



---

**WYDZIAŁ ROLNICTWA I LEŚNICTWA**

**Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych**

**Dyscyplina: Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**

**mgr inż. arch. kraj. Ewelina Pochodyła-Ducka**

**Rozprawa doktorska**

**Błękitno-zielona infrastruktura jako kluczowy element gospodarowania wodą opadową  
na obszarach zurbanizowanych**

**Blue-Green Infrastructure as a Crucial Part of Rainwater Management in Urbanized  
Areas**

**Praca wykonana w Katedrze Gospodarki Wodnej i Klimatologii  
oraz Katedrze Architektury Krajobrazu**

**pod kierunkiem**

promotor prof. dr hab. inż. Katarzyny Glińskiej-Lewczuk  
Katedra Gospodarki Wodnej i Klimatologii  
oraz promotor dr hab. inż. Agnieszki Jaszczak, prof. UWM  
Katedra Architektury Krajobrazu  
Wydział Rolnictwa i Leśnictwa  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

## **Wykaz artykułów naukowych składających się na rozprawę doktorską**

Rozprawę doktorską stanowiącą spójny tematycznie zbiór artykułów naukowych tworzą trzy opublikowane oryginalne prace naukowe oraz jedna w trakcie procedury wydawniczej:

**P1. Pochodyła Ewelina**, Glińska-Lewczuk Katarzyna, Jaszczak Agnieszka 2021. Blue-green infrastructure as a new trend and an effective tool for water management in urban areas. *Landscape Online*, 92:1-20, <https://doi.org/10.3097/LO.202192>. Punktacja MNISW: 100 pkt.

**P2. Pochodyła Ewelina**, Jaszczak Agnieszka, Illes Juraj, Kristianova Katarina, Joklova Viera 2022. Analysis of green infrastructure and nature-based solutions in Warsaw – selected aspects for planning urban space. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 25(1) 44-50, <https://doi.org/10.2478/ahr-2022-0006>. Punktacja MNISW: 5 pkt.

**P3. Pochodyła-Ducka Ewelina**, Glińska-Lewczuk Katarzyna, Jaszczak Agnieszka 2023. Changes in Stormwater Quality and Heavy Metals Content along the Rainfall-Runoff Process in an Urban Catchment. *Water*, 15(19): 3505, <https://doi.org/10.3390/w15193505>. IF: 3.4. Punktacja MNISW: 100 pkt.

**P4. Pochodyła-Ducka Ewelina**, Burandt Paweł, Glińska-Lewczuk Katarzyna 2024. GIS-Based Framework for Assessing Priority Locations for Blue-Green Infrastructure Implementation in Urban Areas. *Land Degradation and Development*, 000 (złożona do opublikowania w czasopiśmie) IF: 4.7; Punktacja MNISW: 200 pkt.

Mój indywidualny wkład w powstanie przedstawionych powyżej prac naukowych jest wiodący. Ponadto, we wszystkich pracach jestem pierwszym autorem. Oświadczenia współautorów prac wraz z określeniem indywidualnego wkładu w ich powstanie zostały zamieszczone w załączniku.

## **Spis treści**

Wykaz skrótów.....	4
Streszczenie.....	5
Abstract .....	6
1. Wstęp.....	7
2. Cel i zakres badań .....	10
3. Hipotezy badawcze .....	12
4. Metodyka badań .....	13
5. Wyniki badań .....	21
6. Dyskusja wyników .....	33
7. Podsumowanie i wnioski .....	37
Spis literatury .....	40
Spis tabel .....	45
Spis rysunków .....	46

## Wykaz skrótów

BZI – błękitno-zielona infrastruktura

GUGiK – Główny Urząd Geodezji i Kartografii

CLMS – *Copernicus Land Monitoring Service*

UA – *Urban Atlas Land Cover*

BDOT10K – Baza Danych Obiektów Topograficznych

KIUT – Krajowa Integracja Uzbrojenia Terenu

DP – próbka wody opadu bezpośredniego (ang. *direct precipitation*)

RR – próbka wody z powierzchni dachu (ang. *roof runoff*)

SR – próbka wody z powierzchni drogi (ang. *surface runoff*)

SC – próbka wody z kolektora burzowego (ang. *stormwater collector*)

RU – próbka wody rzecznej przed kolektorem burzowym (ang. *river upstream*)

RD – próbka wody rzecznej za kolektorem burzowym (ang. *river downstream*)

ADP – liczba dni suchych poprzedzających opad (ang. *antecedent dry period*)

SpCond – przewodnictwo elektrolityczne

TDS – całkowita ilość substancji rozpuszczonych w wodzie

fDOM – fluorescencyjna rozpuszczona materia organiczna

GIS – system informacji geograficznej

LUSIA – ang. *Land Use Indicator Analysis*

I\_LU – wskaźnik przeważającego sposobu użytkowania terenu

I\_IMP – wskaźnik stopnia uszczelnienia powierzchni

I\_BH – wskaźnik średniej wysokości zabudowy

I\_BF – wskaźnik gęstości zabudowy

I\_EX – wskaźnik wykluczenia

## **Streszczenie**

Błękitno-zielona infrastruktura (BZI) stanowi kluczowe narzędzie w zarządzaniu wodami opadowymi na obszarach miejskich, ograniczając negatywne konsekwencje urbanizacji. Postępująca ekspansja miast, prowadzi bowiem do wzrostu udziału powierzchni nieprzepuszczalnych, które zaburzają cykl hydrologiczny.

Głównym celem badań realizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej było określenie potrzeb i możliwości wdrożenia odpowiednich elementów BZI jako sposobu zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi w miastach.

W wyniku analizy literaturowych baz danych stwierdzono istotny wzrost zainteresowania BZI jako efektywnym narzędziem mitygującym skutki nadmiernego uszczelnienia powierzchni na obszarach zurbanizowanych. Wyniki badań przeprowadzonych na obszarze Warszawy oraz Olsztyna, wykazały, że dynamika zmian struktury użytkowania terenów miejskich jest niekorzystna hydrologicznie. Powierzchnie nieprzepuszczalne, ograniczając infiltrację, umożliwiają spływ zanieczyszczeń antropogenicznych wraz ze spływem powierzchniowym bezpośrednio do miejskich ekosystemów wodnych, zwiększając tym samym ryzyko ich degradacji. Postępująca urbanizacja wymusza więc konieczność interwencji zgodnie z założeniami zrównoważonego rozwoju. Wykazano, że należy dążyć do implementacji BZI w miastach. W celu usprawnienia procesu planowania BZI opracowano model LUSIA, którego działanie jest oparte na zdefiniowanych w GIS wskaźnikach urbanistycznych, wskazujących na przeważający sposób użytkowania terenu, stopień uszczelnienia, średnią wysokość oraz gęstość zabudowy.

**Słowa kluczowe:** błękitno-zielona infrastruktura, urbanizacja, uszczelnienie, zarządzanie wodą opadową, zrównoważony rozwój

## **Abstract**

Blue-green infrastructure (BGI) is an important tool in rainwater management in urban areas, reducing the negative consequences of urbanization. The progressive expansion of cities, leads to an increase in the proportion of impervious surfaces that disrupt the hydrological cycle.

The main objective of the study carried out within the framework of this dissertation was to identify the needs and opportunities for implementing appropriate BGI elements as a solution of sustainable rainwater management in an urban environment.

An analysis of literature databases found a significant increase in interest in BGI as an effective tool for mitigating the effects of excessive surface sealing in urban areas. The results of the studies conducted in Warsaw and Olsztyn, showed that the dynamics of changes in the structure of urban land use is hydrologically unfavorable. Impervious surfaces, by limiting infiltration, allow the transport of anthropogenic pollutants with surface runoff directly into urban aquatic ecosystems, thereby increasing the risk of their degradation. Progressive urbanization therefore forces the need for intervention in accordance with the tenets of sustainable development. It has been shown that the implementation of BGI in cities should be pursued. In order to improve the BGI planning process, the LUSIA model was developed, the operation of which is based on urban indicators defined in GIS, indicating the prevailing land use, degree of sealing, average height and building density.

**Key words:** blue-green infrastructure, urbanization, imperviousness, rainwater management, sustainability development

# 1. Wstęp

Postępująca urbanizacja jest nieuniknionym procesem gwarantującym dostosowanie przestrzeni miejskiej do aktualnych trendów demograficznych. Według raportu opublikowanego przez United Nations (2018) w 1950 r. obszary miejskie zamieszkiwało 30% populacji, w 2018 r. – 55%. Prognozuje się, że do 2050 r. obszary zurbanizowane będzie zamieszkiwało 68% populacji. Aby zminimalizować negatywne efekty nasilającego się zjawiska urbanizacji należy przywrócić procesowi rozwoju miast w sposób holistyczny i adaptacyjny. Należy więc dążyć do integracji wiedzy naukowej oraz doświadczenia praktycznego. Skutecznym wskaźnikiem monitorowania rozwoju urbanizacji jest ocena zmian powierzchni nieprzepuszczalnych. Ma to związek z zaburzeniami naturalnego cyklu hydrologicznego i zanieczyszczeniem zbiorników wodnych (Szewrański i in., 2018). Udział powierzchni nieprzepuszczalnych w strukturze miasta traktowany jest jako jeden ze wskaźników oceny jakości środowiska miejskiego, który może uzasadniać celowość działań dążących do minimalizacji negatywnych skutków urbanizacji. Biorąc pod uwagę zmiany rozmieszczenia, wielkości, a także geometrii powierzchni nieprzepuszczalnych, możliwe jest określenie dynamiki i kierunków intensywnych przemian krajobrazu miejskiego (Wang i in., 2023; Weng, 2012).

Powszechnie uznaje się za FISRWG<sup>1</sup> (1998), że w warunkach naturalnych 50% wody opadowej infiltruje, z czego 25% to infiltracja głęboka. Natomiast 40% opadu podlega ewapotranspiracji, a pozostała część, czyli 10% odpływa powierzchniowo. Na obszarach, gdzie powierzchnie nieprzepuszczalne pokrywają ponad 75% powierzchni, jedynie 10% wody opadowej infiltruje, przy czym jest to w głównej mierze infiltracja płytka. Na proces ewapotranspiracji przypada 30% wody. W rezultacie, woda opadowa w 60% spływa po nieprzepuszczalnych powierzchniach wypłukując z nich wszelkie zanieczyszczenia (Zevenbergen i in. 2011).

Należy zwrócić uwagę, że w procesie opad-odpływ istotna jest droga jaką przebywa woda opadowa zanim zasili wody powierzchniowe. Mimo tego, że woda opadowa pochłania zanieczyszczenia już w trakcie fazy atmosferycznej cyklu hydrologicznego (Tomaszewska i Olszowski, 2012), to po kontakcie z podłożem stężenie zanieczyszczeń stopniowo wzrasta, osiągając kulminacyjną wartość przy ujściu systemu kanalizacyjnego do odbiornika. Ze względu na ograniczoną naturalną infiltrację, spływ powierzchniowy zawierający ładunek

---

<sup>1</sup> The Federal Interagency Stream Restoration Working Group

zanieczyszczeń pochodzenia miejskiego, staje się zagrożeniem dla ekosystemów wodnych (Corsi i in., 2010; Kasperek i in., 2013; McIntyre i in., 2014; Nelson i in., 2009).

W celu zminimalizowania negatywnych efektów urbanizacji konieczne jest zastosowanie odpowiednich metod i narzędzi gospodarowania wodą w miastach. W kontekście zaburzeń cyklu hydrologicznego i konsekwencji jakie to ma dla środowiska, ważne jest więc podejmowanie działań, które mogą zwiększyć możliwość infiltracji. Dlatego też, strategie takie jak *Low-impact development*<sup>2</sup> (LID) oraz *Nature-based solutions*<sup>3</sup> (NbS) są kluczowe. Z założenia, LID skupia się na zarządzaniu wodami opadowymi, podczas gdy NbS koncentrują się na wykorzystaniu naturalnych ekosystemów. U podstaw realizacji tych strategii znajdują się m.in. elementy błękitno-zielonej infrastruktury (BZI), której idea i zasady zostały przedstawione w dokumentach Komisji Europejskiej (2011; 2013; 2015; 2017). Istnieje wiele definicji BZI, jednak większość autorów powołuje się na definicję przedstawioną w komunikacie Komisji Europejskiej „*Zielona infrastruktura – zwiększanie kapitału naturalnego Europy*”<sup>4</sup> z 2013 r. BZI, to „(...) strategicznie zaplanowana sieć obszarów naturalnych i półnaturalnych z innymi cechami środowiskowymi, zaprojektowana i zarządzana w sposób mający zapewnić szeroką gamę usług ekosystemowych. Obejmuje ona obszary zielone (lub niebieskie w przypadku ekosystemów wodnych) oraz inne cechy fizyczne obszarów lądowych (w tym przybrzeżnych) i morskich”.

Ze względu na wielopłaszczyznowe korzyści jakie zapewnia BZI, w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania tymi rozwiązaniami (Almaaitah i in., 2021; Senes i in., 2021), zarówno w badaniach naukowych, ale także działaniach edukacyjnych, czy popularyzatorskich, mających na celu uświadomienie społeczności na temat istniejących problemów, ale też efektywnych rozwiązań. Jednak mimo badań oraz wzrastającej liczby projektów uwzględniających BZI w Europie i na świecie, wciąż brakuje metod wskazujących kierunki działań wdrożeniowych dla rozwiązań BZI, dopasowanych do specyfiki danego obszaru.

Poruszane w niniejszej rozprawie doktorskiej zagadnienia są odpowiedzią na konieczność opracowania metody i rozwiązań BZI dostosowanych do lokalnych warunków środowiskowych i planistycznych. Jednocześnie, przez odpowiednie modyfikacje, opracowane

---

<sup>2</sup> Rozwój o niskim wpływie na środowisko.

<sup>3</sup> Rozwiązania oparte na naturze.

<sup>4</sup> Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów *Zielona infrastruktura — zwiększanie kapitału naturalnego Europy* COM/2013/0249 final.



przykłady dla Warszawy i Olsztyna mogą stanowić modelowy sposób postępowania na innych obszarach.

Niniejsza rozprawa doktorska prezentuje podejście badawcze oparte na aktualnych zaleceniach dotyczących zwiększania bioróżnorodności w przestrzeniach miejskich i realizacji celów zrównoważonego rozwoju (cel 9: Innowacyjność, przemysł, infrastruktura<sup>5</sup>; cel 11: Zrównoważone miasta i społeczności<sup>6</sup>, cel 13: Działania w dziedzinie klimatu<sup>7</sup>). Uzyskane wyniki dostarczyły nowej wiedzy na temat wpływu procesu urbanizacji na jakość wody na trasie opad-odpływ oraz możliwości implementacji rozwiązań BZI w przestrzeni miejskiej. Dzięki interdyscyplinarnemu podejściu, łączącemu architekturę krajobrazu, urbanistykę, ochronę i inżynierię środowiska oraz zaawansowane metody matematyczno-statystyczne (tj. algorytmy zaimplementowane w języku Python), wskazano kierunki zrównoważonego gospodarowania przestrzenią zurbanizowaną na przykładzie Olsztyna. W efekcie prac badawczych, opracowano nowatorski geoprzestrzenny model LUSIA (ang. *Land Use Indicator Analysis*) - narzędzie wspomagające obiektywną ocenę potrzeb w zakresie BZI. Jego aplikacyjny potencjał upatrywany jest w procesie rewitalizacji terenów uszczelnionych lub wykorzystania podczas planowania inwestycji budowlanych w miastach.

Uzyskane wyniki badań stanowią ważny głos w dyskusji nad potrzebą implementacji BZI na rzecz rozwoju zrównoważonych miast. Jest ona wsparta nowatorskim interdyscyplinarnym podejściem na rzecz poprawy środowiska miejskiego, co wpisuje się w aktualny trend badawczy w dyscyplinie inżynieria środowiska.

---

<sup>5</sup> SDGs Cele Zrównoważonego Rozwoju. Cel 9: Budować stabilną infrastrukturę, promować zrównoważone uprzemysłowienie oraz wspierać innowacyjność.

<sup>6</sup> SDGs Cele Zrównoważonego Rozwoju. Cel 11: Uczynić miasta i osiedla ludzkie bezpiecznymi, stabilnymi, zrównoważonymi oraz sprzyjającymi włączeniu społecznemu.

<sup>7</sup> SDGs Cele Zrównoważonego Rozwoju. Cel 13: Podjąć pilne działania w celu przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom.

## **2. Cel i zakres badań**

### **Cel badań**

Głównym celem badań niniejszej rozprawy doktorskiej jest określenie możliwości implementacji elementów BZI jako rozwiązań wspierających systemy zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi na obszarach zurbanizowanych. Cele szczegółowe obejmują: (i) charakterystykę wybranych elementów BZI, (ii) analizę ilościową funkcjonujących systemów BZI, (iii) ocenę jakości wody opadowej na drodze opad-odpływ; (iv) określenie wpływu powierzchni nieprzepuszczalnych w miastach na jakość wody w zbiornikach wodnych; (v) opracowanie narzędzia wspierającego potencjalną lokalizację elementów BZI w oparciu o modelowanie oparte na GIS.

### **Zakres merytoryczny**

Zakres badań był podporządkowany celowi pracy i obejmował analizę dostępnych materiałów źródłowych oraz przegląd charakterystyk elementów BZI, w szczególności w zakresie zrównoważonego gospodarowania wodą opadową w miastach (**P1**), wybór i analizę obszaru zurbanizowanego, w którym funkcjonują elementy BZI (**P2**), wybór i analizę struktury przepuszczalności obszaru zurbanizowanego (**P3, P4**), analizę jakości wody opadowej na trasie opad-odpływ (**P3**), opracowanie matematycznego narzędzia (modelu), opartego na danych GIS, wspomagającego obiektywną ocenę potrzeb w zakresie lokalizacji elementów BZI na testowym obszarze zurbanizowanym (**P4**).

### **Zakres przestrzenny**

Badania terenowe realizowano na obszarze Warszawy (**P2**) oraz Olsztyna (**P3, P4**). Wybór Warszawy jako obszaru badawczego wynikał z dużej liczby i różnorodności elementów BZI. Dzięki temu wykonano analizę struktury urbanistycznej miasta ze szczególnym uwzględnieniem rozmieszczenia przestrzennego elementów BZI, tj. ogrodów deszczowych, zielonych dachów, zielonych ścian, a także terenów zieleni publicznej, czy nasadzeń towarzyszących ciągom komunikacyjnym. W wyniku analizy dokonano oceny z pomiędzy charakterem przestrzeni miejskiej a zastosowanymi w jej obrębie elementami BZI.

Na obszarze miasta Olsztyna przeprowadzono dwa zadania badawcze. Pierwsze zadanie (**P3**), obejmowało miejską zlewnię hydrograficzną o powierzchni 30 ha, na obszarze której prowadzono monitoring zmian właściwości fizykochemicznych wód opadowych i spływu powierzchniowego po ujście do rzeki Łyny (6 stanowisk pomiarowych). Zasięg przestrzenny drugiego zadania (**P4**) obejmował obszar wyznaczony granicami administracyjnymi miasta

Olsztyna tj. 88,33 km<sup>2</sup>. Posłużył on jako obszar testowy dla matematycznego modelu LUSIA, opracowanego na bazie rozpoznania fizjografii miasta z uwzględnieniem sposobu użytkowania terenu, stopnia uszczelnienia powierzchni oraz gęstości i typu zabudowy.

### **Zakres czasowy**

W okresie od lutego 2020 r. do czerwca 2021 r. przeprowadzono analizę literatury (**P1**). Badania terenowe na obszarze Warszawy przeprowadzono w okresie od kwietnia 2017 r. do maja 2018 r. (**P2**). W latach 2020-2024 realizowano zadania badawcze na obszarze Olsztyna, przy czym pierwszy etap badań terenowych, obejmujący monitoring jakości wód w układzie opad-odpływ ze zlewni zurbanizowanej (**P3**) realizowano w okresie od marca 2021 r. do września 2022 r. W okresie od marca 2023 r. do listopada 2023 r. kontynuowano badania terenowe w granicach administracyjnych Olsztyna, celem weryfikacji poprawności założeń opracowanego modelu (**P4**). Od marca 2020 r. do lutego 2024 r. prowadzono analizę materiałów źródłowych z roku 2006, 2012 i 2018, digitalizację i walidację modelu. W finalnej fazie badań opracowano graficznie dane zgromadzone na każdym z etapów badań.

### **3. Hipotezy badawcze**

Na podstawie analizy problematyki dotyczącej gospodarowania wodą opadową na obszarach zurbanizowanych przyjęto następujące hipotezy badawcze:

1. BZI jest skutecznym narzędziem walki z negatywnymi skutkami urbanizacji w kontekście gospodarki wodą opadową równocześnie umożliwiającymi podniesienie walorów estetycznych krajobrazu miejskiego.
2. Spływ powierzchniowy jest medium transportu zanieczyszczeń i przyczynia się do degradacji ekosystemów.
3. Jakość wody opadowej zmienia się na trasie opad - odpływ i jest uzależniona od czynników hydrometeorologicznych i fizjograficznych zlewni oraz infrastruktury sieci kanalizacyjnej zapewniającej bezpośredni odpływ do odbiornika (rzeki).
4. BZI pozwala na osiągnięcie znaczących korzyści środowiskowych dla obszarów zurbanizowanych. Uzyskanie optymalnych efektów warunkuje odpowiednio zaprojektowana i zlokalizowana sieć elementów BZI w przestrzeni miejskiej.

## 4. Metodyka badań

### Obszary badań

Zadania badawcze w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej realizowano na obszarze Warszawy i Olsztyna. W pracy **P2** analizowano teren zlokalizowany w Warszawie o powierzchni 517 km<sup>2</sup>. Struktura przestrzenna miasta jest podporządkowana Wiśle, istotnym elementem są tereny zieleni, które obejmują różne formy urządzone i naturalne. Struktura terenów zieleni w mieście obejmuje kompleksy leśne, 79 parków o łącznej powierzchni ok. 8 km<sup>2</sup>, ok. 160 skwerów. Istotną rolę odgrywają także tereny zieleni osiedlowej, których charakter jest zróżnicowany pod względem sposobu zagospodarowania, doboru gatunkowego oraz wieku zieleni.

W pracy **P3** i **P4** obszarem badań był Olsztyn. Badania będące przedmiotem pracy **P4** realizowano na obszarze obejmującym 88,33 km<sup>2</sup>. Teren został ukształtowany w wyniku zlodowacenia bałtyckiego, które tworzy falisty krajobraz moreny dennej wysokościach 88 – 154 m n.p.m. Formy wklęsłe wypełniają najczęściej wody jezior lub mokradeł. Część z nich została w sposób sztuczny odwodniona. Struktura użytkowania gruntów w mieście jest zróżnicowana. Zgodnie z klasyfikacją Corine Land Cover (CLMS) 19% zajmują tereny rolne, 28% - tereny leśne i zadrzewienia, 8% - obszary wodne.

Do obszarów zajętych przez ekosystemy wodne w Olsztynie, zalicza się 15 jezior oraz 4 rzeki. Głównym ciekim regionu i jednocześnie odbiornikiem spływu powierzchniowego z terenu miasta jest rzeka Łyna. Całkowita długość rzeki wynosi 264 km, zlewnia zajmuje powierzchnię 7126 km<sup>2</sup>. Badania, które zostały przedstawione w pracy **P3** prowadzono w profilu zamykającym górną część zlewni Łyny, na 45 km od jej źródeł. Obszar zlewni miejskiej, z której generowany był spływ powierzchniowy obejmuje powierzchnię 30 ha, znajdującą się w centralnej części Olsztyna. Charakteryzuje się ona zróżnicowanym sposobem użytkowania, z przewagą terenów komunikacyjnych (44.1%) i zabudowanych (14.4%). Z uwagi na rozwiniętą infrastrukturę i zabudowę zlewni, powierzchnie nieprzepuszczalne pokrywają ok. 59% analizowanego obszaru (Załącznik P3, Rys. 2).

### Prace przygotowawcze

Realizacja zadań badawczych, których efekty prezentowane są w publikacjach składających się na rozprawę doktorską była poprzedzona kwerendą biblioteczną oraz pozyskaniem materiałów źródłowych. Na podstawie pozyskanych danych (patrz: *Źródła danych*) wybrano obszary badań i sformułowano hipotezy badawcze. Częścią prac przygotowawczych było opracowanie charakterystyki krajobrazu miejskiego Warszawy (**P2**)

i Olsztyna (**P3, P4**), w tym odniesienie się do warunków hydrologicznych, meteorologicznych a w szczególności warunków przepuszczalności/uszczelnienia terenu. Dzięki analizie zebranej literatury naukowej i poznanej metodyki dokonano oceny korzyści wynikających z wdrożenia koncepcji BZI (**P1**). Dodatkowo, ze względu na interdyscyplinarny charakter badań, niezbędne było uzupełnienie wiedzy z zakresu chemii środowiska oraz programowania w języku Python.

## Źródła danych

Specyfika podjętego tematu wymagała integracji szerokiego zakresu danych: literatury naukowej, danych meteorologicznych, dokumentów kartograficznych, dokumentów planistycznych, danych przestrzennych.

W toku realizacji pracy doktorskiej korzystano z danych literaturowych, które zostały udostępnione w bazach: SCOPUS<sup>8</sup> (Elsevier), Web of Science Core Collection<sup>9</sup> (Clarivate Analytics), Google Scholar<sup>10</sup> (Google). Dokumenty planistyczne, takie jak: *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy*<sup>11</sup> (2018), *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Olsztyna*<sup>12</sup> (2013), *Strategia Rozwoju Miasta - Olsztyn 2030+*<sup>13</sup> (2022), zostały pozyskane z internetowych baz aktów miejscowych Urzędu m.st. Warszawy<sup>14</sup> oraz Urzędu Miasta Olsztyna<sup>15</sup>.

Jednocześnie, w okresie od marca 2021 r. do września 2022 r. budowano bazę danych warunków meteorologicznych na podstawie własnych obserwacji na stacji meteorologicznej, należącej do Katedry Gospodarki Wodnej i Klimatologii, która jest zlokalizowana na terenie Ogrodu Dydaktyczno-Doświadczalnego Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Pozyskane dane meteorologiczne dotyczyły: temperatury powietrza (°C), wilgotności powietrza (%), sum opadów (mm). Dodatkowo wyznaczono częstotliwość występowania opadów i określono wskaźnik ADP, tj. liczbę dni bezopadowych poprzedzających każdy pomiar jakości wody opadowej (ADP ang. *antecedent dry period*). ADP obliczono dla opadu, którego suma wynosi >0,1 mm.

W trakcie analiz wykorzystano dane przestrzenne (Tabela 1) udostępnione przez Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) oraz Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK).

---

<sup>8</sup> SCOPUS: [www.scopus.com](http://www.scopus.com).

<sup>9</sup> Web of Science Core Collection: [www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search](http://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search).

<sup>10</sup> Google Scholar: [www.scholar.google.com](http://www.scholar.google.com).

<sup>11</sup> Uchwała nr LXII/1667/2018 Rady m. st. Warszawy z dn. 01.03.2018 r.

<sup>12</sup> Uchwała Nr XXXVII/660/13 Rady Miasta Olsztyna z dn. 15.05.2013 r.

<sup>13</sup> Uchwała nr LI/816/22 Rady Miasta Olsztyna z dn. 28.09.2022 r.

<sup>14</sup> Biuletyn Informacji Publicznej m.st. Warszawy: [www.bip.warszawa.pl](http://www.bip.warszawa.pl).

<sup>15</sup> Urząd Miasta Olsztyna. Baza Aktów Własnych: [www.prawomiejscowe.pl/UrządMiastaOlsztyna/](http://www.prawomiejscowe.pl/UrządMiastaOlsztyna/).

**Tabela 1.** Źródła danych przestrzennych (GIS) wykorzystanych w badaniach

L.p.	Zakres danych	Rodzaj danych	Źródło	Nr pracy
1.	Użytkowanie terenu – <i>Corine Land Cover</i>	Wektorowe	CLMS	P3
2.	Użytkowanie terenu – <i>Urban Atlas Land Cover</i>	Wektorowe	CLMS	P4
3.	Uszczelnienie powierzchni – <i>Impervious Density</i>	Rastrowe	CLMS	P4
4.	Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k)	Wektorowe	GUGiK	P3, P4
5.	Krajowa Integracja Uzbrojenia Terenu (KIUT)	WMS	GUGiK	P3

Źródło: opracowanie własne.

## Prace terenowe

**Inwentaryzacja obszarów.** Przyjęty zakres analiz wymagał wizji lokalnych oraz inwentaryzacji wybranych elementów w skali miast. W celu analizy istniejących układów zieleni oraz BZI w okresie od kwietnia 2017 r. do kwietnia 2018 r. na obszarze Warszawy (**P2**) zidentyfikowano: lasy, formy zieleni naturalnej, zieleń urządzonej (parki, skwery, zieleńce), zieleń towarzyszącą obszarom komunikacji (pasy przydrożne, zielone torowiska), wybrane elementy BZI (zielone dachy, zielone ściany, ogrody deszczowe). Inwentaryzacja wymienionych form zieleni została wykonana na podkładzie mapowym przygotowanym na podstawie *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy* (2018). Lokalizacja oraz obszar wskazanych w ten sposób elementów zieleni zostały zweryfikowane i uzupełnione w trakcie wizyt terenowych.

W Olsztynie, na podstawie BDOT10k oraz przebiegu sieci kanalizacji deszczowej, wytypowano obszar mikro-zlewni miejskiej (**P3**), który w lutym 2021 r. został zinwentaryzowany pod kątem zabudowy, ciągów komunikacyjnych, zieleni urządzonej i zieleni naturalnej. Wskazanie sposobu użytkowania terenu w granicach analizowanego obszaru było podstawą do określenia struktury przepuszczalności obszaru oraz szczegółowej charakterystyki stanowisk poboru próbek wód. W toku analiz przestrzennych Olsztyna (**P4**) przeprowadzono wizje terenowe na obszarach wskazanych w modelu LUSIA jako wymagające interwencji. Były one niezbędne dla prawidłowej weryfikacji zaproponowanych lokalizacji elementów BZI (patrz: *Analizy geoprzestrzenne*).

Uzupełnieniem opisanych prac terenowych było sporządzenie dokumentacji fotograficznej wskazanych obszarów (P2-P4).

**Pobór próbek wody.** Aby dokonać oceny zmian jakości wody opadowej na drodze opad-odpływ w zlewni miejskiej na terenie Olsztyna (**P3**), w okresie od marca 2021 do września 2022 pobrano 108 próbek wody opadowej, wody powierzchniowej, wody z kanalizacji burzowej oraz wody rzecznej w trakcie 12 okresów deszczowych (Załącznik P3, Tabela 2). Do

badan kwalifikowano próbki wody pobrane w trakcie opadów, których suma przekraczała 0,1 mm. Próbki były każdorazowo pobierane z sześciu uprzednio wyznaczonych stanowisk pomiarowych (Rys. 1): opad bezpośredni (DP), spływ z dachu (RR), spływ powierzchniowy (SR), kolektor burzowy (SC), oraz rzeka przed (RU) i za kolektorem burzowym (RD). Próbka opadu bezpośredniego, czyli wody opadowej bez kontaktu z podłożem, była pobierana ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej na terenie Ogrodów Dydaktyczno-Doświadczalnych UWM. Próbki z 5 stanowisk (t.j. bez opadu bezpośredniego) były pobierane w 10 min interwale czasowym. Przy czym próbka wody opadowej z dachu (rynna spustowa) była pobierana 4-krotnie (w momencie wystąpienia spływu, po 10 min, 20 min i 30 min). Dzięki temu możliwe było wskazanie momentu, w którym stężenie zanieczyszczeń z powierzchni dachu jest najwyższe. Wszystkie próbki wody były pobierane do polietylenowych pojemników o pojemności 1500 ml. Opisane pojemniki były transportowane do laboratorium Katedry Gospodarki Wodnej i Klimatologii w ciągu 1-12 godz. celem dalszych analiz laboratoryjnych.

**Pomiary terenowe jakości wody.** Pomiaru parametrów fizykochemicznych dokonywano *in situ* za pomocą uprzednio skalibrowanej sondy wieloparametrycznej YSI EXO2 (YSI, Xylem, USA). Każdy pomiar obejmował określenie wartości następujących parametrów: pH, przewodnictwo elektrolityczne (SpCond, [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]), całkowita ilość substancji rozpuszczonych (TDS) [ $\text{mg}/\text{l}$ ], mętność wody [NTU], oraz fDOM [QSE].

## **Prace analityczne**

**Analiza układów zieleni.** Na podstawie badań terenowych oraz analizy *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania m.st. Warszawa* (2018) przygotowano opracowanie graficzne zinventaryzowanych form zieleni naturalnej i urządzonej na obszarze Warszawy (**P3**). Efekty prac w tym zakresie prezentują zasięg oraz lokalizację: form ochrony przyrody, zieleni naturalnej, zieleni urządzonej (parków publicznych, skwerów), zieleni wzdłuż ciągów komunikacyjnych oraz elementów BZI (zielonych dachów, ścian i ogrodów deszczowych). Na podstawie przygotowanej inwentaryzacji obiektów dokonano analizy ich rozmieszczenia biorąc pod uwagę ciągłość układów zieleni. Wskazanie fragmentacji obszarów oraz sposobu ich rozmieszczenia, zwłaszcza BZI, pozwoliło na ocenę wpływu urbanizacji na strukturę krajobrazu miejskiego oraz ocenę zależności pomiędzy charakterem przestrzeni miejskiej a zastosowanymi w jej obrębie elementami BZI. Materiały wynikowe zostały przygotowane w programie AutoCAD 2017.



**Analizy laboratoryjne jakości wody.** W związku z ryzykiem wysokiego zanieczyszczenia wód opadowych wskutek zmywu z powierzchni utwardzonych (dachy, jezdnie, parkingi) w pobranych próbkach oznaczono stężenia metali ciężkich: Cu, Cr, Fe, Ni, Zn i Pb (**P3**). Próbkę wody, utrwalone dodatkiem 65% HNO<sub>3</sub> (Merck, Niemcy), były przechowywane w pojemnikach polietylenowych w warunkach chłodniczych do momentu oznaczenia. W celu przygotowania próbek do mineralizacji do naczynia z polimeru fluorowanego pobrano 30 ml próbki wody dodając do każdej próbki 5 ml 65% HNO<sub>3</sub> (Merck, Niemcy) oraz 1 ml 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Tarchem, Polska). Zmineralizowano je w piecu mikrofalowym Multiware 3000 (Anton Paar, Graz, Austria). Mineralizację przeprowadzono w następujących warunkach: temperatura maksymalna 160°C, ciśnienie maksymalne 20 bar, moc maksymalna 1400 W, czas mineralizacji 110 minut. Stężenia metali ciężkich oznaczono za pomocą atomowej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej na ICP-OES iCAP-PRO (ThermoFisher, Waltham, MA USA). Krzywe kalibracyjne wyznaczono przy użyciu wielopierwiastkowego roztworu wzorcowego o stężeniu 100 mg/l każdego pierwiastka (Merck, Niemcy). Procedura została przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN ISO 11885:2009.

**Analizy matematyczno-statystyczne.** Na podstawie zebranych danych meteorologicznych oraz uzyskanych parametrów fizykochemicznych (**P3**) sprawdzono normalność rozkładu badanych parametrów za pomocą testu Shapiro-Wilk'a ( $p < 0,05$ ). W celu oceny statystycznej istotności różnic wybrane parametry wody (zmiennie zależne) ze stanowisk pomiarowych (zmienna niezależna) na trasie opad-odpływ poddano jednoczynnikowej analizie wariancji (*one-way* ANOVA). Ponadto, wykonano jednoczynnikową analizę wariancji w celu oceny istotności różnic wartości wybranych parametrów fizykochemicznych wody ze spływu z powierzchni dachu w sezonach (zmienna niezależna). W analizie tej czas od wystąpienia spływu (0-10 min, 10-20 min, 20-30 min, >30 min) był zmienną powtarzanych pomiarów. W obu przypadkach, z powodu braku normalności rozkładu danych, istotność różnic między grupami danych zbadano testem Kruskala-Wallisa, a następnie zastosowano nieparametryczny test Dunn'a (post-hoc;  $p < 0,05$ ). Aby określić związek pomiędzy długością okresu bezopadowego poprzedzającego pomiar (ADP) a stężeniem wybranych parametrów jakości wody opadowej określono współczynniki korelacji Spearman'a ( $p < 0,01$  oraz  $p < 0,05$ ). Zależności te zostały przeanalizowane dla półrocza zimowego oraz letniego. Niezależnie, dla wszystkich badanych parametrów wody określono statystyki opisowe w każdym stanowisku poboru próbek: średnia, mediana, odchylenie standardowe. Analizy statystyczne zostały wykonane w programie Statistica 13.3 TIBCO Software Inc.

Do realizacji założeń pracy **P4** niezbędne było obliczenie wartości pięciu wskaźników: wskaźnik przeważającego sposobu użytkowania terenu ( $I_{LU}$ ), wskaźnik stopnia uszczelnienia powierzchni ( $I_{IMP}$ ), wskaźnik średniej wysokości zabudowy ( $I_{BH}$ ), wskaźnik gęstości zabudowy ( $I_{BF}$ ) oraz wskaźnik wykluczenia ( $I_{EX}$ ). Zakres wartości wskaźników prezentuje Załącznik P4 (Tabela 1). W celu usprawnienia procesu obliczeń przygotowano algorytmy w języku Python, których podstawę stanowiły zaprezentowane poniżej wzory matematyczne.

- Wskaźnik przeważającego sposobu użytkowania terenu ( $I_{LU}$ ):

$$I_{LU} = \operatorname{argmax}_k S_k, \quad (1)$$

gdzie  $S_c$  to suma wszystkich powierzchni danego  $k$  [ $m^2$ ],  $k$  to identyfikator klasy użytkowania terenu według UA (CLMS).

- Wskaźnik stopnia uszczelnienia powierzchni ( $I_{IMP}$ ):

$$I_{IMP} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times P_i}{P_C}, \quad (2)$$

gdzie  $U_i$  to gęstość uszczelnienia [%],  $P_i$  to suma powierzchni obszarów o wartości  $U_i$  [ $m^2$ ],  $P_C$  to powierzchnia całkowita pola siatki [ $m^2$ ].

- Wskaźnik średniej wysokości zabudowy ( $I_{BH}$ ):

$$I_{BH} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i, \quad (3)$$

gdzie  $N$  to liczba budynków w obrębie pola siatki,  $K_i$  to liczba kondygnacji nadziemnych.

- Wskaźnik gęstości zabudowy ( $I_{BF}$ ):

$$I_{BF} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{P_C} \right) \times 100\%, \quad (4)$$

gdzie  $Z_i$  to powierzchnia obszaru zabudowanego [ $m^2$ ],  $P_C$  to powierzchnia całkowita pola siatki [ $m^2$ ].

- Wskaźnik wykluczenia ( $I_{EX}$ ):

$$I_{EX} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } P_E \neq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } P_E = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

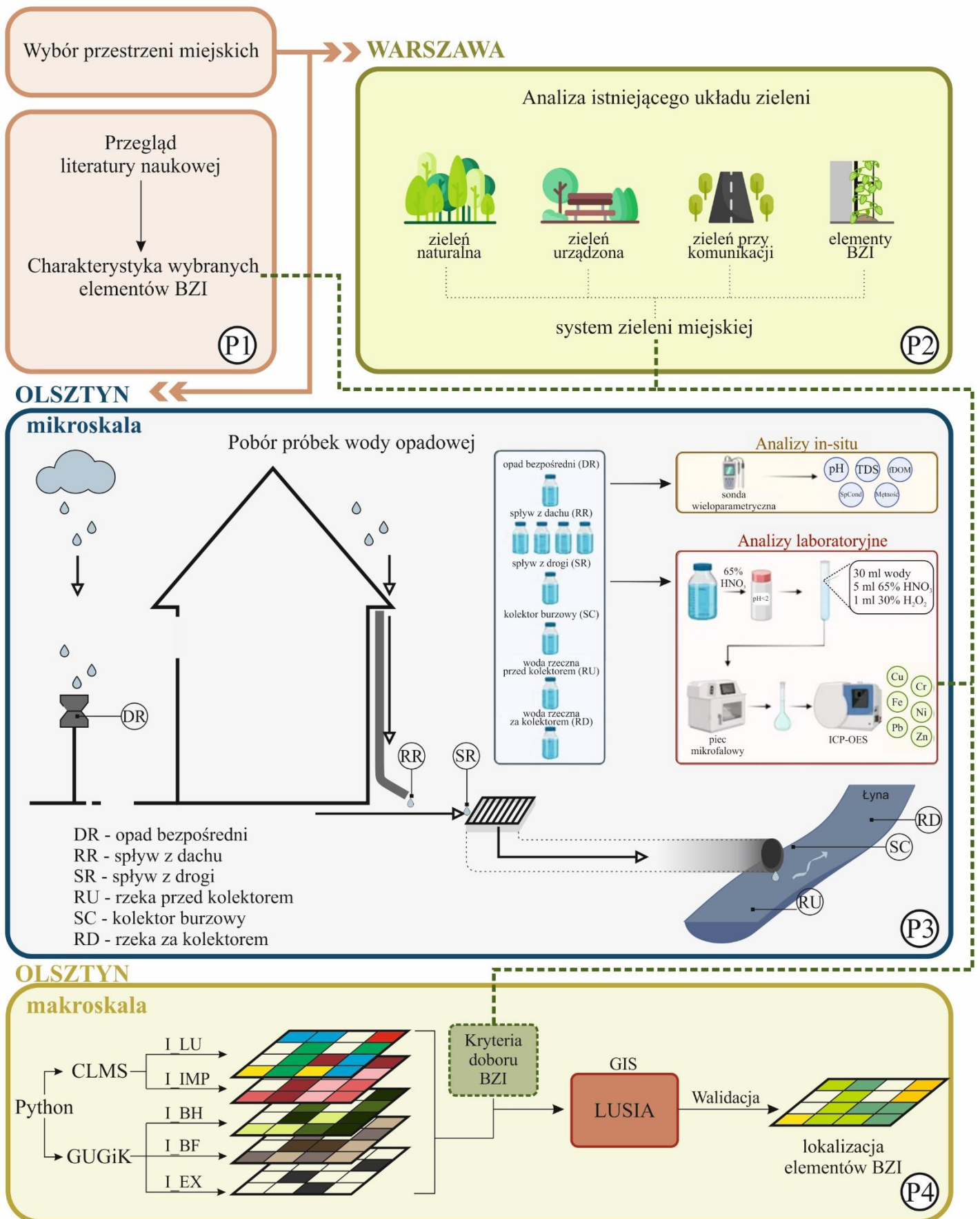
gdzie  $P_E$  to powierzchnia obszarów wykluczonych w obrębie pola siatki [ $m^2$ ], jeśli  $P_E \leq P_C$ .

Uzyskane wyniki analiz zestawiono w ujęciu czasowym (lata 2006, 2012, 2018) i porównano w celu oceny zmian struktury urbanistycznej Olsztyna na przestrzeni lat.

**Analiza geoprzestrzenna.** W celu weryfikacji hipotezy badawczej, która wskazuje na korzystny wpływ odpowiednio wzdrożonych elementów BZI na strukturę użytkowania

przestrzeni miejskiej, niezbędne było opracowanie narzędzia matematycznego (modelu), którego celem jest ocena sposobu użytkowania obszaru zurbanizowanego oraz wskazanie potencjalnych lokalizacji elementów BZI za pomocą oprogramowania GIS (**P4**) w oparciu o dane przestrzenne (patrz: Tabela 1). Aby usprawnić proces analizy opracowano autorski model LUSIA (Land Use Indicator Analysis), który uwzględnia pięć wskaźników urbanistycznych (I\_LU, I\_IMP, I\_BH, I\_BF, I\_EX) oraz specyfikę proponowanych rozwiązań BZI.

Opracowany model LUSIA został przetestowany w programie QGIS 3.34.2-Prizren na przykładzie Olsztyna. Aby wskazać zasadność implementacji rozwiązań BZI w Olsztynie wykonano analizę zmian struktury użytkowania Olsztyna w latach 2006, 2012 i 2018 (**P4**). Ze względu na najwyższy dostępny stopień szczegółowości dla miast europejskich w kontekście przestrzennym z bazy CLMS wykorzystano mapy *Urban Atlas Land Cover* (UA) oraz *Imperviousness Density*. Z BDOT10k udostępnionej przez GUGiK wykorzystano dane dotyczące zabudowy (lokalizacja, wysokość, powierzchnia). Pozyskane dane zostały docięte do uprzednio wygenerowanej siatki kwadratów (250x250 m). Dla każdego z 1549 pól siatki kwadratów, za pomocą zdefiniowanych w języku Python funkcji, obliczono pięć wskaźników (patrz: *Analizy matematyczno-statystyczne*). Następnie na podstawie opracowanych pożądaných wartości wskaźników (Załącznik P4, Tabela 2), wykorzystując model LUSIA wskazano możliwości implementacji elementów BZI na obszarach z ponadprzeciętnym stopniem uszczelnienia. W efekcie na mapie Olsztyna, podzielonej siatką kwadratów, automatycznie zostały wskazane pola wymagające interwencji wraz z sugerowanymi elementami BZI. W celu walidacji zaproponowanych rozwiązań i ich lokalizacji wykonano wizję terenową. Dodatkowo, aby przedstawić adekwantność zaproponowanej metody przygotowano schematy przestrzenne prezentujące propozycje wykorzystania wybranych elementów BZI we wskazanych przestrzeniach miasta.



**Rysunek 1.** Schemat badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej.  
Źródło: opracowanie własne.

## 5. Wyniki badań

W pracy **P1** „*Blue-green infrastructure as a new trend and an effective tool for water management in urban areas*” dokonano szczegółowej analizy literatury na temat BZI oraz scharakteryzowano wybrane elementy BZI w kontekście ich roli w gospodarowaniu wodą opadową na obszarach miejskich. Na podstawie analizy wyników wyszukiwania w bazie Web of Science Core Collection oraz Google Scholar stwierdzono, że pojęcie BZI (ang. *blue-green infrastructure*) oraz jego pochodne (np. ang. *green infrastructure*<sup>16</sup>, ang. *nature-based solutions*<sup>17</sup>) stają się powszechnie stosowane. Wzrost zainteresowania tą tematyką następuje od około 2000 r., ma to bezpośredni związek z dokumentem<sup>18</sup> opublikowanym przez rząd Stanów Zjednoczonych w 1999 r. Natomiast ciekawe jest, że termin BZI w porównaniu do pozostałych pojęć został zastosowany w publikacjach naukowych stosunkowo późno, bo dopiero w 2013 r. przez Rozosa i innych<sup>19</sup>.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury w pracy **P1**, stwierdzono, że do najpopularniejszych rozwiązań BZI stosowanych i promowanych na świecie należą ogrody deszczowe, zielone dachy, zielone ściany oraz nawierzchnie przepuszczalne. Wśród wspomnianych rozwiązań wyróżnia się szereg typów. Ogrody deszczowe mogą być zakładane bezpośrednio w odpowiednio przygotowanym gruncie, zarówno w naturalnych, jak i formowanych obniżeniach terenu (Rys. 2) lub w pojemnikach (Zou i in., 2017). Konstrukcja zielonych dachów (Rys. 3), a co za tym idzie typ wykorzystywanych gatunków roślin, pozwala na wyodrębnienie intensywnych, semi-intensywnych oraz ekstensywnych dachów (Baryła i in., 2019; Besir i Cuce, 2018; Saadatian i in., 2013). W przypadku zielonych ścian wyróżnia się dwie grupy konstrukcji (Rys. 4), w zależności od sposobu uprawy roślin: „żywe ściany” (ang. *living walls*) lub zielone fasady (ang. *green façades*). W grupie „żywych ścian”, na podstawie technologii wykonania bazy instalacji, badacze wyróżniają dodatkowo cztery typy, natomiast wśród zielonych fasad opisuje się konstrukcje bezpośrednie i niebezpośrednie (Coma i in., 2017; Perini i Ottel , 2014; Radic i in., 2019). Jeśli chodzi o nawierzchnie przepuszczalne, to w literaturze wymienia się trzy główne rodzaje (Rys. 5): powierzchnię przepuszczalną,

---

<sup>16</sup> Zielona infrastruktura.

<sup>17</sup> W tłumaczeniu dosłownym rozwiązania oparte na naturze.

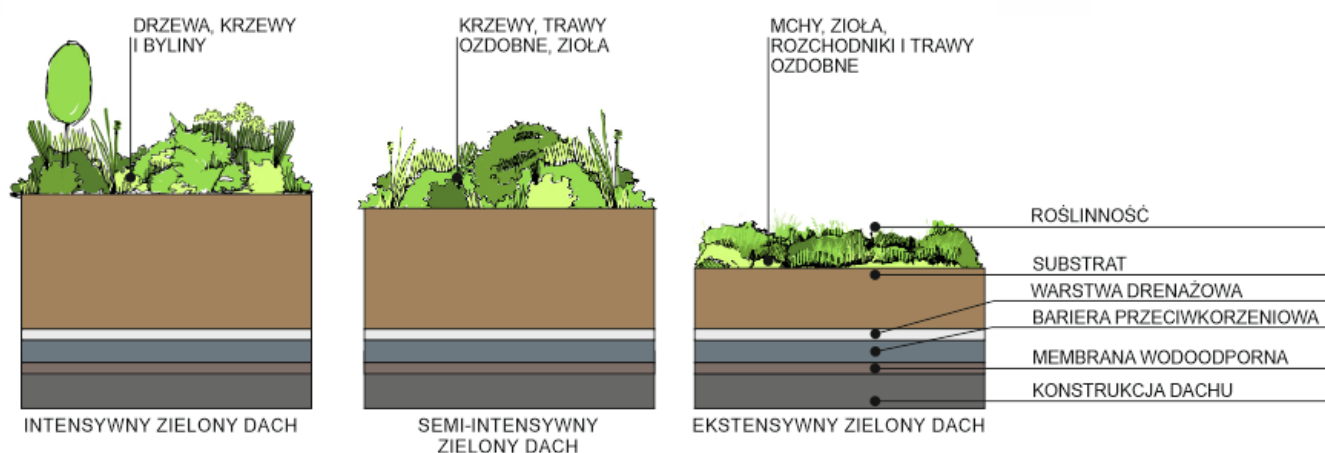
<sup>18</sup> W dokumencie The President’s Council on Sustainable Development, *Towards a Sustainable America – Advancing Prosperity, Opportunity, and a Healthy Environment for the 21st Century*, U.S. Government Printing Office, 1999 autorzy wskazują, że koncepcja zielonej infrastruktury (ang. *green infrastructure*) jest jedną z kluczowych strategii zrównoważonego rozwoju.

<sup>19</sup> Rozos, E., Makropoulos, C., Maksimovic, C. 2013. *Rethinking urban areas: an example of an integrated blue-green approach*. Water Science and Technology-Water Supply, 13(6), 1534-1542. DOI:10.2166/ws.2013.140.

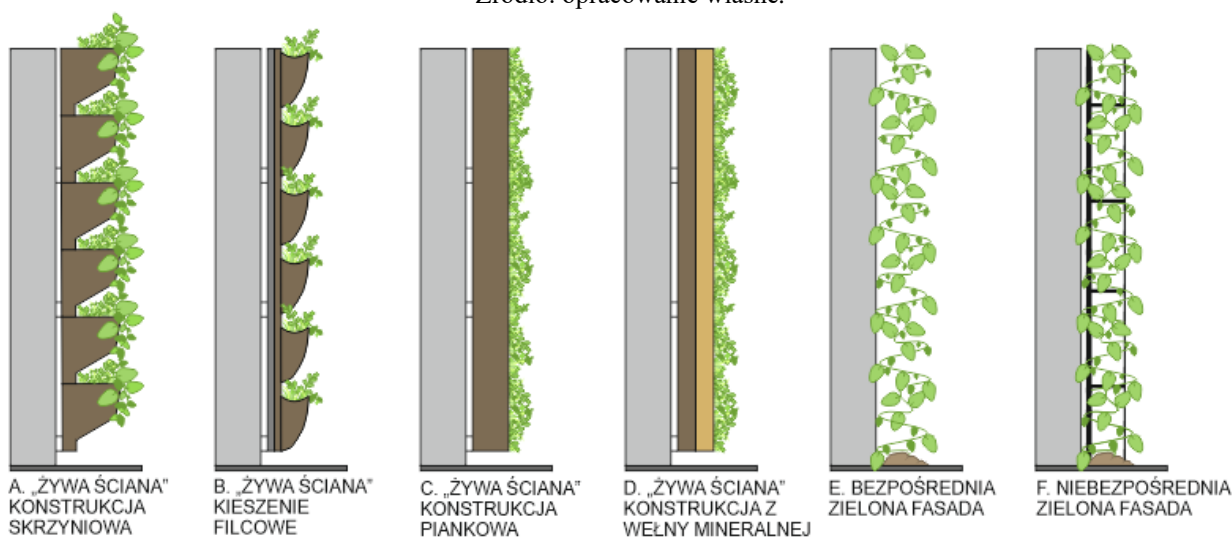
nawierzchnię półprzepuszczalną i nawierzchnię całkowicie przepuszczalną (Lin i in., 2014; Lu i in., 2020; Scholz i Grabowlecki, 2007).



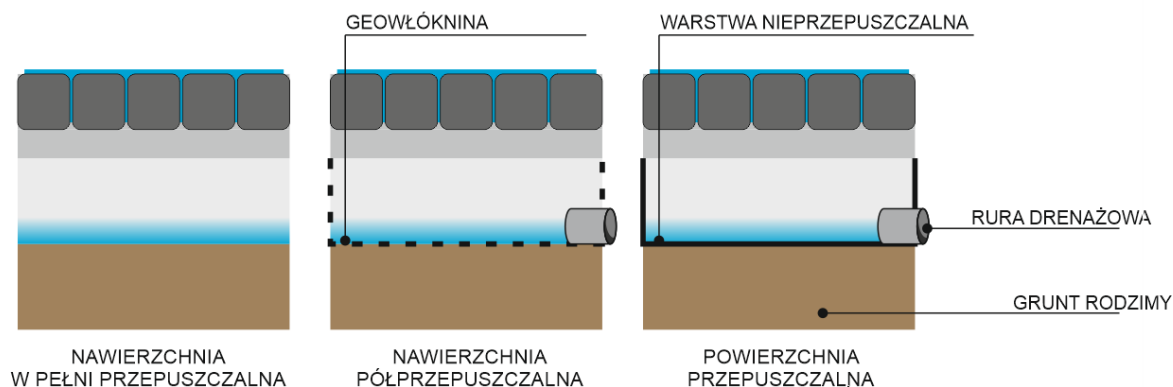
**Rysunek 2.** Schemat układu warstw w ogrodzie deszczowym.  
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 3.** Schemat konstrukcji zielonych dachów.  
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 4.** Rodzaje zielonych ścian oraz schemat konstrukcji.  
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 5.** Rodzaje nawierzchni przepuszczalnych

Źródło: opracowanie własne.

Istotną część pracy **P1** stanowiła analiza wyników badań opisanych w literaturze w kontekście efektywności elementów BZI w poprawie cyklu hydrologicznego i podczyszczaniu wody opadowej. Za najefektywniejsze uznaje się zielone dachy, których implementacja zapewnia zmniejszenie spływu powierzchniowego o 2-100%, przy czym ich efektywność jest zróżnicowana w zależności od zastosowanego typu (Li i in., 2019; Soulis i in., 2017). Elementem służącym przede wszystkim ograniczaniu skutków gwałtownych i nadmiernych opadów są ogrody deszczowe. Wyniki wielu naukowców potwierdzają, że zastosowanie ogrodów deszczowych pozwala na ograniczenie spływu powierzchniowego o ok. 2-42% (Li i in., 2018; Yang i in., 2009), natomiast w procesie ewapotranspiracji wykorzystywane jest 19-84% wody opadowej. W procesie ewapotranspiracji zielone ściany wykorzystują ok. 23% (Lau i Mah, 2018; van de Wouw i in., 2017). Dzięki odpowiedniej konstrukcji elementy te zatrzymują 45-75% wody opadowej, która później jest wykorzystywana do nawadniania tych instalacji. Mimo tego, że zielone ściany, to konstrukcje pionowe, znajdujące się na ścianach obiektów architektonicznych, to badacze niejednokrotnie udowodnili, że mogą ograniczyć spływ powierzchniowy o 4-87%. Ich efektywność w tym zakresie jest zależna od rodzaju substratu (Lau i Mah, 2018; Radic i in., 2019). Na obszarach, których funkcja ogranicza się do zapewnienia ciągłości komunikacyjnej często jedynym możliwym rozwiązaniem są nawierzchnie przepuszczalne, które dzięki zastosowaniu otworów, przerw dylatacyjnych lub materiałów o wysokiej porowatości, umożliwiają infiltrację spływu powierzchniowego. Wyniki wskazują, że tego typu nawierzchnie redukują odpływ powierzchniowy do 20%, ograniczając w ten sposób ryzyko powodzi (Lin i in., 2014; Sanicola i in., 2018; Sun i in., 2018). Syntezę zebranych informacji przedstawia Tabela 2.

**Tabela 2.** Efekty BZI w zakresie gospodarki wodą opadową i poprawie jakości wody opadowej na podstawie dostępnej literatury.

<b>BZI</b>	<b>Zakres</b>	<b>Efektywność</b>	<b>Źródło</b>
<b>Ogród deszczowy</b>	Gospodarka wodą opadową	Redukcja spływu powierzchniowego o 42%	Yang i in. (2009)
		Redukcja spływu powierzchniowego o 12,7-19,4%	Autixier i in. (2014)
		Redukcja spływu powierzchniowego o 1,93-9,69%	Li i in. (2018)
		Infiltracja: 60%	Zhang i in. (2019)
		Ewapotranspiracja: 19-84%	Ebrahimian i in. (2019)
	Poprawa jakości wody opadowej	Redukcja metali ciężkich: 90% Cu, Pb, Zn	Dietz i Clausen (2005)
Redukcja metali ciężkich: 80-90% Cu, Zn, Cd, Pb		Siwiec i in. (2018)	
<b>Zielony dach</b>	Gospodarka wodą opadową	Redukcja spływu powierzchniowego 50-100%	Rowe (2011)
		Redukcja spływu powierzchniowego 2-100%	Soulis i in. (2017)
		Redukcja spływu powierzchniowego 40-80%	Xing i Jones (2019)
		Redukcja spływu powierzchniowego 5-69% w porównaniu do typowego dachu	Li i in. (2019)
		Ewapotranspiracja: 51,5%	Besir i Cuce (2018)
		Ewapotranspiracja: 83%	Ebrahimian i in. (2019)
		Retencja wody opadowej: 30-86%	
	Poprawa jakości wody opadowej	Redukcja metali ciężkich: 99% Pb, 96-99% Zn, 97-99% Cu, 92-98% Cd (lato)	Berndtsson (2010)
		Redukcja metali ciężkich: 44-68% Cu, 2-72% Zn, 62-88% Cd, 91-94% Pb (zima)	
Redukcja metali ciężkich: 61% Cr, 24% Mn, 93% Pb, 8% Zn (ilość w opadach=100%)			
<b>Zielona ściana</b>	Gospodarka wodą opadową	Redukcja spływu powierzchniowego 20-87%	Lau i Mah (2018)
		Redukcja spływu powierzchniowego 4%	Radic i in. (2019)
		Retencja wody opadowej: 45-75%	Kew i in. (2014)



		Retencja wody opadowej: 45-75%	Lau i Mah (2018)
		Ewapotranspiracja: 23%	van de Wouw i in. (2017)
<b>Nawierzchnia przepuszczalna</b>	Gospodarka wodą opadową	Redukcja spływu powierzchniowego 1-40%	Hu i in. (2018)
		Całkowita redukcja odpływu o 10-20%	Lin i in. (2014)
	Poprawa jakości wody opadowej	Redukcja metali ciężkich: 84% Pb; 77% Cd; 73% Zn	Legret i Colandini (1999)
		Redukcja metali ciężkich: 99% of Zn	Winer (2000)

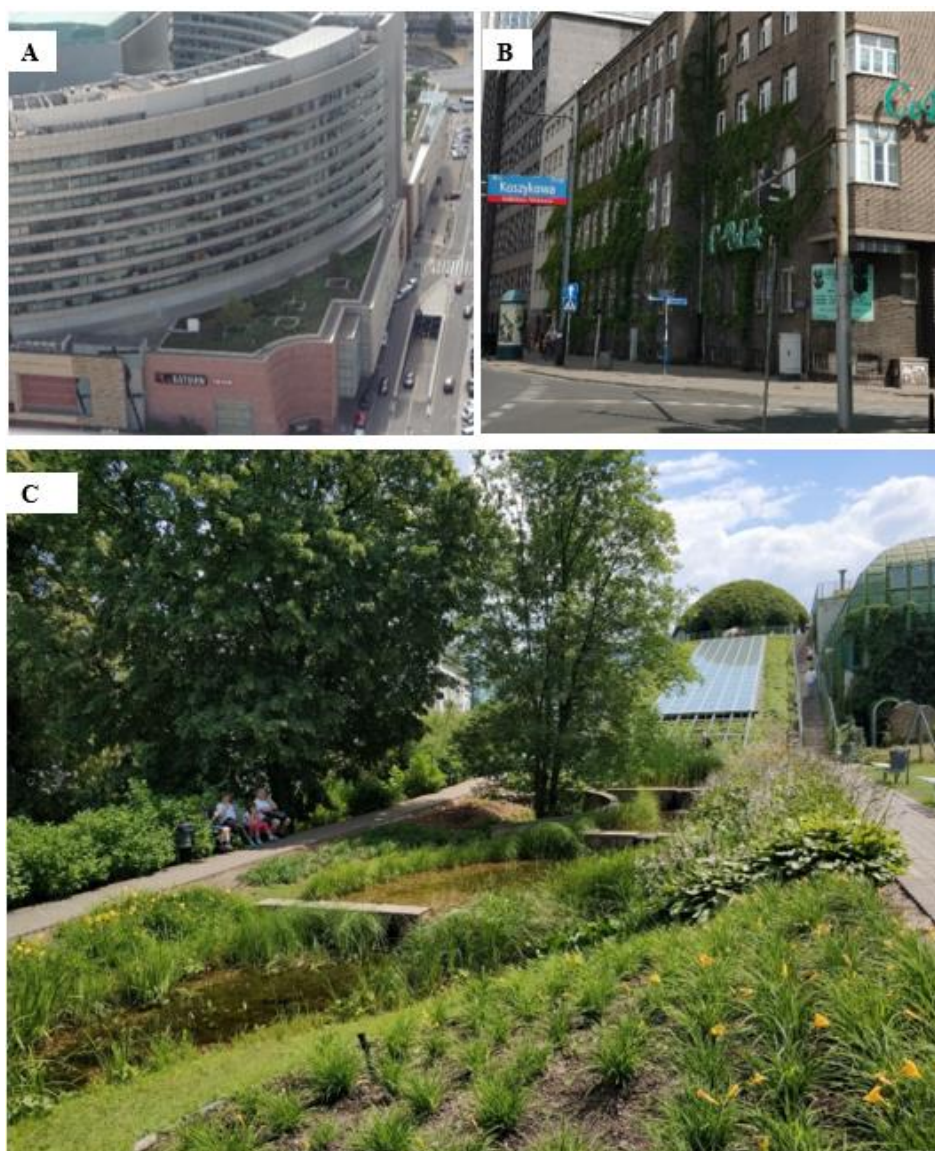
Tabela zawiera wyłącznie dane dotyczące gospodarki wodą opadową oraz poprawy jakości wody opadowej w zakresie zawartości metali ciężkich. Rozszerzona wersja tabeli znajduje się w Załączniku P1 (Tabela 2).

W świetle przeprowadzonej analizy źródeł literaturowych wykazano, że elementy BZI, implementowane zarówno pojedynczo, jak i w grupach, mają zdolność do neutralizacji lub równoważenia negatywnych skutków degradacji komponentów przestrzeni zurbanizowanej. Biorąc pod uwagę doświadczenia badaczy należy więc zwrócić uwagę na konieczność uwzględniania tego typu rozwiązań w projektowanych planach gospodarowania wodą opadową. Niemniej jednak należy zwrócić uwagę, że skuteczność tego typu działań ekologicznych będzie możliwa w większym zakresie, nie tylko dzięki odpowiedniemu dostosowaniu elementów BZI do charakteru przestrzeni, ale także za sprawą zwiększeniu świadomości społecznej.

Przedmiotem badań publikacji **P2** „*Analysis of green infrastructure and nature-based solutions in Warsaw – selected aspects for planning urban space*” były rozwiązania z zakresu BZI zlokalizowane na obszarze Warszawy. Implementacja BZI na obszarach zurbanizowanych stała się powszechną praktyką zazieleniania, zwłaszcza w ścisłych centrach miast. Elementy te stanowią istotne uzupełnienie miejskiej infrastruktury technicznej. Dzięki synergii działań w zakresie rozwoju miast, która jest uwarunkowana realnymi potrzebami można oczekiwać wymiernych korzyści ekologicznych, ekonomicznych, krajobrazowych i społecznych. Koncepcja BZI powinna więc stanowić integralną część dokumentów strategicznych dotyczących rozwoju miasta. Podczas prac nad planami zrównoważonego rozwoju przestrzennego przestrzeni zurbanizowanych należy uwzględnić specyficzne uwarunkowania morfologiczne, klimatyczne i urbanistyczne. W niniejszym badaniu przeanalizowano rozmieszczenie wybranych elementów BZI (zielone ściany, zielone dachy, ogrody deszczowe) z uwzględnieniem terenów leśnych i zieleni naturalnej, parków publicznych, skwerów oraz zieleni towarzyszącej ciągom komunikacyjnym na obszarze Warszawy. Wykonano analizę materiałów kartograficznych, dokumentów planistycznych oraz analizy terenowe w celu identyfikacji wybranych elementów BZI.

Na analizowanym obszarze zidentyfikowano wysoki stopień pokrycia obszaru miasta zróżnicowanymi formami zieleni naturalnej (20,9%), przy czym ich przeważająca część znajduje się w południowej części Warszawy. Niemniej jednak, z uwagi na względnie równomierny rozkład terenów zieleni nieurządzonej wzdłuż granic administracyjnych miasta tereny te należy uznać za potencjalną przestrzeń do stworzenia tzw. pierścienia zieleni wokół Warszawy. Zaburzenia ciągłości zidentyfikowano w bezpośrednim sąsiedztwie głównych dróg

dojazdowych. W centralnych częściach miasta ze względu na postępującą urbanizację tereny zieleni naturalnej zanikają. O ile było to możliwe w tkankę miejską wprowadzono formy zieleni urządzonej (parki, skwery, zielen towarzysząca ciągom komunikacyjnym). Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że ze względu na gęstą zabudowę i duży udział powierzchni nieprzepuszczalnych w strukturze krajobrazu miejskiego powierzchnia przestrzeni zieleni nierównomiernie wypełnia przestrzeń miejską. Pomimo niedostatecznej powierzchni zieleni w Warszawie rozbudowywany jest system BZI. Chociaż rozwiązania te są rozproszone, to zielone dachy, zielone ściany czy ogrody deszczowe (Rys. 6) można zidentyfikować na obszarach charakteryzujących się gęstą zabudową (Centrum, Żoliborz). Niemniej jednak niezbędne są dalsze działania, aby dążyć do maksymalizacji korzyści wynikających z ciągłości systemów zieleni.



**Rysunek 6.** Przykłady BZI w Warszawie (A – zielony dach, B – zielona ściana przy ul. Koszykowej, C –zielony dach i ogród deszczowy na dachu Biblioteki Uniwersytetu Warszawskiego).

Źródło: fotografia własna.

Celem publikacji **P3** „Changes in Stormwater Quality and Heavy Metals Content along the Rainfall-Runoff Process in an Urban Catchment” była analiza wybranych cech jakościowych wód opadowych wraz z oceną zmian stopnia zanieczyszczenia metalami ciężkimi w układzie opad-odpływ w zlewni miejskiej Olsztyna. Jakość wód opadowych w zlewni miejskiej zależy od wielu czynników, w tym sposobu użytkowania terenu, warunków atmosferycznych i działalności człowieka. Istotne jest więc poznanie tych zależności, bowiem we współczesnych miastach, w których ekspansja powierzchni nieprzepuszczalnych postępuje w szybkim tempie, woda opadowa spływająca po powierzchniach stanowi zagrożenie dla miejskich zbiorników wodnych.

Analiza różnic wybranych parametrów fizykochemicznych oraz stężenia metali ciężkich: Cu, Cr, Fe, Ni, Zn, Pb (Tabela 3), wykazała istotną zmienność między jakością próbek wody opadu bezpośredniego i rzeki Łyny, a próbkami wód pobranych ze stanowisk ukształtowanych w wyniku działalności człowieka (powierzchnia dachu oraz jezdnia, kolektor burzowy).

**Tabela 3.** Parametry fizykochemiczne (pH, SpCond, TDS, mętność, fDOM) oraz stężenie metali ciężkich (średnia  $\bar{x}$  ( $\mu\text{g/l}$ ),  $\pm$  odchylenie standardowe, SD) w analizowanej mikro-zlewni miejskiej. Analiza wariancji (one-way ANOVA): różne symbole literowe oznaczają grupy średnich różniących się istotnie statystycznie w teście Dunn’a ( $p < 0,05$ ).

		DR (n=12)	RR (n=48)	SR (n=12)	SC (n=12)	RU (n=12)	RD (n=12)
<b>pH</b>	Mediana	5,72 <sup>a</sup>	6,22 <sup>ab</sup>	6,83 <sup>b</sup>	7,79 <sup>b</sup>	7,46 <sup>b</sup>	7,32 <sup>b</sup>
	$\pm$ SD	0,72	0,58	0,44	0,44	0,39	0,38
<b>SpCond</b>	$\bar{x}$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	28,0 <sup>ab</sup>	73,0 <sup>b</sup>	244,3 <sup>cd</sup>	1439,5 <sup>d</sup>	342,1 <sup>cd</sup>	368,2 <sup>cd</sup>
	$\pm$ SD	15,6	113,0	324,5	1604,3	27,1	76,6
<b>TDS</b>	$\bar{x}$ (mg/L)	20,5 <sup>a</sup>	48,9 <sup>a</sup>	197,3 <sup>ab</sup>	935,7 <sup>c</sup>	236,2 <sup>b</sup>	247,5 <sup>b</sup>
	$\pm$ SD	9,8	72,9	297,9	1084,5	23,0	46,5
<b>Mętność</b>	$\bar{x}$ (NTU)	6,8	13,3	83,4	76,7	6,0	9,2
	$\pm$ SD	8,3	34,7	97,2	57,7	5,0	5,4
<b>fDOM</b>	$\bar{x}$ (QSU)	14,0	68,8	126,8	70,6	46,9	49,3
	$\pm$ SD	19,1	103,0	81,5	52,9	16,2	22,3
<b>Cu</b>	$\bar{x}$	5,0	27,2	37,1	92,2	3,7	6,9
	$\pm$ SD	5,6	41,7	45,2	85,9	2,6	4,3
<b>Cr</b>	$\bar{x}$	5,1	4,8	19,4	63,9	4,9	6,4
	$\pm$ SD	3,6	3,8	30,9	62,8	3,8	3,6
<b>Fe</b>	$\bar{x}$	144,4 <sup>a</sup>	221,1 <sup>abc</sup>	5668 <sup>cd</sup>	11835 <sup>d</sup>	665,2 <sup>cd</sup>	945,6 <sup>cd</sup>
	$\pm$ SD	126,8	250,8	14450	19941	294,3	386,7
<b>Ni</b>	$\bar{x}$	4,7 <sup>a</sup>	4,9 <sup>a</sup>	12,3 <sup>b</sup>	36,7 <sup>c</sup>	2,4 <sup>a</sup>	4,4 <sup>a</sup>
	$\pm$ SD	3,3	4,8	13,4	30,4	1,4	2,6
<b>Zn</b>	$\bar{x}$	108,8 <sup>ab</sup>	2330 <sup>c</sup>	231,4 <sup>ab</sup>	856,8 <sup>abc</sup>	7,3 <sup>a</sup>	11,7 <sup>a</sup>
	$\pm$ SD	51,1	2992	484,4	1217	7,4	7,0
<b>Pb</b>	$\bar{x}$	7,4 <sup>a</sup>	8,3 <sup>ab</sup>	25,0 <sup>cd</sup>	35,4 <sup>d</sup>	5,6 <sup>ab</sup>	5,5 <sup>ab</sup>
	$\pm$ SD	4,2	8,1	34,3	40,0	4,9	4,9

DN – opad bezpośredni, RR – spływ z powierzchni dachu, SR – spływ z powierzchni ulicy, SC – woda z kolektora burzowego, RU – woda rzeczna przed kolektorem burzowym; RD – woda rzeczna za kolektorem burzowym.

Uwzględniając wyniki uzyskane z powierzchni generujących spływ, najniższe wartości we wszystkich parametrach, z wyjątkiem Zn, oznaczono w spływie z dachu. Najwyższe natomiast w próbkach wody pozyskanych z kolektora burzowego. Podwyższona zawartość Zn w próbkach wody z dachu może mieć związek z materiałem, z którego wykonana jest rynna. Porównując próbki wody rzecznej pobranej przed i za kolektorem burzowym widoczny jest wzrost zanieczyszczenia, jednak różnice te nie są istotne statystycznie. W związku ze zróżnicowaniem częstotliwości wystąpienia opadów w pracy **P3** analizowano zależność stężenia metali ciężkich od liczby dni bezopadowych poprzedzających pomiar (ADP). Stwierdzono związek między ADP a jakością wody opadowej pobranej z dachu. Analiza współczynników korelacji Spearman'a wykazała, że są one istotne statystycznie w półroczu zimowym<sup>20</sup> dla Cr, Fe, Ni, Zn na poziomie  $p < 0,01$ , natomiast dla Pb na poziomie  $p < 0,05$ . W półroczu letnim<sup>21</sup> istotne korelacje między ADP a parametrami jakości wody są istotne dla Ni i Pb na poziomie istotności  $p < 0,05$  (Tabela 4). W okresie zimowym ma to bezpośredni związek z generowaniem zanieczyszczeń w wyniku spalania (ogrzewania domów piecami gazowymi lub węglowymi), zasolenia nawierzchni drogowych oraz zwiększonej emisji spalin.

**Tabela 4.** Współczynniki korelacji Spearman'a (\* –  $p < 0,05$ , \*\* –  $p < 0,01$ ) między stężeniami metali ciężkich ( $\mu\text{g/l}$ ) a liczbą dni suchych ADP (d) poprzedzających badany opad, w próbkach wody z dachu w półroczu zimowym i letnim.

		Cu	Cr	Fe	Ni	Zn	Pb
Półrocze zimowe	ADP	0.02	0.73**	0.68**	0.89**	0.88**	0.51*
Półrocze letnie	ADP	0.24	0.23	-0.38	0.44*	0.29	0.48*

Istotny dla jakości odpływającej wody okazał się czas trwania opadu i jego intensywność. Na podstawie analizy statystycznej próbek wody opadowej pozyskiwanych z dachu w 10 min interwałach czasowych określono zmienność wartości wybranych parametrów fizykochemicznych. Wyniki wykazały, że w ciągu pierwszych 10 minut od wystąpienia spływu powierzchniowego z dachu stężenie zanieczyszczeń jest najwyższe, niezależnie od pory roku (Załącznik P3, Fig. 4). Kolejne pobrane próbki zawierają mniejsze stężenia, jednak ich różnice nie są istotne statystycznie.

Uzyskane w pracy **P3** wyniki uzasadniają potrzebę wprowadzenia działań zmierzających do ograniczenia odpływu zanieczyszczeń z terenów zurbanizowanych. Wykazano, że nawet w warunkach o przeciętnej intensywności zabudowy Olsztyna, odpływ zanieczyszczeń, w szczególności w okresie zimowym, powinien zostać ograniczony. Biorąc pod uwagę wysokie

<sup>20</sup> Półrocze zimowe obejmuje okres od listopada do kwietnia.

<sup>21</sup> Półrocze letnie obejmuje okres od maja do października.

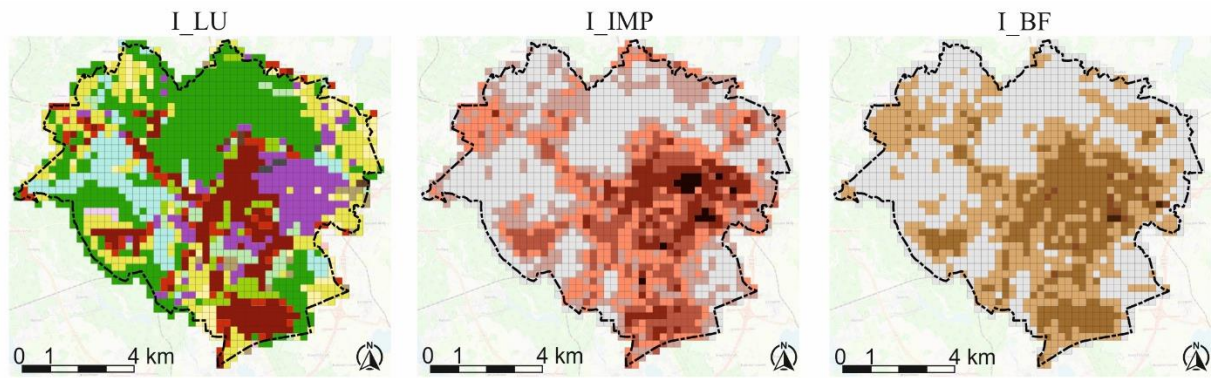
koszty popularnych urządzeń inżynierskich, BZI wydaje się być odpowiednim rozwiązaniem, bowiem elementy te łączą rozwiązania inżynierskie z rolą procesów naturalnych, co zostało opisane w pracy **P1**.

W publikacji **P4** „*GIS-Based Framework for Assessing Priority Locations for Blue-Green Infrastructure Implementation in Urban Areas*” wskazano potencjalne obszary wdrożenia elementów BZI na podstawie autorskiej metody opartej na środowisku GIS, pozwalającej wskazać obszary wymagające interwencji polegającej na rozszczelnieniu tkanki miejskiej. W niniejszej pracy na podstawie algorytmów matematycznych opracowano autorską metodę o akronimie LUSIA (ang. *Land Use Indicator Analysis*) umożliwiającą ocenę przestrzeni zurbanizowanej bazując na ogólnodostępnych bazach danych dotyczących sposobu użytkowania terenu i gęstości powierzchni nieprzepuszczalnych (CLMS) oraz danych topograficznych (BDOT10k). Ocenę przeprowadzono dla danych geoprzestrzennych z lat 2006, 2012 i 2018 na przykładzie Olsztyna. W tym celu obszar miasta został podzielony siatką kwadratów (250x250 m), których rozdzielczość okazała się optymalna z punktu widzenia szczegółowości danych i wielkości analizowanego miasta. Uzyskano 1549 komórek, dla których wyznaczono następujące wskaźniki: przeważającego sposobu użytkowania terenu (I\_LU), uszczelnienia powierzchni (I\_IMP), wysokości budynków (I\_BH) oraz gęstości powierzchni zabudowanej (I\_BF). Tereny, które ze względu na specyfikę użytkowania nie mogą zostać rozszczelnione (np. drogi główne, płyta lotniska, obiekty elektroenergetyczne) zostały wykluczone z analizy (I\_EX).

Analiza wskaźnika I\_LU wykazała, że w 2018 r. największy udział w powierzchni Olsztyna (32,9%) miały tereny leśne (UA 31000). Mimo, że przeważający sposób użytkowania nie uległ zmianie w okresie 2006-2018, to widoczne są zmiany struktury krajobrazu miejskiego. Wartość I\_LU wskazuje na przyrost tkanki miejskiej (UA 11100), w 2018 r. odnotowano wzrost o 4,5% w stosunku do 2006 r. Zmiany struktury użytkowania odzwierciedlają także przekształcenia I\_IMP. Na podstawie I\_IMP stwierdzono, że w okresie od 2012 r. do 2018 r. nastąpiły istotne przekształcenia struktury krajobrazu miejskiego Olsztyna. Przy czym należy zwrócić uwagę na przekształcenia w części południowej, spowodowane intensywnym rozwojem osiedli mieszkaniowych, oraz części centralnej, gdzie w latach 2006-2018 rozwinął się sektor usługowy oraz przemysłowy. Na podstawie I\_LU oraz I\_IMP należy zwrócić uwagę, że w konsekwencji rozwoju przestrzeni uszczelnionej nastąpiło zakłócenie przebiegu naturalnego pierścienia zieleni (ang. *green belt*) na obrzeżach miasta, który stanowi swoistego rodzaju bufor krajobrazowy i ekologiczny. Stopień uszczelnienia powierzchni bez wątpienia jest kształtowany rozwojem zabudowy. Zmiany w zakresie I\_BH są zauważalne w części

południowej Olsztyna (Osiedle Bartąg), która na przestrzeni ostatnich lat została wchłonięta przez tkankę miejską. Natomiast w części centralnej (Osiedle Kormoran ul. Dworcowa), gdzie przeważającą część zabudowy stanowią bloki mieszkalne z wielkiej płyty z lat 70 i 90. XX wieku, zmian wskaźnika  $I_{BH}$  w analizowanym zakresie czasowym nie stwierdzono. Gęstość zabudowy, którą oceniono wskaźnikiem  $I_{BF}$ , nie przekracza 80% powierzchni żadnego z pól siatki ( $I_{BF}=5$ ). Ostatnim etapem analizy struktury użytkowania miasta było wskazanie obszarów wykluczonych ( $I_{EX}$ ) z dalszych procedur badawczych. W toku analizy bazującej na BDOT10k wykluczono 542 pola (35%).

Wskazanie dynamiki zmian przyjętych wskaźników (Załącznik P4, Rys. 3-5,) pozwala na wielowymiarową ocenę efektów urbanizacji. Stosując metodykę LUSIA, możliwe jest określenie możliwości poprawy jakości środowiska miejskiego pod względem hydrologicznym, krajobrazowym i ekologicznym (bioróżnorodność) za pomocą BZI. Skupiono się na czterech elementach BZI (zielonych dachach, zielonych ścianach, ogrodach deszczowych, nawierzchniach przepuszczalnych). Kryteria pożądaných wartości wskaźników zaprezentowano w Załączniku P4, Tabela 2. Przyjęto, że w obrębie jednego pola może zostać wykorzystany więcej niż jeden rodzaj BZI, w związku z tym wskazano łącznie 209 obszarów w obrębie siatki, co daje możliwość rozszczelnienia około 23% powierzchni nieprzepuszczalnych (Rys. 7).



LEGENDA:

▬ Granica miasta

□ Siatka kwadratowa (250x250 m)

I\_LU:

- 11100
- 11210
- 11220
- 11240
- 12100
- 12230
- 12400
- 13100
- 13300
- 14100
- 14200
- 21000
- 23000
- 31000
- 50000

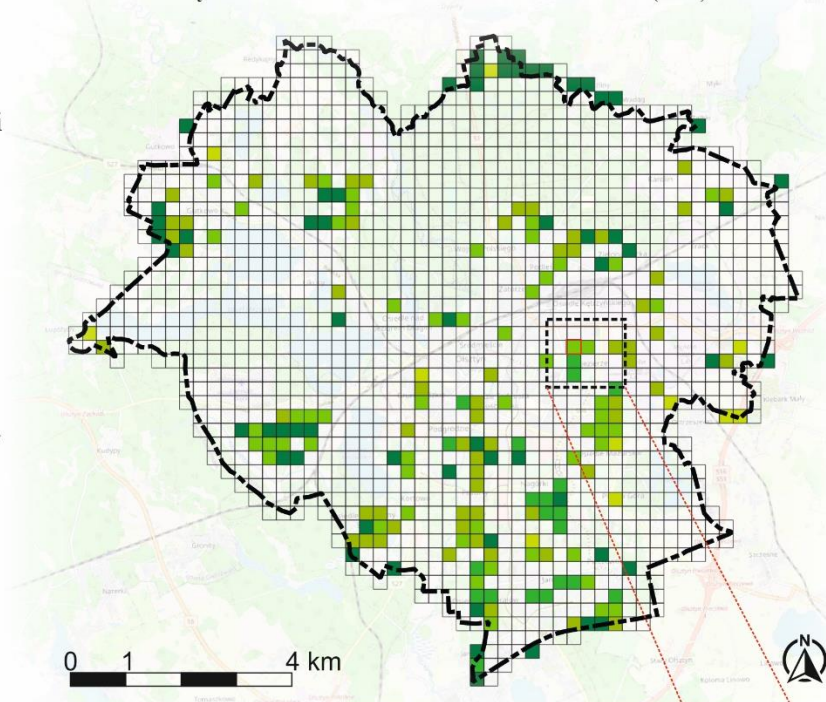
I\_IMP:

- Brak informacji
- <10 %
- 10 - 30%
- 30 - 50%
- 50 - 80%
- >80%

I\_BF:

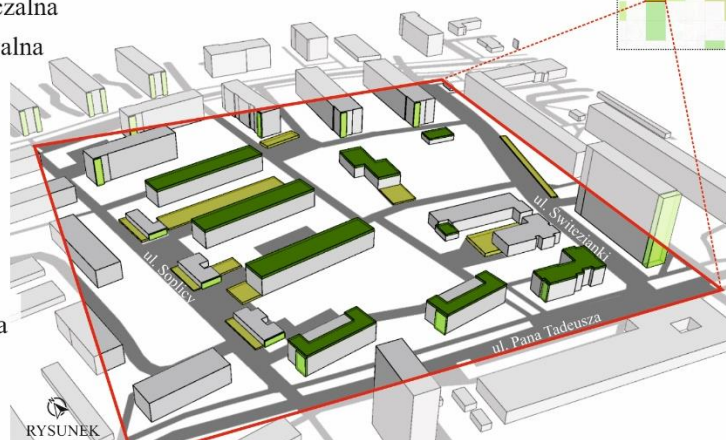
- Brak zabudowy
- <10 %
- 10 - 30%
- 30 - 50%
- 50 - 80%
- >80%

BŁĘKITNO-ZIELONA INFRASTRUKTURA (BZI)



Rozwiązania BZI:

- ogród deszczowy, zielona ściana i nawierzchnia nieprzepuszczalna
- zielona ściana, zielony dach i nawierzchnia nieprzepuszczalna
- zielona ściana i nawierzchnia nieprzepuszczalna
- zielony dach i nawierzchnia nieprzepuszczalna
- nawierzchnia nieprzepuszczalna
- granica pola 250x250 m.
- droga lub ciąg pieszy
- budynek
- proponowana zielona ściana
- proponowany zielony dach
- proponowana nawierzchnia przepuszczalna



**Rysunek 7.** Wyniki analizy wskaźników I\_LU, I\_IMP, I\_BF dla struktury użytkowania Olsztyna w 2018 r. wraz ze wskazaniem priorytetowych lokalizacji elementów BZI.

Źródło: opracowanie własne.



## 6. Dyskusja wyników

Negatywne konsekwencje urbanizacji prowadzą do coraz większych wyzwań, zwłaszcza w świetle zmian klimatu, gdzie na zmieniony antropogenicznie obieg wody nakłada się coraz większa nierównomierność i intensywność opadów deszczu. W związku z tym, wzrastające ryzyko lokalnych podtopień i powodzi stanowi zarówno zagrożenie dla mieszkańców jak i infrastruktury technicznej, ale też prowadzi do trwałej degradacji ekosystemów wodnych, co często znajduje potwierdzenie w literaturze (Rajeshkumar i in., 2018; Wang i in., 2017). W świetle powyższego, pojawia się więc potrzeba opracowania skutecznych metod i strategii gospodarowania wodami opadowymi.

Tradycyjne rozwiązania inżynierskie, takie jak systemy kanalizacji deszczowej, mają ograniczoną przepustowość, która nie jest dostosowana do stale pogłębiających się zmian klimatycznych. Konstrukcja tego typu rozwiązań ma na celu wyłącznie szybkie odprowadzenie wody deszczowej (spływu powierzchniowego) z obszarów zurbanizowanych bezpośrednio do odbiornika. Dlatego też, należy zwrócić uwagę na elementy BZI, które w odróżnieniu od tradycyjnych rozwiązań inżynierskich, uwzględniają dodatkowo procesy naturalnie zachodzące w środowisku (Bus i in., 2023). Próba odtworzenia procesów naturalnych, takich jak infiltracja, czy zwiększenie ewapotranspiracji, ma realny wpływ na zmniejszenie ryzyka występowania lokalnych podtopień oraz degradacji zbiorników wodnych, co opisano w pracy **P1**. Na podstawie dostępnej literatury potwierdzono, że BZI jest skutecznym narzędziem walki z negatywnymi skutkami urbanizacji w kontekście gospodarki wodą opadową, równocześnie poprawiając walory estetyczne krajobrazu miejskiego.

W związku z rosnącym zainteresowaniem BZI oraz świadomością społeczną w zakresie potrzeby zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi, obserwuje się, że dokumenty planistyczne w polskich miastach uwzględniają potrzebę implementacji tego typu elementów BZI do przestrzeni miejskiej. Na przykład, na terenie Wrocławskiego Obszaru Funkcjonalnego (WrOF) w 2020 r. został opracowany i uchwalony plan działań z zakresu wdrażania systemu zielonej infrastruktury, którego efektem finalnym ma być zwiększenie wartości ekonomicznej publicznych terenów zielonych oraz zapewnienie zrównoważonego rozwoju WrOF. Z kolei Biuro Rozwoju Gdańska w 2023 r. opublikowało „Gdańską Politykę Zieleni”, w której zaprezentowano wizję sieciowego układu BZI, który poza zrównoważonym rozwojem, wpłynie korzystnie na jakość życia mieszkańców. Warto podkreślić, że funkcjonuje wiele instytucji, które prowadzą inicjatywy edukacyjne, w zakresie urbanizacji, zmian klimatu, zrównoważonego rozwoju a także korzyści BZI, m.in. Fundacja Sendzimira, Polskie Stowarzyszenie Dachy Zielone. W dokumentach planistycznych sporządzonych dla Olsztyna,

sugestie wdrażania BZI pojawiły się we wrześniu 2022 r.<sup>22</sup>. Mimo, że nie upłynęło jeszcze dużo czasu, to w krajobrazie miasta możliwa jest identyfikacja rozwiązań tego typu, m.in. zielona ściana – Decathlon, zielony dach – Warmia Towers, ogród deszczowy – Zaulek Optymistów, ul. Żeromskiego. Niemniej jednak, sposób ich rozmieszczenia jest podyktowany w głównej mierze próbą poprawy estetyki przestrzeni, a realizacja tych założeń często jest efektem cennych, ale nie popartych badaniami naukowymi, inicjatyw społecznych. W efekcie, elementy BZI, nie wykorzystują w pełni swojego potencjału, ponieważ ich lokalizacja bywa przypadkowa.

Ocenę lokalizacji oraz ciągłości istniejących systemów BZI zaprezentowano w pracy **P2** bazując na zróżnicowanych formach zieleni w Warszawie. Mimo, że w krajobrazie miejskim Warszawy zidentyfikowano elementy BZI, to udział powierzchni nieprzepuszczalnych w stosunku do powierzchni układu zieleni jest na tyle duży, że prowadzi do zakłóceń zrównoważonego rozwoju miasta, tym samym zagrażając bioróżnorodności, lokalnym warunkom klimatycznym, a także naturalnemu obiegowi wody.

W związku z dynamicznymi zmianami sposobu użytkowania terenu (Noszczyk i in., 2020) obejmującymi wzrost powierzchni uszczelnionych, a co za tym idzie zaburzeniami cyklu hydrologicznego, nie ma możliwości infiltracji czy redukcji zanieczyszczeń. W świetle doniesień badaczy (Gnecco i in., 2005; Ladislav i in., 2012; Ociepa, 2011; Sakson i in., 2014), oraz przeprowadzonych badań własnych (**P3**) stwierdzono, że powierzchnie nieprzepuszczalne gromadzą zanieczyszczenia metali ciężkich (Cu, Cr, Fe, Ni, Zn, Pb), które natępnie są uruchamiane w trakcie zmywów opadowych. Prezentowane wyniki analiz stężenia metali ciężkich w próbkach wód opadowych oraz doniesienia naukowców jednoznacznie wskazują na niekorzystny wpływ powierzchni nieprzepuszczalnych na jakość spływu powierzchniowego, w szczególności gdy depozycja ma miejsce w długim okresie bezopadowym zimą. Badania przeprowadzone przez m.in. (Soltaninia i in., 2022) potwierdzają, że wraz z wydłużaniem się okresu bezopadowego stężenie zanieczyszczeń w wodzie na trasie opad-odpływ wzrasta co najmniej 2-krotnie. Najczęstszym źródłem zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego w miastach jest ruch samochodowy, który prowadzi do wzrostu stężenia Pb, Cu i Fe (Adachi i Tainosho, 2004; Chen i in., 2010). Zaprezentowane w publikacji **P3** wyniki badań potwierdzają dotychczasowe doniesienia z literatury, niemniej jednak stężenie metali ciężkich w próbkach wód pobranych na terenie zlewni z Olsztyna oscyluje w dolnych zakresach (Ballo i in., 2009; Shajib i in., 2019; Xue i in., 2020). Uzyskane wyniki badań w pracy **P3** należy uznać

---

<sup>22</sup> Strategia Rozwoju Miasta - Olsztyn 2030+ (2022)

za reprezentatywne dla zlewni miejskiej o relatywnie niskim stopniu przekształcenia i intensywności użytkowania.

Pomimo, że problematyka podjęta w rozprawie doktorskiej staje się coraz bardziej popularna, a BZI jest zagadnieniem, które dominuje w literaturze z zakresu urbanistyki, to wciąż brakuje efektywnych narzędzi służących planowaniu kierunków rozwoju miast, czy rewitalizacji zgodnie z założeniami zrównoważonego rozwoju. O ile program rozwoju miast bywa opracowywany przez zespoły eksperckie z różnych dziedzin, to w przypadku rewitalizacji obszarów miejskich, działania te podejmowane są *ad hoc* (Jaszczak i in., 2022).

Narzędziem, które może efektywnie wesprzeć pracę planistów w zakresie lokalizacji i doboru elementów BZI jest opracowany w ramach pracy doktorskiej i opisany w pracy **P4** matematyczny model LUSIA. Wykorzystuje on oprogramowanie GIS umożliwiając integrację danych w różnych formach (dane wektorowe, rastrowe, WMS). Dzięki temu możliwe jest względnie szybkie oszacowanie skutków różnych scenariuszy miejskich, co pozwoli na podejmowanie trafnych decyzji inwestycyjnych, które uwzględniają szereg czynników urbanistycznych. Dotychczasowe narzędzia bazujące na analizach wykonywanych w GIS odwołują się przede wszystkim do jednego rodzaju danych, np. zdjęć satelitarnych (Elkhrachy, 2015), obrazów termicznych (Abbas i Ismael, 2020), danych społeczno-ekonomicznych i demograficznych (Sidiqui i in., 2022), unikalne są nadal metody wielowskaźnikowe, np. LANCA® (Bos i in., 2020).

Zaproponowany model ma potencjał aplikacyjny. Należy podkreślić, że zastosowanie go w obecnej formie, jest dedykowane jako wsparcie procesów rewitalizacji przestrzeni, dzięki łatwej weryfikacji efektów podczas wizji terenowej. Takie podejście zostało przyjęte w pracy **P4**. Natomiast w przypadku obszarów przewidzianych do zagospodarowania (zabudowy) w przyszłości, LUSIA może zostać traktowane jako model predykcyjny. Należy podkreślić, że planowane jest rozszerzenie funkcjonalności modelu LUSIA i uwzględnienia wskaźników hydrologicznych, meteorologicznych, czy ukształtowania terenu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, których wyniki zaprezentowano w publikacjach **P1-P4** wykazano istotną rolę BZI w przestrzeni zurbanizowanej. Badania terenowe i prace analityczne poprzedzone szeroką analizą literatury naukowej, dokumentów strategicznych i planistycznych (**P1**) pozwoliły na zrozumienie złożoności pojęcia BZI, które dzięki zapewnieniu szeregu korzyści hydrologicznych, ekologicznych, krajobrazowych, a nawet społecznych, stanowi swoistego rodzaju przeciwwagę dla zdegradowanych elementów środowiska miejskiego.

W świetle wdrażania błękitno-zielonej infrastruktury w Polskich miastach niezbędne jest skoordynowanie działań planistycznych, projektowych i wdrożeniowych z uwzględnieniem wymogów określonych celami zrównoważonego rozwoju. Dzisiaj większość miast polskich, na czele z Warszawą (**P2**) posiada rozproszony system zieleni naturalnej, jak i urządzonej, a lokalizacja elementów BZI składających się na całość tego systemu często sprawia wrażenie przypadkowej. Wzmocnienie wzajemnych powiązań systemu zielonej infrastruktury w skali miasta jest ważne dla zwiększenia jego efektywności w poprawie miejskich warunków środowiskowych i dostarczaniu usług ekosystemowych. Ma to szczególne znaczenie w świetle wyników uzyskanych w analizach jakości wód opadowych na trasie opad-odpływ (**P3**). Nie ulega wątpliwości, że w związku z postępującą urbanizacją następuje redukcja przestrzeni retencjonujących wodę. Efektem takich zakłóceń cyklu hydrologicznego jest więc wzmożony transport zanieczyszczeń w spływie powierzchniowym z obszarów uszczelnionych. Wysokie stężenia metali ciężkich w próbkach wody pobranych z kolektora burzowego świadczą nie tylko o zagrożeniu dla ekosystemów jakie niesie za sobą ekspansja powierzchni nieprzepuszczalnych, ale potwierdzają potrzebę interwencji w zakresie ochrony wód i ekosystemów wodnych na obszarach zurbanizowanych.

Badania, których wyniki zostały opisane w publikacjach **P1-P3** wraz z oceną dynamiki niekorzystnych zmian struktury użytkowania terenu (**P4**), a co za tym idzie wskazania kierunków rozwoju przestrzeni zurbanizowanej, wskazują na potrzebę wdrażania BZI. W obliczu ciągłej ekspansji przestrzeni miejskich, które są nieprzepuszczalne dla wody, istotnym staje się przyjęcie zintegrowanego i holistycznego podejścia interdyscyplinarnego, mającego na celu podejmowanie przemyślanych decyzji planistycznych opartych na solidnej bazie wiedzy. W tym kontekście, zastosowanie innowacyjnych narzędzi, takich jak model LUSIA przedstawiony w tej rozprawie, okazuje się kluczowe. Odpowiedni wybór, umiejscowienie oraz projektowanie elementów BZI, mające na celu optymalizację warunków hydrologicznych, ekologicznych i krajobrazowych na poziomie miast czy poszczególnych osiedli, ma istotny wpływ na poprawę jakości życia ich mieszkańców. Poprzez takie działania, możliwe staje się nie tylko zwiększenie zasobów wodnych i poprawa bioróżnorodności, ale również podniesienie estetyki miejskiej przestrzeni, co razem przyczynia się do budowania zdrowszych, bardziej zrównoważonych i społecznie inkluzywnych środowisk miejskich.

## 7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej badania umożliwiły osiągnięcie celów naukowych oraz skuteczną weryfikację postawionych hipotez. Ujawniły one, iż błękitnozielona infrastruktura (BZI), dzięki synergii zaawansowanych technologii inżynierskich i naturalnych procesów ekologicznych, stanowi kluczowe narzędzie w polepszaniu warunków środowiskowych w obszarach miejskich. Wykazano, że BZI oferuje istotne korzyści w zakresie hydrologii, bioróżnorodności oraz estetyki, wspierając trwałą transformację miast w kierunku zrównoważonego rozwoju.

Urbanizacja prowadzi do istotnych przeobrażeń środowiska, które wykraczają poza możliwości jego samodzielnej regeneracji. Potwierdzono, że dynamiczny rozwój przestrzeni miejskiej prowadzi do fragmentacji i zakłóceń w ciągłości miejskich systemów zieleni. Zastępowanie naturalnych obszarów i urządzonych przestrzeni przez zabudowę i infrastrukturę powoduje nie tylko degradację estetyki, ale przede wszystkim zakłóca naturalny cykl wody, prowadząc do zwiększonego spływu powierzchniowego i akumulacji zanieczyszczeń. Wysokie stężenia zanieczyszczeń, zwłaszcza metali ciężkich, w spływie powierzchniowym mogą stanowić zagrożenie dla ekosystemów wodnych, które są odbiornikami tych wód. Ryzyko degradacji środowiska jest zdecydowanie wyższe w półroczu zimowym, co ma bezpośredni związek ze zwiększoną ekspozycją przestrzeni uszczelnionych na zanieczyszczenia antropogeniczne. Sezonowość, częstotliwość opadów, intensywność opadów, a zwłaszcza sposób użytkowania terenu mają istotny wpływ na jakość wody opadowej w procesie opad-odpływ. Dlatego też postępująca urbanizacja wymusza konieczność wykorzystywania BZI w przestrzeni miejskiej. Skala oddziaływania oraz skuteczność BZI jest jednak zależna od odpowiedniej lokalizacji tych elementów. Precyzyjne rozpoznanie warunków lokalnych może więc stanowić skuteczną metodę w ocenie obszarów wymagających interwencji, zaś prawidłowe wskazanie obszarów priorytetowych umożliwi osiągnięcie zamierzonych efektów w kontekście struktury użytkowania przestrzeni zurbanizowanej.

Podsumowując, wyniki badań pokazują, że odpowiednio zaprojektowana i zaimplementowana BZI ma ogromny potencjał w kształtowaniu zrównoważonych środowisk miejskich. Jest to kierunek, który nie tylko odpowiada na wyzwania współczesnej urbanizacji, ale także otwiera drogę do lepszej przyszłości, w której miasta są w harmonii z naturalnymi procesami i wspierają dobrostan wszystkich swoich mieszkańców.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej dotyczącej błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) w miastach, można sformułować następujące wnioski i rekomendacje:

1. Błękitno-zielona infrastruktura (BZI) stanowi kluczowe narzędzie integrujące zaawansowane rozwiązania inżynierskie z naturalnie zachodzącymi procesami. Jej zastosowanie przynosi istotne korzyści hydrologiczne, ekologiczne oraz estetyczne, podnosząc jakość życia w środowisku miejskim.
2. Istotne znaczenie BZI wynika z jej wpływu na zaburzony cykl hydrologiczny w obszarach zurbanizowanych. Odpowiednio wykorzystane BZI mogą zredukować spływ powierzchniowy o 70% oraz zwiększyć proces infiltracji (do 60%). Implementacja BZI pozwala na ewapotranspirację od 19 do 84% opadów dla ogrodów deszczowych, od 51 do 83% dla zielonych dachów oraz 23% dla zielonych ścian.
3. W analizie przypadku Warszawy wykazano, że możliwe jest efektywne wdrażanie BZI, w tym ogrodów deszczowych, zielonych dachów i zielonych ścian. Te rozwiązania mogą służyć jako model dla innych metropolii dążących do zwiększenia odporności na zmiany klimatyczne i poprawy jakości życia miejskiego.
4. Urbanizacja prowadzi do fragmentacji i degradacji systemów zieleni, a ekspansja powierzchni nieprzepuszczalnych potęguje ten problem. Dlatego niezbędne jest dostosowanie BZI do istniejącego zagospodarowania przestrzennego, by przeciwdziałać negatywnym skutkom urbanizacji i wspierać zrównoważony rozwój miast.
5. Analiza stężeń metali ciężkich w badaniach opad-odpływ podkreśla rolę BZI w redukcji zanieczyszczeń. Najniższe stężenia metali pochodzące z powierzchni utwardzonych zaobserwowano w próbkach z dachów, co wskazuje na potencjalne korzyści płynące z zastosowania zielonych dachów w ograniczaniu zanieczyszczeń wprowadzanych do systemu kanalizacji burzowej. Najwyższe stężenia metali stwierdzono w próbkach wód pobranych z kolektora burzowego, co świadczy o braku możliwości podczyszczenia i bezpośrednim zagrożeniu odbiorników tych wód (rzeki, jeziora).
6. Zmniejszenie częstotliwości opadów deszczu ma bezpośredni wpływ na wzrost stężenia metali w spływie powierzchniowym. Wraz ze spadkiem częstotliwości opadów deszczu, stężenie metali w spływie powierzchniowym w okresie zimowym wzrosło dla Cr o 65%, dla Cu o 52%, dla Ni o 74%, dla Pb o 60% oraz dla Zn o 93%.

7. Skuteczna implementacja BZI wymaga opracowania nowych narzędzi planistycznych i analitycznych, jako efektu współpracy między różnymi sektorami i dyscyplinami. Przyszłe strategie powinny skupić się na promowaniu świadomości i edukacji na temat korzyści płynących z BZI, rozwijaniu narzędzi wspomagających ich projektowanie i implementację, oraz na poszukiwaniu nowych form finansowania tych inicjatyw.
8. Opracowany model matematyczny LUSIA (ang. *Land Use Indicator Analysis*) uwzględniając sposób użytkowania terenu, stopień uszczelnienia, średnią wysokość zabudowy oraz jej zagęszczenie jest obiektywnym narzędziem do wskazania potencjalnych lokalizacji i odpowiednich rodzajów BZI na obszarze miast.
9. Świadomie kształtowana i lokalizowana BZI może stać się nie tylko elementem łagodzenia skutków zmian klimatycznych i poprawy jakości życia w miastach, ale również ważnym czynnikiem w kształtowaniu przyszłych, zrównoważonych i odpornych na zmiany klimatyczne środowisk miejskich.

## Spis literatury

1. Abbas, W., Ismael, H. (2020). Assessment of constructing canopy urban heat island temperatures from thermal images: An integrated multi-scale approach. *Scientific African*, 10, Article e00607. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00607>
2. Adachi, K., Tainosho, Y. (2004). Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment International*, 30(8), 1009-1017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>
3. Almaaitah, T., Appleby, M., Rosenblat, H., Drake, J., Joksimovic, D. (2021). The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: a systematic literature review. *Blue-Green Systems*, 3(1), 223-248. <https://doi.org/10.2166/bgs.2021.016>
4. Autixier, L., Mailhot, A., Bolduc, S., Madoux-Humery, A. S., Galarneau, M., Prevost, M., Dorner, S. (2014). Evaluating rain gardens as a method to reduce the impact of sewer overflows in sources of drinking water. *Science of the Total Environment*, 499, 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.030>
5. Ballo, S., Liu, M., Hou, L. J., Chang, J. (2009). Pollutants in stormwater runoff in Shanghai (China): Implications for management of urban runoff pollution. *Progress in Natural Science-Materials International*, 19(7), 873-880. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.021>
6. Baryła, A., Gnatowski, T., Karczmarczyk, A., Szatyłowicz, J. (2019). Changes in Temperature and Moisture Content of an Extensive-Type Green Roof. *Sustainability*, 11(9), Article 2498. <https://doi.org/10.3390/su11092498>
7. Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
8. Besir, A. B., Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 915-939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
9. Bos, U., Maier, S. D., Horn, R., Leistner, P., Finkbeiner, M. (2020). A GIS based method to calculate regionalized land use characterization factors for life cycle impact assessment using LANCA®. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(7), 1259-1277. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01730-y>
10. Bus, A., Karczmarczyk, A., Baryła, A. (2023). Nature-based solutions enhanced by reactive materials for the protection of urban water bodies. *Desalination and Water Treatment*, 281, 70-77. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.28859>
11. Chen, X., Xia, X. H., Zhao, Y., Zhang, P. (2010). Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 640-646. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.060>
12. Coma, J., Perez, G., de Gracia, A., Bures, S., Urrestarazu, M., Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
13. Corsi, S. R., Graczyk, D. J., Geis, S. W., Booth, N. L., Richards, K. D. (2010). A Fresh Look at Road Salt: Aquatic Toxicity and Water-Quality Impacts on Local, Regional, and National Scales. *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7376-7382. <https://doi.org/10.1021/es101333u>
14. Dietz, M. E., Clausen, J. C. (2005). A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment. *Water Air and Soil Pollution*, 167(1-4), 123-138. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8>



15. Ebrahimian, A., Wadzuk, B., Traver, R. (2019). Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems. *Science of the Total Environment*, 688, 797-810. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.256>
16. Elkhrachy, I. (2015). Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 18(2), 261-278. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007>
17. European Commission (2013). *Building a Green Infrastructure for Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Dostęp 29.01.2024, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/738d80bb-7d10-47bc-b131-ba8110e7c2d6/language-en>
18. European Commission (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities : final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities':(full version)*. Publications Office. <https://doi.org/10.2777/479582>
19. European Environment Agency (2011). *Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems*. Publications Office of the European Union. Dostęp 25.01.2024, <https://eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion>
20. European Environment Agency (2017). *Green Infrastructure and Flood Management. Promoting cost-efficient flood risk reduction via green infrastructure solutions*. Publications Office of the European Union. Dostęp 25.01.2024, <https://eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion>
21. FISRWG (10/1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG) (15 Federal agencies of the US gov't). GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN3/PT.653. ISBN-0-934213-59-3
22. Gnecco, I., Berretta, C., Lanza, L. G., La Barbera, P. (2005). Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmospheric Research*, 77(1-4), 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.017>
23. Hu, M. C., Zhang, X. Q., Siu, Y. L., Li, Y., Tanaka, K., Yang, H., Xu, Y. P. (2018). Flood Mitigation by Permeable Pavements in Chinese Sponge City Construction. *Water*, 10(2), Article 172. <https://doi.org/10.3390/w10020172>
24. Jaszczak, A., Pochodyła, E., Płoszaj-Witkowska, B. (2022). Transformation of Green Areas in Central Squares after Revitalization: Evidence from Cittaslow Towns in Northeast Poland. *Land*, 11(4), Article 470. <https://doi.org/10.3390/land11040470>
25. Kasperek, R., Mokwa, M., Wiatkowski, M. (2013). Modelling of pollution transport with sediment on the example of the Widawa river. *Archives of Environmental Protection*, 39(2), 29-43. <https://doi.org/10.2478/aep-2013-0017>
26. Kew, B., Pennypacker, E., Echols, S. (2014). Can greenwalls contribute to stormwater management? A study of cistern storage greenwall first flush capture. *Journal of Green Building*, 9(3), 85-99. <https://doi.org/10.3992/1943-4618-9.3.85>
27. Ladislav, S., El-Mufleh, A., Gerente, C., Chazarenc, F., Andres, Y., Bechet, B. (2012). Potential of Aquatic Macrophytes as Bioindicators of Heavy Metal Pollution in Urban Stormwater Runoff. *Water Air and Soil Pollution*, 223(2), 877-888. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0909-3>
28. Lau, J. T., Mah, D. Y. S. (2018). Green Wall for Retention of Stormwater. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 26(1), 283-297.
29. Legret, M., Colandini, V. (1999). Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: Water quality and fate of heavy metals. *Water Science and Technology*, 39(2), 111-117. [https://doi.org/10.1016/s0273-1223\(99\)00014-1](https://doi.org/10.1016/s0273-1223(99)00014-1)

30. Li, C. H., Peng, C., Chiang, P. C., Cai, Y. P., Wang, X., Yang, Z. F. (2019). Mechanisms and applications of green infrastructure practices for stormwater control: A review. *Journal of Hydrology*, 568, 626-637. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.074>
31. Li, J. K., Zhang, B., Li, Y. J., Li, H. E. (2018). Simulation of Rain Garden Effects in Urbanized Area Based on Mike Flood. *Water*, 10(7), Article 860. <https://doi.org/10.3390/w10070860>
32. Lin, W. G., Ryu, S., Cho, Y. H. (2014). A case study of flow characteristics of permeable pavements by time and space model. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(7), 660-666. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0165>
33. Lu, G. Y., Torzs, T., Liu, P. F., Zhang, Z. Y., Wang, D. W., Oeser, M., Grabe, J. (2020). Dynamic Response of Fully Permeable Pavements: Development of Pore Pressures under Different Modes of Loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(7), 13, Article 04020160. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003217](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003217)
34. McIntyre, J. K., Davis, J. W., Incardona, J. P., Stark, J. D., Anulacion, B. F., Scholz, N. L. (2014). Zebrafish and clean water technology: Assessing soil bioretention as a protective treatment for toxic urban runoff. *Science of the Total Environment*, 500, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.066>
35. Nelson, K. C., Palmer, M. A., Pizzuto, J. E., Moglen, G. E., Angermeier, P. L., Hilderbrand, R. H., Dettinger, M., Hayhoe, K. (2009). Forecasting the combined effects of urbanization and climate change on stream ecosystems: from impacts to management options. *Journal of Applied Ecology*, 46(1), 10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01599.x>
36. Noszczyk, T., Rutkowska, A., Hernik, J. (2020). Exploring the land use changes in Eastern Poland: statistics-based modeling. *Human and Ecological Risk Assessment*, 26(1), 255-282. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1506254>
37. Ociepa, E. (2011). Evaluation of contamination of precipitation water flowing into draining systems. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 357-364.
38. Perini, K., Ottel , M. (2014). Designing green façades and living wall systems for sustainable constructions. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 9(1), 31-46.
39. Radic, M., Dodig, M. B., Auer, T. (2019). Green Facades and Living Walls-A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits. *Sustainability*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174579>
40. Rajeshkumar, S., Liu, Y., Zhang, X. Y., Ravikumar, B., Bai, G., Li, X. Y. (2018). Studies on seasonal pollution of heavy metals in water, sediment, fish and oyster from the Meiliang Bay of Taihu Lake in China. *Chemosphere*, 191, 626-638. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.078>
41. Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2100-2110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029>
42. Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C. H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., Sulaiman, M. Y. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 23, 155-168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>
43. Sakson, G., Zawilski, M., Badowska, E., Brzezińska, A. (2014). Stormwater pollution as the basis of choice the method of their management. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 253-264. <https://doi.org/10.7862/rb/2014.60>
44. Sanicola, O., Lucke, T., Devine, J. (2018). Using permeable pavements to reduce the environmental impacts of urbanisation. *International Journal of Geomate*, 14(41), 159-166. <https://doi.org/10.21660/2018.41.Key3>
45. Scholz, M., Grabowlecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>

46. Senes, G., Ferrario, P. S., Cirone, G., Fumagalli, N., Frattini, P., Sacchi, G., Valè, G. (2021). Nature-Based Solutions for Storm Water Management-Creation of a Green Infrastructure Suitability Map as a Tool for Land-Use Planning at the Municipal Level in the Province of Monza-Brianza (Italy). *Sustainability*, 13(11), 6124. <https://doi.org/10.3390/su13116124>
47. Shajib, M. T. I., Hansen, H. C. B., Liang, T., Holm, P. E. (2019). Metals in surface specific urban runoff in Beijing. *Environmental Pollution*, 248, 584-598. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.039>
48. Sidiqui, P., Roös, P. B., Herron, M., Jones, D. S., Duncan, E., Jalali, A., Allam, Z., Roberts, B. R., Schmidt, A., Ur Rehman Tariq, M. A., Shah, A. A., Khan, N. A., Irshad, M. (2022). Urban Heat Island vulnerability mapping using advanced GIS data and tools. *Journal of Earth System Science*, 131(4), Article 266. <https://doi.org/10.1007/s12040-02202005-w>
49. Siwiec, E., Erlandsen, A. M., Vennemo, H. (2018). City Greening by Rain Gardens - Costs and Benefits. *Environmental Protection and Natural Resources*, 29(1), 1–5. <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0001>
50. Soltaninia, S., Taghavi, L., Hosseini, S. A., Motamedvaziri, B., Eslamian, S. (2022). The effect of land-use type and climatic conditions on heavy metal pollutants in urban runoff in a semi-arid region. *Water Reuse*, 12(4), 384-402. <https://doi.org/10.2166/wrd.2022.046>
51. Soulis, K. X., Ntoulas, N., Nektarios, P. A., Kargas, G. (2017). Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological Engineering*, 102, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.031>
52. Sun, W. J., Lu, G. Y., Ye, C., Chen, S. W., Hou, Y., Wang, D. W., Wang, L. B., Oeser, M. (2018). The State of the Art: Application of Green Technology in Sustainable Pavement . *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 19, 9760464. <https://doi.org/10.1155/2018/9760464>
53. Szewranski, S., Chruscinski, J., van Hoof, J., Kazak, J. K., Swiader, M., Tokarczyk-Dorociak, K., Zmuda, R. (2018). A Location Intelligence System for the Assessment of Pluvial Flooding Risk and the Identification of Storm Water Pollutant Sources from Roads in Suburbanised Areas. *Water*, 10(6), 746. <https://doi.org/10.3390/w10060746>
54. Tomaszewska, B., Olszowski, T. (2012). Quantitative and qualitative assessment of the dust deposition on the rural area. *Proceedings of ECOpole*, 609-616. [https://doi.org/10.2429/proc.2012.6\(2\)082](https://doi.org/10.2429/proc.2012.6(2)082)
55. van de Wouw, P. M. F., Ros, E. J. M., Brouwers, H. J. H. (2017). Precipitation collection and evapo(transpi)ration of living wall systems: A comparative study between a panel system and a planter box system. *Building and Environment*, 126, 221-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.002>
56. Wang, Q., Zhang, Q. H., Wu, Y., Wang, X. C. C. (2017). Physicochemical conditions and properties of particles in urban runoff and rivers: Implications for runoff pollution. *Chemosphere*, 173, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.066>
57. Wang, S. S., Tan, X., Fan, F. L. (2023). Changes in Impervious Surfaces in Lhasa City, a Historical City on the Qinghai-Tibet Plateau. *Sustainability*, 15(6), 5510. <https://doi.org/10.3390/su15065510>
58. Weng, Q. H. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
59. Winer, R. (2000). National Pollutant Removal Performance Database for Stormwater Treatment Practices- 2nd Edition. Center for Watershed Protection, Ellicott City
60. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. United Nations (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. World Urbanization Prospects - Population. Dostęp 25.01.2024, <https://population.un.org/wup/Publications/>

61. Xing, Y. G., Jones, P. In-situ monitoring of energetic and hydrological performance of a semi-intensive green roof and a white roof during a heatwave event in the UK. *Indoor and Built Environment*, Article Unsp 1420326x19887218. <https://doi.org/10.1177/1420326x19887218>
62. Xue, H. Q., Zhao, L., Liu, X. D. (2020). Characteristics of heavy metal pollution in road runoff in the Nanjing urban area, East China. *Water Science and Technology*, 81(9), 1961-1971. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.249>
63. Yang, H., Florence, D. C., McCoy, E. L., Dick, W. A., Grewal, P. S. (2009). Design and hydraulic characteristics of a field-scale bi-phasic bioretention rain garden system for storm water management. *Water Science and Technology*, 59(9), 1863-1872. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.186>
64. Zevenbergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S., Ashley, R. (2011). Urban flood management. CRC Press, London
65. Zhang, L. Y., Oyake, Y., Morimoto, Y., Niwa, H., Shibata, S. (2019). Rainwater storage/infiltration function of rain gardens for management of urban storm runoff in Japan. *Landscape and Ecological Engineering*, 15(4), 421-435. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00391-w>
66. Zou, S. Z., Zhu, Y. R., Wei, C. J., Tao, B. H. (2017). Discussions on the Design of the Pool Landscape in the Rain Garden Construction. *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*. International Symposium on Application of Materials Science and Energy Materials (SAMSE), Shanghai, Peoples R China.

## Spis tabel

<b>Tabela 1.</b> Źródła danych przestrzennych (GIS) wykorzystanych w badaniach .....	15
<b>Tabela 2.</b> Efekty BZI w zakresie gospodarki wodą opadową i poprawie jakości wody opadowej na podstawie dostępnej literatury. ....	24
<b>Tabela 3.</b> Parametry fizykochemiczne (pH, SpCond, TDS, mętność, fDOM) oraz stężenie metali ciężkich (średnia $x$ ( $\mu\text{g/L}$ ), $\pm$ odchylenie standardowe, SD) w analizowanej mikro-zlewni miejskiej. Analiza wariancji (one-way ANOVA): różne symbole literowe oznaczają grupy średnich różniących się istotnie statystycznie w teście Dunn'a ( $p < 0,05$ ).....	28
<b>Tabela 4.</b> Współczynniki korelacji Spearman'a (* – $p < 0.05$ , ** – $p < 0.01$ ) między stężeniami metali ciężkich ( $\mu\text{g/l}$ ) a liczbą dni suchych ADP (d) poprzedzających badany opad, w próbkach wody z dachu w półroczu zimowym i letnim.....	29

## Spis rysunków

<b>Rysunek 1.</b> Schemat badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej.....	20
<b>Rysunek 2.</b> Schemat układu warstw w ogrodzie deszczowym. ....	22
<b>Rysunek 3.</b> Schemat konstrukcji zielonych dachów. ....	22
<b>Rysunek 4.</b> Rodzaje zielonych ścian oraz schemat konstrukcji. ....	22
<b>Rysunek 5.</b> Rodzaje nawierzchni przepuszczalnych.....	23
<b>Rysunek 6.</b> Przykłady BZI w Warszawie (A – zielony dach, B – zielona ściana przy ul. Koszykowej, C –zielony dach i ogród deszczowy na dachu Biblioteki Uniwersytetu Warszawskiego). ....	27
<b>Rysunek 7.</b> Wyniki analizy wskaźników I_LU, I_IMP, I_BF dla struktury użytkowania Olsztyna w 2018 r. wraz ze wskazaniem priorytetowych lokalizacji elementów BZI. ....	32