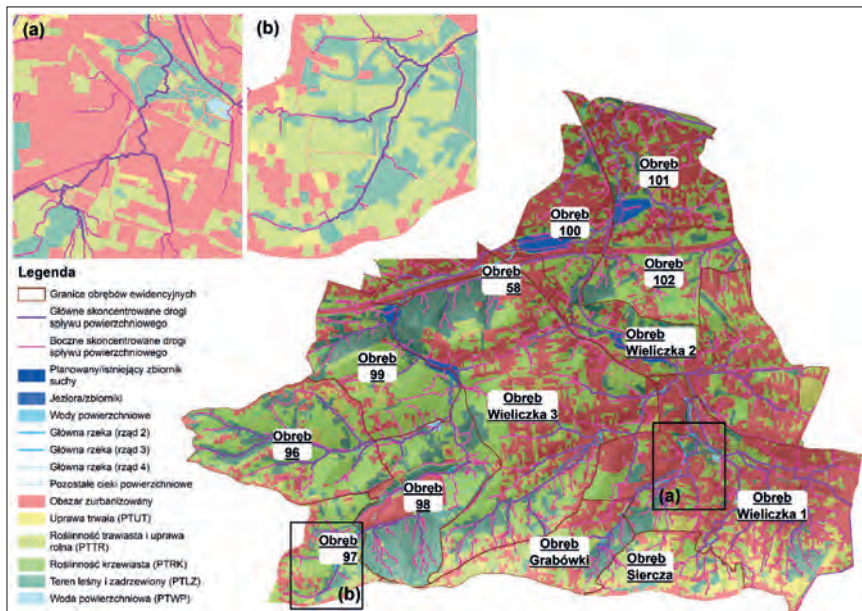
z uwzględnieniem wytyczonych SDSP, co zwłaszcza w obszarach silnie zurbanizowanych, może się okazać zadaniem bardzo trudnym lub niemożliwym bez udziału lokalnej społeczności i wykorzystania rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury (*blue-green infrastructure BGI*) umożliwiającej częściową odbudowę naturalnych dróg spływu powierzchniowego, przy czym ich zastosowanie stworzy dodatkowe warunki sprzyjające poprawie mikroklimatu w przestrzeniach silnie zurbanizowanych.

Koordinacja planistyczna skomplikowanego systemu hydro-urbanistycznego z uwzględnieniem zaprezentowanych w artykule narzędzi może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa obszarów zamieszkania. Planowanie działań obniżających ryzyko podtopień i powodzi, a także szerzej rozumianych jako adaptacyjnych do zmian klimatycznych, powinno uwzględniać konieczność racjonalnego gospodarowania wodami opadowymi, w tym poprzez kierowanie możliwie jak największej ilości wód opadowych na tere-

zadrzewionych, zdaniem autorów przynosi urbanistom niezbędne informacje do prac studialnych dla potrzeb sporządzenia i aktualizacji planów rozwoju zieleni, miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego oraz studium uwarunkowań i kierunków przestrzennego zagospodarowania gminy. Obecnie te najważniejsze lokalne dokumenty planistyczne nie posiadają w swojej treści zapisów związanych z koniecznością zachowania miejsc dla bezpiecznego spływu wód opadowych. Gospodarowanie wodami opadowymi w przestrzeniach miejskich powinno stać się równie ważnym elementem mającym wpływ na planowanie przestrzenne obszarów zurbanizowanych, tak jak ma to miejsce w przypadku ochrony powietrza (systemy przewietrzania miasta).

LITERATURA

- [1] Bai T., Borowiak K., Wu Y., Zhang J. (2021) Highly Resolved Runoff Path Simulation Based on Urban Surface Landscape Layout for Sub-Catchment Scale. *Water* 13:1345. doi: 10.3390/w13101345
- [2] Dane GUGiK – Państwowy Rejestr Granic (PRG) <http://www.geoportal.gov.pl>. Dostęp: 24-11-2021
- [3] Dane PZGiK – Główny Urząd Geodezji i Kartografii – Portal Gov.pl. <https://www.gov.pl/web/gugik/dane-pzgiik4>. Dostęp: 24-11-2021
- [4] Dhakal N., Fang X., Cleveland T.G., Thompson D.B., Asquith W.H., Marzen L.J. (2012) Estimation of Volumetric Runoff Coefficients for Texas Watersheds Using Land-Use and Rainfall-Runoff Data. *J Irrig Drain Eng* 138:43–54. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000368
- [5] Edel R. (2017) Odwodnienie dróg, Wydanie 4. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności
- [6] Falaciński P., Szarek Ł. (2019) Analiza pracy układu do retencji wody opadowej na terenie obiektu P+R w Warszawie, doi: 10.22630/PNIKS.2019.28.3.42
- [7] Godyń I., Grela A., Stajno D., Tokarska P. (2020) Sustainable Rainwater Management Concept in a Housing Estate with a Financial Feasibility Assessment and Motivational Rainwater Fee System Efficiency Analysis. *Water* 12:151. doi: 10.3390/w12010151
- [8] Godyń I., Muszyński K., Grela A. (2022) Assessment of the Impact of Loss-of-Retention Fees on Green Infrastructure Investments. *Water* 14:560. doi: 10.3390/w14040560
- [9] Guzha A.C., Rufino M.C., Okoth S., Jacobs S., Nóbrega R.L.B. (2018) Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *J Hydrol Reg Stud* 15:49–67. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.11.005
- [10] Hernández-Guzmán R., Ruiz-Luna A., Mendoza E. (2020) Sara4r: an R graphical user interface (GUI) to estimate watershed surface runoff applying the NRCS – curve number method. *J Hydroinformatics* 23:76–87. doi: 10.2166/hydro.2020.087
- [11] Hu S., Fan Y., Zhang T. (2020) Assessing the Effect of Land Use Change on Surface Runoff in a Rapidly Urbanized City: A Case Study of the Central Area of Beijing. *Land* 9:17. doi: 10.3390/land9010017



Rysunek 3.
Analiza dróg spływu powierzchniowego w badanym obszarze górnej zlewni rzeki Serafa
Figure 3. Analysis of surface runoff paths in the area of the upper Serafa River catchment

Podsumowanie i wnioski

Prace koncepcyjne i planistyczne z zakresu urbanistyki i planowania przestrzennego na poziomie lokalnym są prowadzone z uwzględnieniem podziału na obręby ewidencyjne, często bez uwzględnienia ich wzajemnych powiązań wynikających z hydrografii. Stosowanie takiego podejścia przyczynia się do wzrostu problemów wynikających z podtopień i powodzi. Poziom zagrożenia powodziowego w danym obrębie może być wynikiem zagospodarowania i nieprawidłowej gospodarki wodami opadowymi na terenach położonych powyżej. Obręby powinny być traktowane jako zależne od siebie, głównym tego powodem jest spadek powierzchni terenu skierowany do cieku powierzchniowego, a więc ewentualne działania planistyczne podjęte dla obrębów ewidencyjnych powinny uwzględniać spadek i kierunek spływu powierzchniowego wód deszczowych do lokalnych zagłębień terenu oraz do rowów i cieków powierzchniowych.

ny biologicznie czynne, które stanowią naturalną pojemność bioretencyjną. Odtwarzanie i kształtowanie terenów biologicznie czynnych, m.in. poprzez nasadzenia roślinności i drzew, powinno być prowadzone z uwzględnieniem topografii danego obrębu oraz obrębów znajdujących się poniżej, do których wody opadowe będą spływać zgodnie z naturalnym i przeobrażonym w wyniku zabudowy spadkiem terenu.

Zaprezentowane w niniejszej pracy podejście do możliwości kształtowania bioretencji, to narzędzie oparte na ogólnie dostępnych danych i oprogramowaniu, które umożliwia interpretację procesów hydrologicznych zachodzących w przestrzeniach zurbanizowanych. Szacunkowe obliczenie wielkości spływu powierzchniowego powstającego w każdym obrębie i zagregowanie spływów z obrębów powyżej oraz analiza zagospodarowania i topografii terenu wraz z rozpoznaniem skoncentrowanych dróg spływu powierzchniowego (SDSP) i fragmentów obszarów

- [12] Hunink J.E., Droogers P., Kauffman S., Mwaniki B.M., Bouma J. (2012) Quantitative simulation tools to analyze up – and downstream interactions of soil and water conservation measures: Supporting policy making in the Green Water Credits program of Kenya. *J Environ Manage* 111:187–194. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2012.07.022
- [13] Jahan K., Pradhanang S.M., Bhuiyan M.A.E. (2021) Surface Runoff Responses to Suburban Growth: An Integration of Remote Sensing, GIS, and Curve Number. *Land* 10:452. doi: 10.3390/land10050452
- [14] Jawgiel K. (2018) Porównanie wybranych metod wyznaczania współczynnika spływu powierzchniowego stosowanych w Polsce i Europie na przykładzie urozmaiconej struktury Poznania. *Gospodarka wodna* 2018/3
- [15] Królikowska J., Królikowski A. (2012) Wody opadowe – odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie (Jadwiga Królikowska, Andrzej Królikowski) Wydawnictwo Seidel-Przywecki. Seidel Przywecki
- [16] Leja M., Racoń-Leja K. (2013) Wokół dworu Czczów czyli ilustrowana historia Bieżanowa: napisana dla miłośników Bieżanowa w wieku od 5 do 105 lat. *Dom Kultury "Podgórze"*
- [17] Leta M.K., Demissie T.A., Tränckner J. (2021) Hydrological Responses of Watershed to Historical and Future Land Use Land Cover Change Dynamics of Nashe Watershed, Ethiopia. *Water* 13:2372. doi: 10.3390/w13172372
- [18] Liang S., Greene R. (2020) A high-resolution global runoff estimate based on GIS and an empirical runoff coefficient. *Hydrol Res* 51:1238–1260. doi: 10.2166/nh.2020.132
- [19] Manchado C., Roldán-Valcarce A., Jato-Espino D., Andrés-Doménech I., Moreno G., Isabel M., Rojas R. (2021) ArcDrain: A GIS Add-In for Automated Determination of Surface Runoff in Urban Catchments. *Int J Environ Res Public Heal* 2021, Vol 18, Page 8802 18:8802. doi: 10.3390/IJERPH18168802
- [20] Matusik A., Racoń-Leja K., Gyurkovich M., Dudzic-Gyurkovich K. (2020) Hydrourban spatial development model for a resilient inner-city: the example of Gdańsk. *ACE Archit City Environ* 15:1–21. doi: 10.5821/ACE.15.43.9211
- [21] McGrane S.J. (2016) Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrol Sci J* 61:2295–2311. doi: 10.1080/02626667.2015.1128084
- [22] Niyazi B.A., Masoud M.H., Ahmed M., Basahi J.M., Rashed M.A. (2020) Runoff assessment and modeling in arid regions by integration of watershed and hydrologic models with GIS techniques. *J African Earth Sci* 172:103966. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103966
- [23] O'Driscoll M., Clinton S., Jefferson A., Manda A., McMillan S. (2010) Urbanization Effects on Watershed Hydrology and In-Stream Processes in the Southern United States. *Water* 2:605–648. doi: 10.3390/w2030605
- [24] Patil N.S., Nataraja M. (2020) Effect of land use land cover changes on runoff using hydrological model: a case study in Hiranayakeshi watershed. *Model Earth Syst Environ* 6:2345–2357. doi: 10.1007/s40808-020-00808-8
- [25] Plan Adaptacji Miasta Krakowa do zmian klimatu do roku 2030, Kraków 2022 r., https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=114317
- [26] Porębska A., Godyrń I., Radzicki K., Nachlik E., Rizzi P. (2019) Built Heritage, Sustainable Development, and Natural Hazards: Flood Protection and UNESCO World Heritage Site Protection Strategies in Krakow, Poland. *Sustain* 2019, Vol 11, Page 4886 11:4886. doi: 10.3390/SU11184886
- [27] Psomiadis E., Soulis K.X., Efthimiou N. (2020) Using SCS-CN and Earth Observation for the Comparative Assessment of the Hydrological Effect of Gradual and Abrupt Spatiotemporal Land Cover Changes. *Water* 2020, Vol 12, Page 1386 12:1386. doi: 10.3390/W12051386
- [28] Radecki-Pawlik A., Wałęga A., Wojtkowski J., Pijanowski J. (2014) Runoff formation in terms of changes in land use – Mściwojów water reservoir area. *J Water L Dev* 23:3–10. doi: 10.1515/jwld-2014-0024
- [29] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 15 lipca 2021 r. w sprawie przyjęcia Planu przeciwdziałania skutkom suszy. *Dz.U.* 2021 poz. 1615
- [30] Sriwongsitanon, N.; Taesombat, W. (2011) Effects of land cover on runoff coefficient. *J. Hydrol.* 2011, 410, 226–238, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.021
- [31] Todeschini S. (2016) Hydrologic and Environmental Impacts of Imperviousness in an Industrial Catchment of Northern Italy. *J. Hydrol. Eng.* 2016, 21, 05016013, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001348
- [32] Wałęga A., Amatiya D.M., Caldwell P., Marion D., Panda S. (2020) Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. *J Hydrol Reg Stud* 27:100645. doi: 10.1016/J.EJRH.2019.100645
- [33] Wałęga A.; Radecki-Pawlik A.; Cupak A.; Hathaway J.; Pukowiec M. (2019) Influence of Changes of Catchment Permeability and Frequency of Rainfall on Critical Storm Duration in an Urbanized Catchment—A Case Study, Cracow, Poland. *Water*, 11, 2557, doi: 10.3390/w11122557

