

URBAN DESIGN AND SPATIAL PLANNING

**URBANISTYKA
I PLANOWANIE PRZESTRZENNE**

AGATA CIESZEWSKA

DSc PhD

Warsaw University of Life Sciences
Department of Landscape Architecture
e-mail: agata_cieszevska@sggw.edu.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3647-1539>

JOANNA ADAMCZYK

PhD

Warsaw University of Life Sciences
Department of Landscape Architecture
e-mail: joanna_adamczyk@sggw.edu.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8026-2734>

RENATA GIEDYCH

DSc PhD

Warsaw University of Life Sciences
Department of Landscape Architecture
e-mail: renata_giedych@sggw.edu.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2524-5886>

BARBARA SZULCZEWSKA

Prof. DSc PhD

Institute of Urban and Regional Development
e-mail: bszulczewska@irmir.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8589-7512>

URBAN GREEN INFRASTRUCTURE MODELS IN SMALL AND MEDIUM-SIZED URBAN MUNICIPALITIES IN POLAND

MODELE ZIELONEJ INFRASTRUKTURY W MAŁYCH I ŚREDNICH GMINACH MIEJSKICH W POLSCE

ABSTRACT

Urban morphological research describes the physical form of cities and provides an explanation of the layout and spatial composition of the city structure. Regarding green infrastructure, the morphological studies primarily concern the form, distribution and pattern of urban green spaces. The purpose of this study is to explore the extent to which urban green infrastructure (UGI) models rooted in the urban planning literature can be clearly identified using spatial data on actual land use/land cover in cities. Furthermore, to ascertain whether identified models exhibited unique and statistically significant features in terms of their components. The study included 264 cities, all urban municipalities in Poland, with a population of less than 100,000. UGI was considered to be areas covered by vegetation and waters. Based on the experts analysis, five UGI models were determined: enveloped, ribbon, sectoral, archipelago and perforated. To characterize UGI pattern basic landscape metrics have been calculated using vector data containing land use and land cover (LULC) classes using V-LATE 2.0. Next, a non-parametric Kruskal-Wallis rank-sum statistical test with a post-hoc analysis was conducted to observe models differentiation. The research revealed that using qualitative methods supported by quantitative methods, it is possible to categorize LULC patterns into UGI models. By analysing a large sample of 264 cities, it was possible to indicate the distinctiveness of UGI models in the studied groups of cities (small and medium) while maintaining statistical significance of the samples. The study proved that there are landscape metrics that support the identification of UGI models.

Keywords: urban morphology, urban green structure, green infrastructure planning

STRESZCZENIE

Badania morfologiczne miast opisują formę fizyczną miast oraz wyjaśniają układ i kompozycję przestrzenną struktury miasta. W zakresie zielonej infrastruktury miast (ZIM) badania morfologiczne dotyczą przede wszystkim formy, rozmieszczenia i układu miejskich terenów zieleni. Celem tego badania jest określenie, w jakim stopniu modele ZIM zakorzenione w literaturze urbanistycznej można jednoznacznie zidentyfikować przy użyciu danych przestrzennych dotyczących faktycznego użytkowania/pokrycia terenu w miastach. Ponadto zweryfikowano, czy zidentyfikowane modele wykazywały unikalne i istotne statystycznie cechy pod względem budujących je składowych. Badaniami objęto 264 miast — wszystkie gminy miejskie w Polsce, liczące poniżej 100 tys. mieszkańców. Za elementy ZIM uznano obszary pokryte roślinnością i wodami. Wykorzystując metodę

ekspercką zidentyfikowano pięć modeli ZIM: okalający, pasmowy, sektorowy, wyspowy i perforowany. Do scharakteryzowania struktury ZIM obliczono podstawowe metryki krajobrazowe wykorzystując dane wektorowe, zawierające klasy pokrycia i użytkowania terenu (LULC) przy użyciu V-LATE 2.0. Następnie przeprowadzono nieparametryczny test statystyczny sumy rang Kruskala-Wallisa z analizą post-hoc w celu obserwacji zróżnicowania modeli. Badania wykazały, że stosując metody jakościowe wsparte metodami ilościowymi, możliwe jest kategoryzowanie wzorców LULC do modeli ZIM. Objęcie badaniami dużej próby 264 miast pozwoliło wskazać odrębność modeli ZIM w badanych grupach miast (małych i średnich), przy zachowaniu istotności statystycznej. Badanie wykazało, że analiza wskaźników krajobrazowych wspiera identyfikację modeli UGI.

Słowa kluczowe: morfologia miasta, systemy zieleni miejskiej, planowanie zielonej infrastruktury

1. INTRODUCTION

Green infrastructure is a well-documented concept which considers the structure and function of natural and semi-natural areas, as well as other environmental solutions designed and managed to deliver a wide range of benefits to people, nature and the economy (Benedict and McMahon, 2002; Haq, 2011; Fryd et al., 2011; Wang and Banzhaf, 2018; Szulczewska, 2018; Goodspeed et al., 2022). The term is understood slightly differently on a local, supralocal or regional scale (Erickson, 2006; Ying et al., 2022). Considering the scale of a city, it is most generally assumed that green infrastructure includes areas permanently covered with vegetation and water, including parks, forests and other wooded areas, meadows, flowing and standing open waters, and other areas customarily categorized as green space. Following this definition, we will henceforth use the term urban green infrastructure (UGI) to refer to the areas mentioned above, regardless of the terms (different) used by the authors of the cited publications. The term UGI will also be used while referring to the presentation of the results of our research.

Despite the significant share of UGI within the city limits and the growing recognition of their importance, studies on UGI morphology are under-represented (Whitehand, 2019; Pezzagno et al., 2021). Zhu and Ling (2022) argue that although there is abundant research on urban green open spaces, there is still a need for more research on their morphology.

Urban morphological research describes the physical form of cities and provides an explanation of the layout and spatial composition of the city structure (Kropf, 2013; Oliveira, 2019). Regarding UGI, the morphological studies primarily concern form, distribution, pattern of urban green spaces, and the mutual correlations between the abovementioned features (Zhu and Ling, 2022). Despite the observed interest in UGI morphology research over the past decade, in particular countries (except China), there are few studies (Zou and Wang, 2021). In addition, there is a deficiency in investigating morphological UGI patterns (Lian and Feng, 2022). This is especially true for studies identifying and classifying existing city-wide

urban green space systems models. According to a review by Zou and Wang (2021) some research relates to UGI morphological patterns such as green wedges (Kühn and Gailing, 2008), green belts (Abercrombie, 1945; Buxton and Goodman, 2002; Tang et al., 2007; Amati, 2008), green networks (Evans and Freestone, 2010) and similar approaches (Burke, 1966; Yokohari et al., 2000).

Nevertheless, it should be stressed that the concepts mentioned above are large-scale UGI models derived from spatial and landscape planning and do not fully mirror the actual layout and distribution of UGI (Meneguetti and Lemes de Oliveira, 2021). Furthermore, they do not exhaust the possible configuration of green areas within an urban tissue. One of the pioneering studies addressing the identification, classification and description of the distinct UGI patterns was conducted by Pezzagno et al. (2021) for the historical centres of six European cities. The research distinguished three main repetitive configurations of UGI (termed Urban Green Spatial Patterns) related to green space distribution and grains, i.e., fragmented, compact and linear. A similar approach represents studies conducted by Lian and Feng (2022) for five core cities of the Greater Bay Area. Using morphological spatial pattern analysis metrics, the authors divided UGI patterns into three categories: surface point, boundary and corridor.

Some references to those mentioned above 'classical' models are found in the history of Polish research on the classification of city-wide urban green space patterns. Ptaszycka (1950), based on an analysis of city plans, identifies the following 'open space arrangements': spotted, ringed (enveloped), radial (wedgy), and ribbon. She further refers to the potential for 'combining' the mentioned arrangements in development planning. Czarnecki (1961) follows this approach. He proposed 5 model arrangements: spotted, ringed, radial, ribbon and combined. In the 1970s, Smogorzewski (1974) analysed the spatial distribution and pattern of cities' open spaces (more broadly understood than just green open spaces). A subject of his analysis and recommendations was the surface area (including, among others, the desired width of strips), spatial relationships and distribution of open spaces in the city.

Another approach, which dominated thinking also about UGI morphology in the 1980s, was related to the idea of green or ecological networks, derived from the patch-corridor-matrix model proposed by Forman and Godron (1981). In Poland, this concept has resulted in a variously named approaches to developing the natural structure of cities and different methods of the identification of areas representing potential for shaping these structures (Szulczewska and Kaliszuk, 2005). In recent years, research strictly related to morphology (understood as an arrangement of areas covered by vegetation) is scarce, and either concern selected ‘case studies’ (Cieślak, 2006) or they are only indirectly related to morphology concerns. For example, Bożetka (2008) uses layouts (models) when presenting the evolution of urban green space systems in Poland. Badach et al. (2022), analysing the potential of using UGI for air quality management in four Polish cities, refers to the ‘classical’ models proposed by Ptaszycka (1950) for synthetic characterisation of UGI layout in specific cities.

The purpose of this study is to explore the extent to which UGI models rooted in the urban planning literature can be clearly identified using spatial data on actual land use/land cover (LULC) in cities. Furthermore, an investigation was conducted to ascertain whether these identified models exhibited unique and statistically significant features in terms of their components. To crosscheck this, a statistical verification of the proportions and configurations of the main land cover/land use (LULC) classes was conducted.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Terminology

Due to the varying terminology and concepts related to UGI morphology analysis as described in the literature mentioned above, we have decided to adopt the following assumptions regarding the terms we will employ in our analysis:

- The term ‘pattern’ will be used while we refer to the existing distribution of UGI, presented on maps prepared for our study;
- The term ‘model’ will be used when we refer to assigning the identified patterns to the ‘classical’ models described in the literature; in this case, the model is understood according to Mironowicz (2013) as a system, the purpose of which is to imitate the different characteristics of another system (the original); models are not reality, they are a specific projection of reality allowing a better understanding of — in our case — the features and relationships of the identified pattern; in addition, the model only includes those characteristics of the object that are relevant to the purpose of the analysis (Cieszewska, 2004).

2.2. Study areas

The study included 264 cities, all urban municipalities in Poland, with a population of less than 100,000. This set was divided into 148 medium and 116 small-sized cities, where 23.58% of Poland’s residents live. There is no unambiguous definition in the literature to define the division of cities in terms of their size. The only generally accepted criterion is the number of their inhabitants (Runge, 2012). By convention, the following division is adopted in the Polish literature and statistical analyses published by Statistics Poland (GUS, 2018): a medium-sized city has a population between 20,000 and 100,000, and a small city has less than 20,000 inhabitants. It is worth mentioning that besides urban municipalities, there are also urban-rural municipalities (652), which were excluded from the analyses due to different development and management problems. The distribution of medium-sized and small cities in Poland is not even, with a predominance of cities located in the central and southern parts of the country influenced by historical and economic conditions (Ill. 1).

The analyses were conducted for cities within the entirety of their administrative boundaries. UGI was considered to be areas covered by vegetation and waters that support the natural processes within the city: geodynamic, climatic, hydrological, and biological.

2.3. Research procedure

The procedure of the presented study was undertaken in the following stages (Ill. 2.): 1) Input data pre-processing, 2) Identification of UGI patterns, 3) Generalization of patterns to obtain UGI models, 4) Statistical relevance assessment of the obtained models.

The primary source of information used in the study was BDOT10k (The National Database of Topographic Objects) at a scale of 1:10,000. This is the core spatial data set available through the Infrastructure for Spatial Information (IIP), which is available in Poland based on the Spatial Information Infrastructure Law and is part of the Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE) defined by a directive of the European Parliament and the Council, called the INSPIRE Directive. Because of this, the dataset has been developed to be versatile for different applications. This means that the implementation of BDOT10k for this study required a reinterpretation of its classification system for a new application.

UGI elements at the city scale are identified as those forms of land cover and land use (LULC) that can be unambiguously described as areas covered with vegetation or water, which also fulfil the objective of sustaining natural processes. These include green spaces such as parks or forests and areas covered with low vegetation (grasslands, pastures, scrublands). However,

some land cover categories are questionable. These include arable lands, as usually they are covered with vegetation only for a part of the growing season and therefore support natural processes, e.g., promoting biodiversity, to a limited extent. Despite the questions raised, the analysis partially included agricultural land as hydrological processes, infiltration potential, and groundwater supply were crucial concerns. Regarding the degree of urbanization, open areas with potential for green infrastructure include built-up coverage. These are lands with no more than 5–10% built-up coverage, with no permanent use (development), and with potential for conversion.

The built-up areas, however, were not included in the UGI and were considered a background to the UGI. This was due to the rather broad category of LULCs, including built-up and single-family housing areas. It is possible to find instances where the proportion of vegetation is relatively high, above 60% in relation to the plot area, but also situations where it is negligible, below 10–20% of the plot area. The proportion of high vegetation also varies greatly. Further issues were the frequently high proportion of impermeable surfaces and the reduction of hydrological and biological processes in these areas, hindering natural connectivity through fences and the kind of biodiversity not always favouring native species in these areas. The different LULC categories had to be treated holistically for such a large study population of 264 cities without the possibility of differentiating them into subgroups further. The characteristics mentioned above influenced the final exclusion of two categories of the built-up areas as green infrastructure elements at the whole city scale.

The UGI spatial patterns of the analysed cities were assigned to the classical models described in the literature cited above using the expert method. The method was inspired by Pietrzak's (2023) reflections on landscape structure research methods, and indeed, UGI structure research can be considered as such. He discusses employing a method based on using the mind to generalize and synthesize information, in line with the 'school of the old masters'. The method of searching for new facts and relationships and building hypotheses on this basis refers to heuristic methods, which, ac-

cording to Blazy and Łysień (2017), in urban planning focus on graphical analysis and spatial relationships. Mosler and Hobson (2021) also refer to conventional methods in the design of the urban green areas.

The first iteration of the analysis involved the visual generalization of the spatial arrangement of UGI cities into structures that correspond to the traditional models described in the literature of ringed (compact), ribbon (linear), spotted (fragmented) and wedgy (the latter not found in the cities studied). Cities that did not qualify for any of the classic models were analysed again in the second iteration. Information on the percentage (PLAND) of land covered by vegetation and water and regularities in the UGI system against built-up areas were explored. On this basis, new types of models were identified: perforated and sectoral. It was decided not to designate models with a mixed type of spatial structure.

For determined model types, statistical verification of the proportion and configuration of the main land cover/land use classes (LULC) was conducted to check whether the distinguished models have distinct characteristics regarding the components that structure them. The structure of the cities studied was characterized by basic landscape metrics (Table 1) (McGarigal and Marks, 1995), a widely used approach to assessing landscape structure. These were calculated using vector data containing LULC classes using V-LATE 2.0 (Vector-based Landscape Analysis Tools Extension) (Lang and Tiede, 2003). Analysis of the cities' statistical properties showed a significant difference between the LULCs of small and medium-sized cities. On this basis, it was decided to split the dataset into these two groups, which were then analysed separately. The expert method used the percentages of each LULC class and the total UGI share expressed in the PLAND indicator. More metrics were employed to verify which spatial structure models are statistically distinct: MSI, PSSD, and SPLIT. Using them, we conducted a non-parametric Kruskal-Wallis rank-sum statistical test with a post-hoc analysis to see which models differed. The tests have been aggregated, as they were conducted on four metrics for six land cover groups, resulting in 24 outcomes.

Table 1 Explanation of landscape metrics used for analysis.

Item	Formula	Description
Percentage of Land Cover (PLAND)	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	PLAND represents the percentage share (%) of an area of a given class within city limits.
Patch Size Standard Deviation (PSSD)	$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right) \right]^2}{n_i}} \left(\frac{1}{10,000} \right)$	PSSD measures the variability of patch sizes within the landscape. It is equal to 0 when all patches of a given class are of the same size or when there is only one patch.

Item	Formula	Description
Mean Shape Index (MSI)	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{p_{ij}}{2\sqrt{\pi * a_i}} \right)}{n}$	MSI increases along with the complexity of a given class's patch shapes.
Splitting Index (SPLIT)	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$	SPLIT is called the 'aggregation index'. It describes the number of patches that would have been produced had all landscape patches been divided into equally sized patches.

Source: modified, based on (McGarigal and Marks, 1995; Jaeger, 2000)

3. RESULTS

3.1. UGI models identified

Based on the analysis conducted, five UGI models were determined among 264 urban municipalities. In first iteration the enveloped model dominated both in medium and small sized cities, while there were very few linear (ribbon) and spotted (archipelago) models. A large group, equal to the set of cities with the enveloped model, consisted of models that did not fit the classic models. Based on the graphical analysis, in the second iteration study, two additional pattern of areas covered with vegetation and water were proposed: a sectoral model and a perforated model.

Statistics on the numbers of cities assigned to each model and visualisation of the spatial distribution of UGI for each model are presented in Table 2 and Ill. 3. Statistics on the percentages of UGI and the main LULC classes in each model are shown in Illustrations 4–9, with a distinction between (a) small-sized and (b) medium-sized cities.

Table 2 Numbers of cities assigned to the UGI models as determined by the experts.

MODEL	Small cities	Medium-sized cities
archipelago	10	27
enveloped	44	41
perforated	26	37
ribbon	6	8
sectoral	30	35
TOTAL	116	148

Source: original work.

The archipelago model has been described by Czarnecki (1961) as spotted, but it seems more appropriate here to compare the identified pattern of sites to an archipelago, or group of islands. Smaller or larger green spaces are distributed like a green archipelago among the surface-dominant built-up areas. In this model, the proportion of land covered by vegetation and water is the smallest. A characteristic feature is the significant proportion of single-family housing. This model occurs noticeably less frequently than the other configurations (37 cities),

more often in medium-sized cities (27) than in small cities (10).

In the enveloped model, UGI lands surround built-up areas and are therefore located on the edges of development, which tends to concentrate in the central (compact) part of the city. The proportion of land covered by vegetation and water varies in this model and ranges from 53 to 93%, with significant proportions of arable land. This model is most similar to the green belt system — where open land surrounds built-up areas on all sides. In the analysis of 264 cities, the enveloped model was identified most frequently. It is found in 85 cities, representing 32% of all surveyed cities. In medium-sized cities, the enveloped model is found in 41 cities (representing 27.7% of medium-sized cities), while in small cities, it is found in 44 cities (representing 37.93% of small cities).

In the ribbon model, UGI land forms a linear pattern of parallel strips occurring interchangeably with developed land. The proportion of land covered by vegetation and water dominates (68–90%) over the built-up areas. A significant proportion of forests and occasionally surface water is typical. This is the least frequent pattern in small and medium-sized cities — identified in only 14 instances, almost equally in medium-sized (8) and small cities (6 cases).

The perforated model has not been identified in previous work. Here, open lands form an area-dominant background (matrix) within which built-up areas are scattered. Vegetated and water-covered areas dominate in this model (56–87%) over the lower areas of built-up lands. While the built-up areas are small-sized and relatively compact (apart from single-family developments), the open areas are highly fragmented, and none of the highlighted cover types dominate. This model is almost as standard as the sectoral model (63 towns) and slightly more frequent in medium-sized towns (37) than in small towns (26).

In the sector model, open areas are highly compact and usually cover a significant area. They form relatively large patches that occur in different parts of the city and create distinct zones – sectors in which only vegetation or water cover is observed. Such sectors contrast strongly with the adjacent built-up areas. This

arrangement resembles a wedge-shaped model, but the green sectors do not always penetrate the built-up areas; in all instances, they are located on the periphery in one or more parts of the city. The proportion of land covered by vegetation and water in this model, as in the enveloped, is significant, ranging from 49–98%. Notably, the average of this share is very high and reaches 88% of the area. There is a relatively higher proportion of forest and less arable land here. This model is the second most frequently identified layout and is found in 65 cities (24.64% of cities) distributed almost equally between medium-sized cities (35 cities) and small cities (30 cities).

3.2. Statistical relevance assessment

The results of a non-parametric Kruskal-Wallis rank-sum statistical test with a post-hoc analysis generally show a statistically significant difference between the patterns of LULC between the models found by the experts. The results of Kruskal-Wallis tests (at $p > 0.05$) are presented for all metrics by individual models within the small and medium-sized city groups (Tables 3 and 4).

For small towns, the pairwise comparison of models (Tables 3) shows that the null hypothesis H_0 , assuming equality of distributions in the compared populations, was rejected in 72 instances. It was rejected the most often for the sectoral and archipelago models. This suggests that these models are the most recognizable.

The pairs that differed most frequently were sectoral-archipelago, archipelago-enveloped, and archipelago-perforated. Additionally, it is worth noting that the ribbon model had the fewest statistically significant differences, indicating it is the least recognizable. The built-up areas were the most crucial factor in differentiating between the models. The percentage share (PLAND) and fragmentation (SPLIT) were the most accurate indicators of the classes. Forest areas also played a significant role, especially regarding patch size differences (PSSD) and their share and dispersion. The characteristics of UGI and arable lands were less significant than the other factors mentioned.

In medium-sized cities, the Kruskal Wallis test showed (Table 4) a higher frequency (110) of statistically significant differences between models than for small cities. The pairs containing archipelago, sectoral, and perforated models are the most easily recognizable. It is essential to mention that the ribbon model again has a low frequency in this context. It was found that the built-up areas and forests were the most prominent components in this group of cities. This was reflected in their share (PLAND), patch size diversity (PSSD), and partly dispersion (SPLIT) metrics. Additionally, the share of UGI areas within the city borders was found to be significant, likely due to the characteristics of forests. Conversely, the least important characteristics were water and areas covered by low vegetation.

Table 3. Small-sized cities – The number of occurrences where the Kruskal-Wallis test showed differences between models based on landscape metrics.

Small cities	Frequency of differences between models, Kruskal-Wallis test ($p > 0.05$)					Which models differ the most often?
Models	archipelago	enveloped	perforated	ribbon	sectoral	
archipelago		2	6		9	17
enveloped	2		2		9	13
perforated	6	2		1	4	13
ribbon			1		3	4
sectoral	9	9	4	3		25
Which model pairs differ most often?						72

Source: original work

Table 4. Medium-sized cities — The number of occurrences where the Kruskal-Wallis test showed differences between models based on landscape metrics.

Medium-sized cities	Frequency of differences between models, Kruskal-Wallis test ($p > 0.05$)					Which models differ the most often?
Models	sectoral	perforated	enveloped	archipelago	ribbon	
archipelago		11	8	9	0	28
enveloped	11		5	9	1	26
perforated	8	5		6	0	19
ribbon	9	9	6		6	30
sectoral	0	1	0	6		7
Which model pairs are the most different from one another?						110

Source: original work.

4. CONCLUSIONS

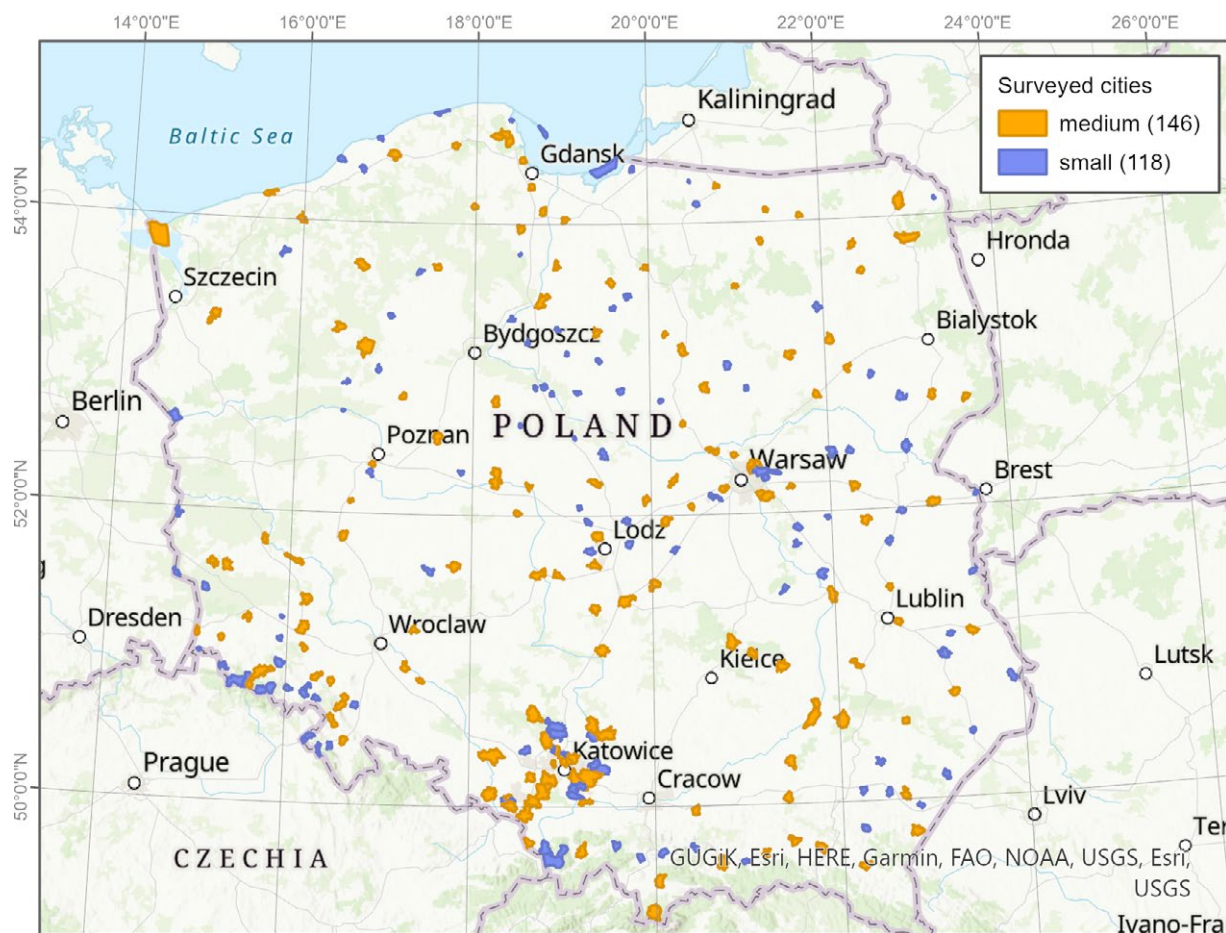
The research revealed that using qualitative methods supported by quantitative methods, it is possible to categorize LULC patterns into UGI models. The analysis of a large sample (264 cities) made it possible to indicate the distinctive UGI patterns in the studied groups of cities (small and medium-sized) while maintaining the statistical significance of the samples.

The dataset derived from the National Database of Topographic Objects (BDOT 10k) has a sufficient level of detail (1:10,000), meeting the needs of this type of analysis. The available data allowed for a comparative study on a large group of 264 cities. However, to fully understand the UGI in small and medium-sized cities in the future research it is needed to consider single-family housing and residential green areas as a substantial part of the urban natural system.

Due to the large sample of cities studied, this research allow to clarify to what extent the theoretical classical UGI models are reflected in the spatial distribution of areas covered by water and vegetation in cities. Among classic models the most readily

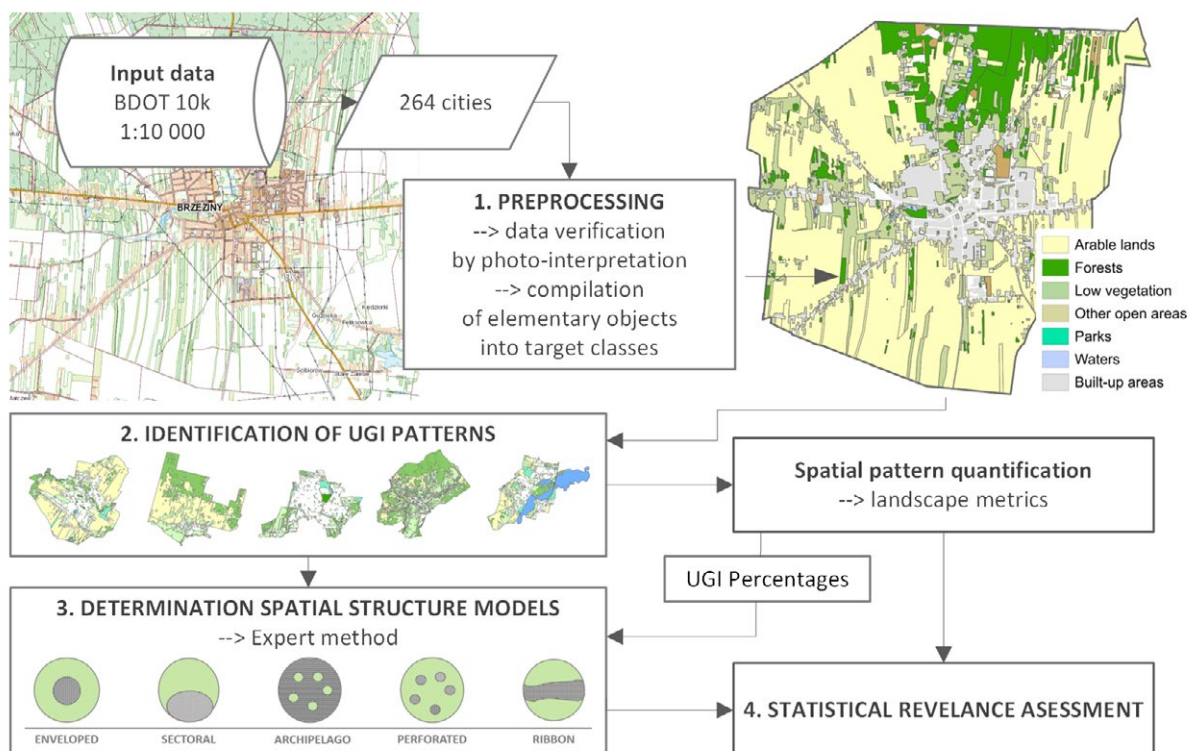
identifiable was enveloped one while archipelago and ribbon models where rare. The analysis of the UGI distribution showed that not all LULC patterns can be classified in one of the classical models. Due to the repeated typical spatial arrangements of land cover/land use areas, two new UGI models, sectoral and perforated, were identified.

In the matter of the analysis of small and medium-sized urban municipalities, there was a high proportion of UGI land in relation to built-up areas within administrative boundaries. In addition, these areas are usually located in peripheral areas and are associated with agricultural land and forests. As a result, the basic component of these models are areas that mainly provide supplying ecosystem services, and there is not much land that is important for providing cultural services (parks and other green spaces). This is related to the paradox of administrative boundaries, within which analyses of the spatial structure of cities are usually conducted. This approach is appropriate when the results are intended to serve administrative authorities, for example, for the purposes of urban planning.



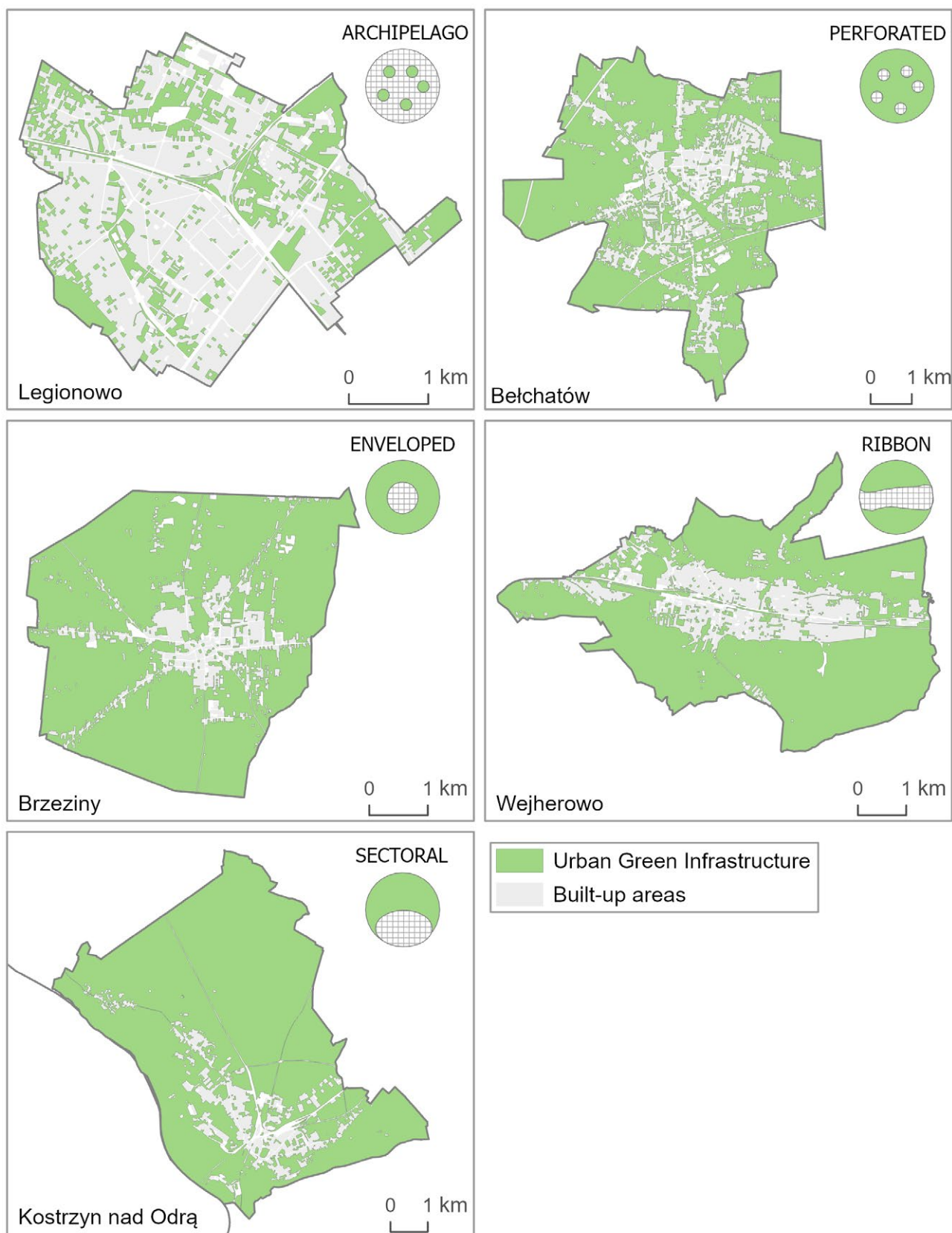
III. 1. Location of the study area: small and medium-sized urban municipalities in Poland. Source: original work.

II. 1. Obszar badań: małe i średniej wielkości gminy miejskie w Polsce. Źródło: opracowanie własne.



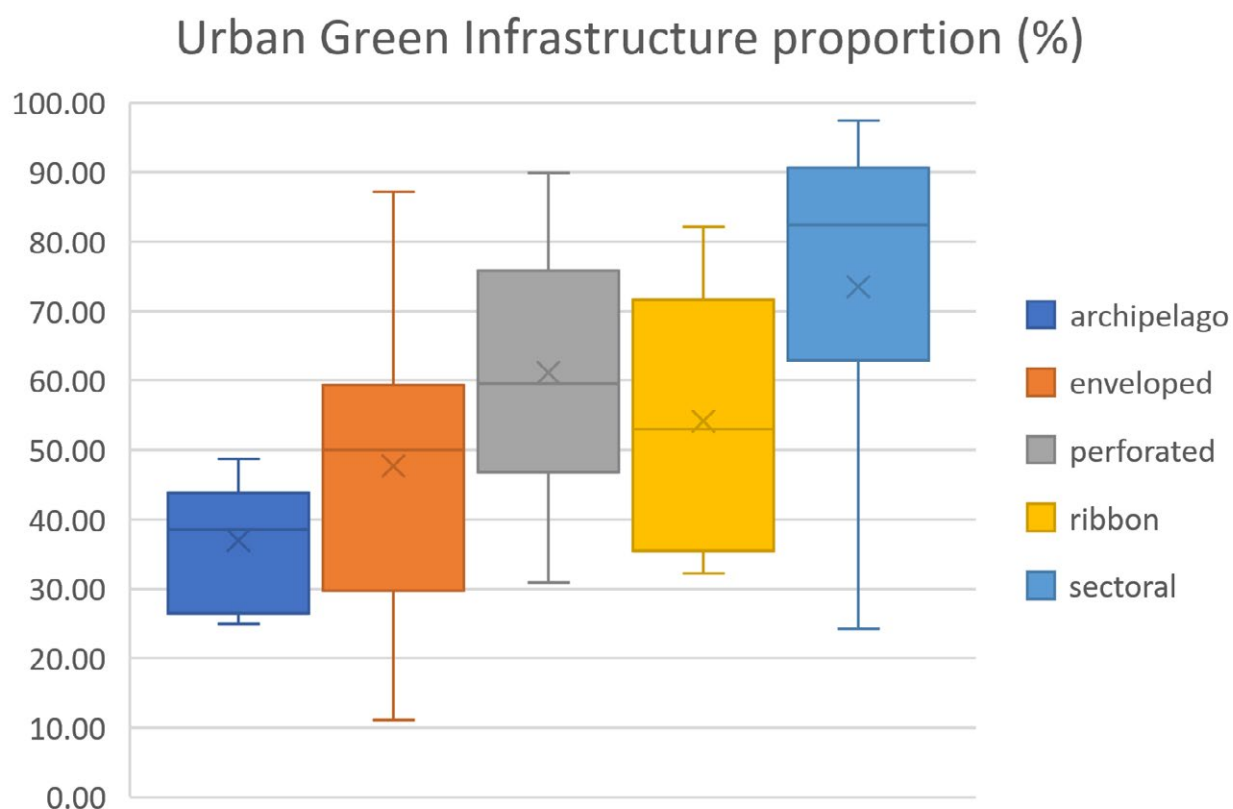
III. 2. A diagram of the methodology adopted in this study. Source: original work.

II. 2. Schemat metodyki badań. Źródło: opracowanie własne.



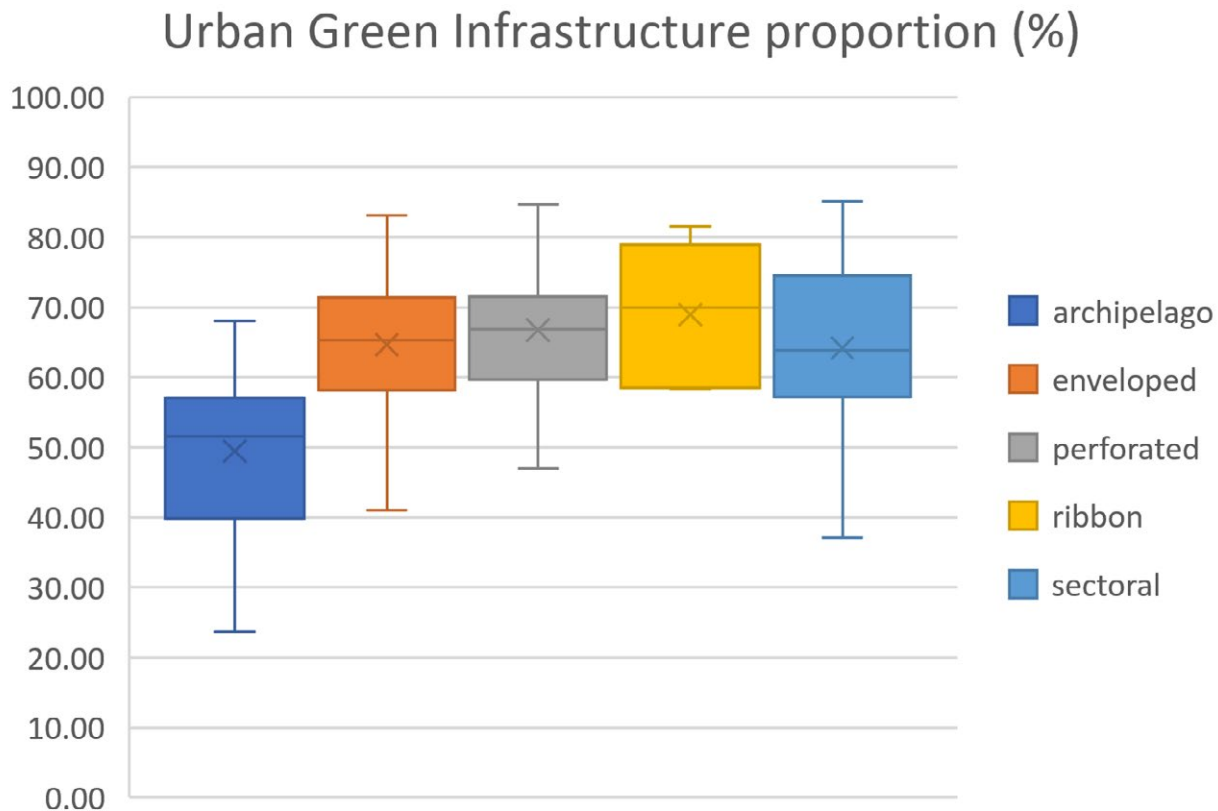
III. 3. Example cities with UGI configurations presenting the models determined. Source: original work.

II. 3. Przykłady miast z konfiguracją ZIM prezentujące zidentyfikowane modele. Źródło: opracowanie własne.



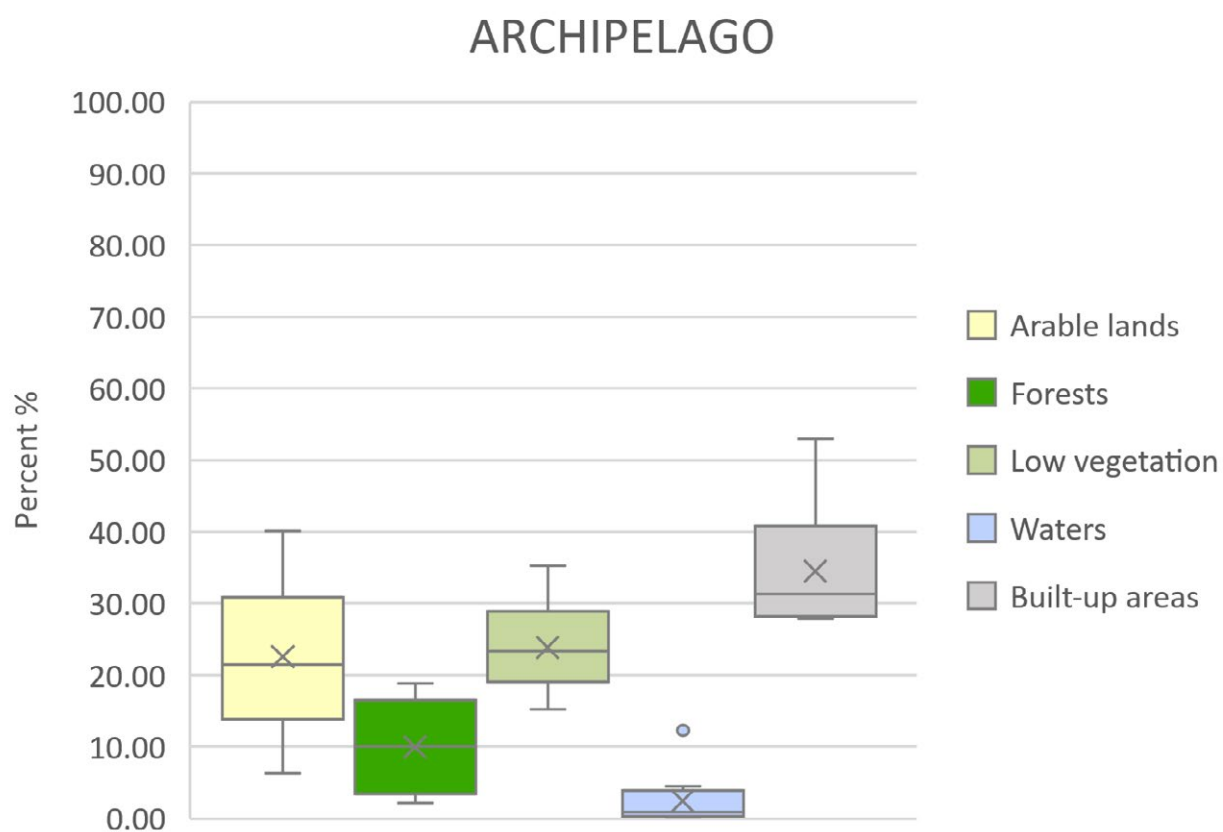
III. 4a. Small-sized cities – UGI cover proportion (in per cent) by model. Source: original work.

II. 4a. Małe miasta — udział procentowy terenów ZIM według modeli. Źródło: opracowanie własne.



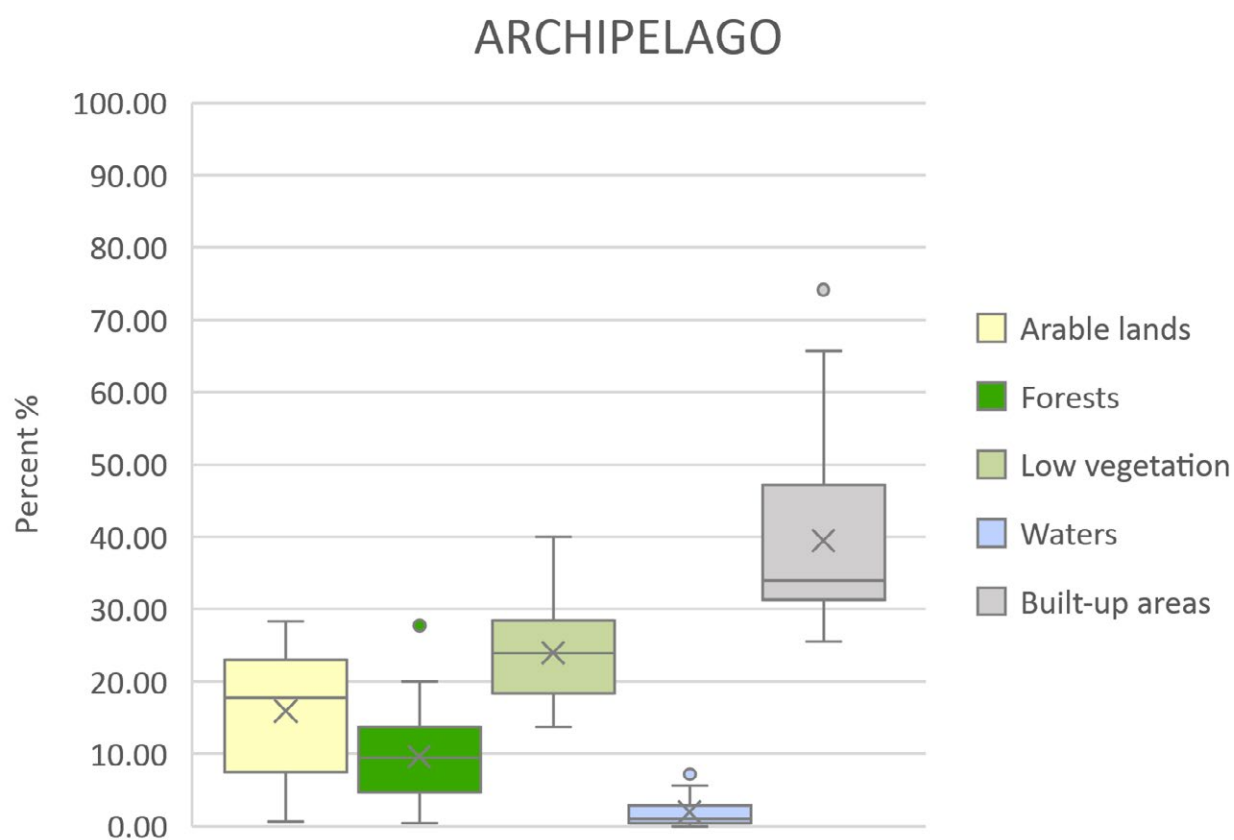
III. 4b. Medium-sized cities – UGI cover proportion (in per cent) by model. Source: original work.

II. 4b. Średnie miasta — udział procentowy terenów ZIM według modeli. Źródło: opracowanie własne.



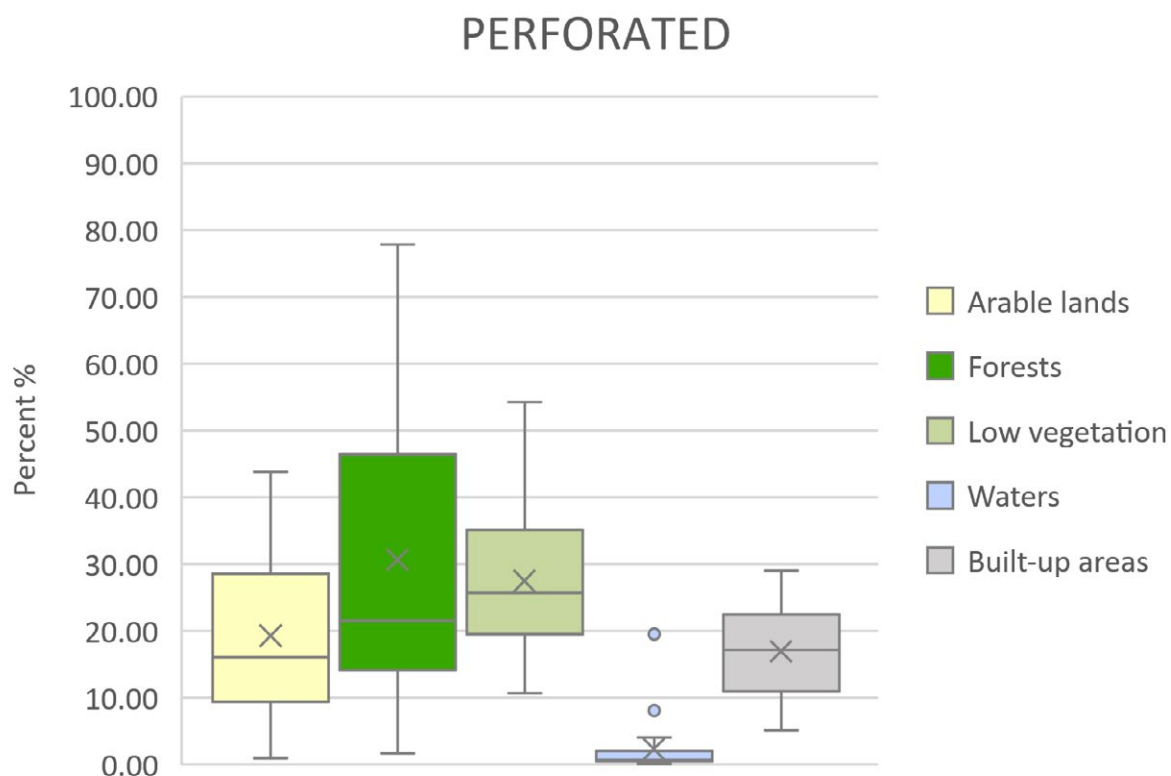
III. 5a. Small-sized cities – Archipelago model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 5a. Małe miasta — model wyspowy — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



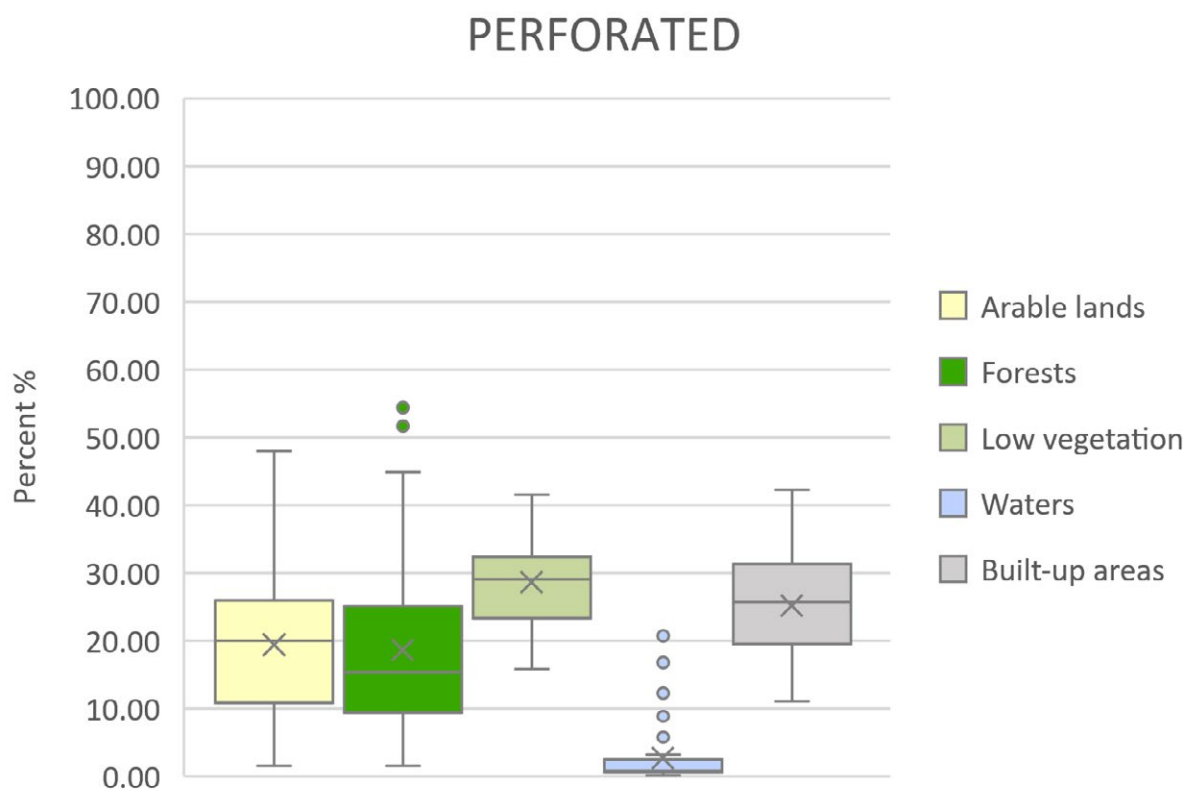
III. 5b. Medium-sized cities – Archipelago model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 5b. Średnie miasta — model wyspowy — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



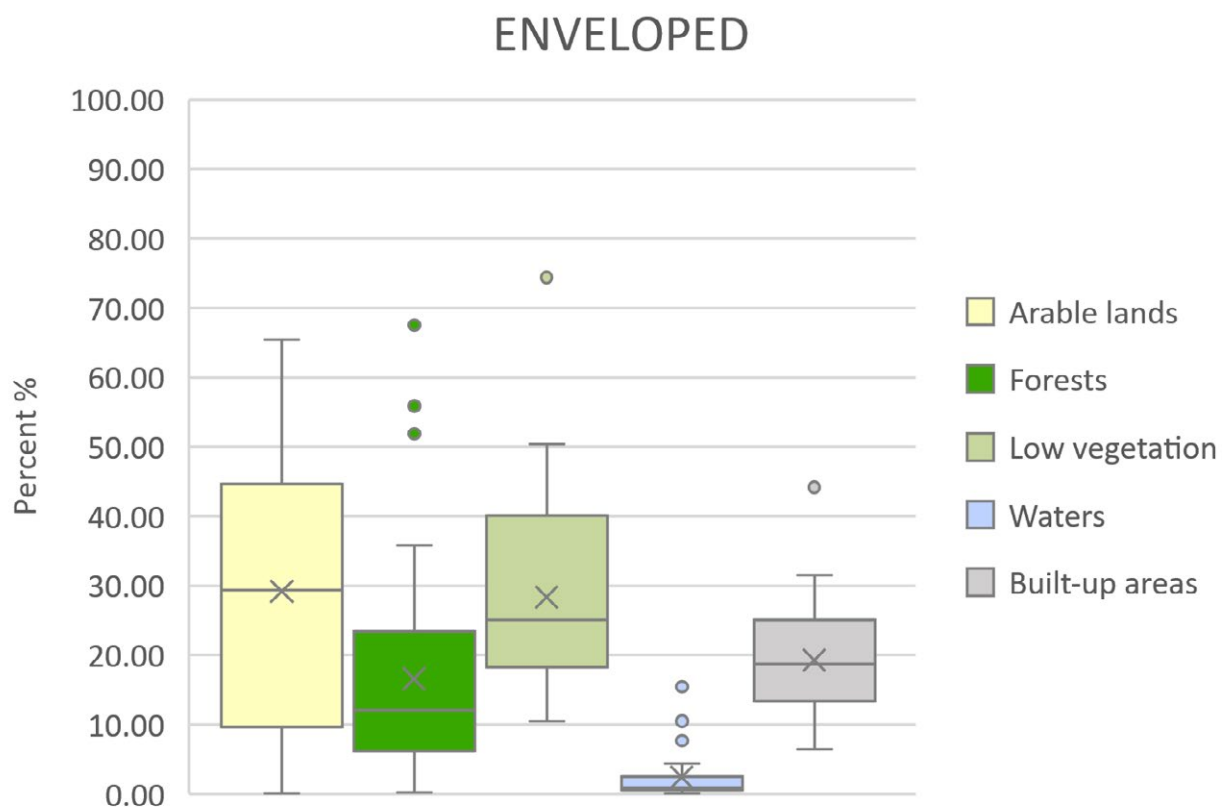
III. 6a. Small-sized cities – Perforated model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 6a. Małe miasta — model perforowany — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



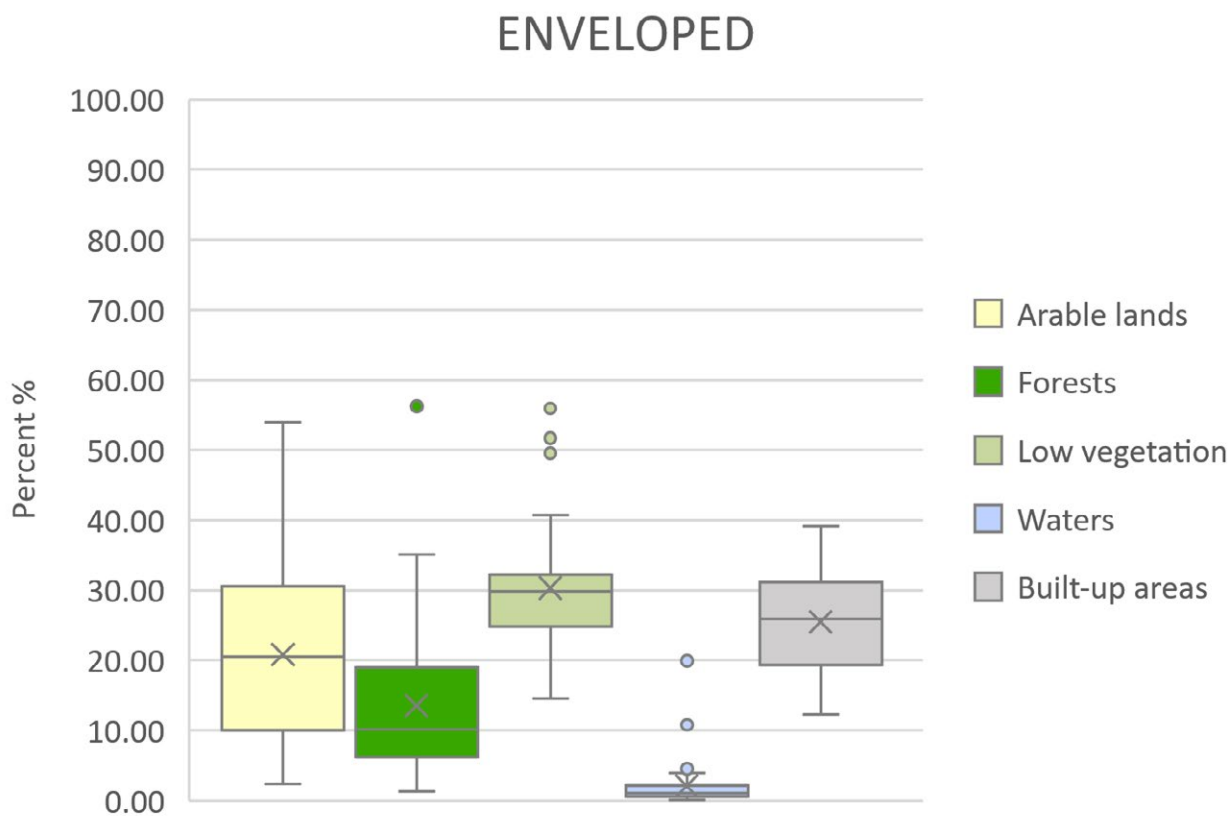
III. 6b. Medium-sized cities – Perforated model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 6b. Średnie miasta — model perforowany — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



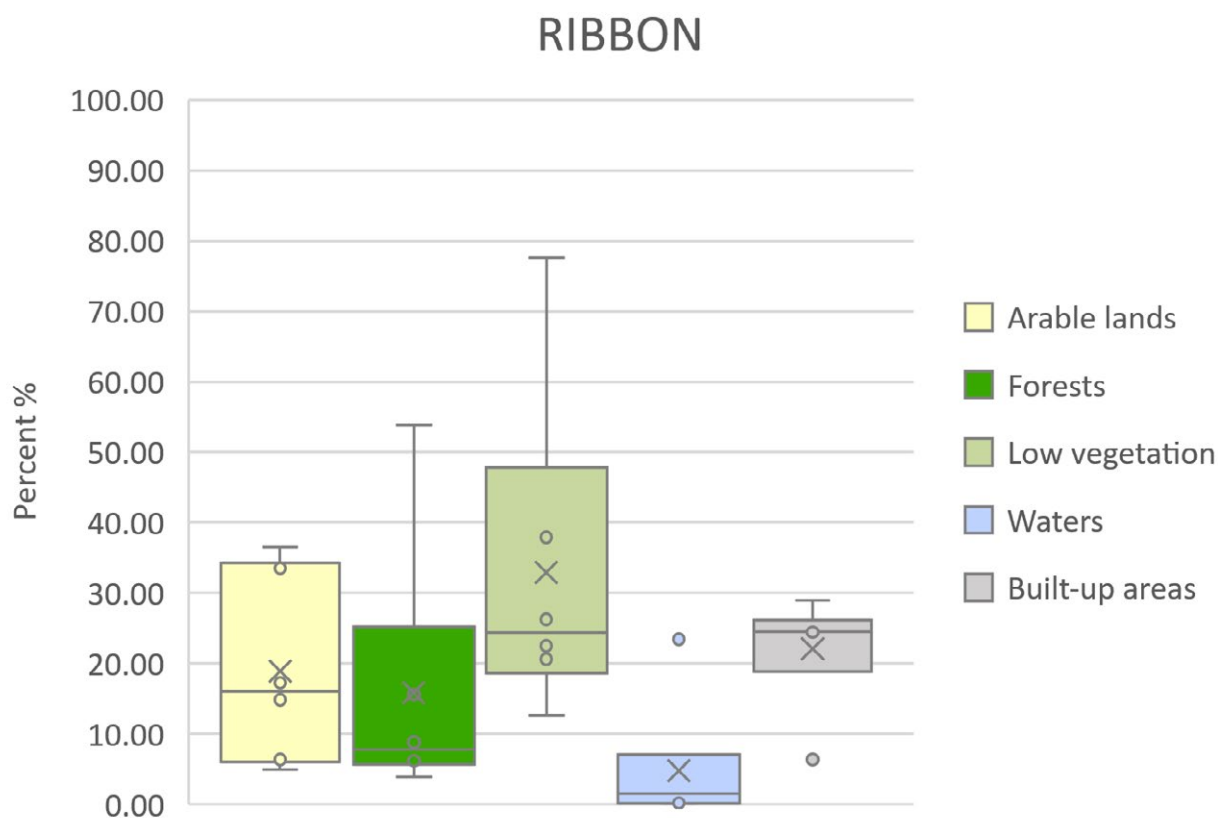
III. 7a. Small-sized cities – Enveloped model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 7a. Małe miasta — model okalający — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



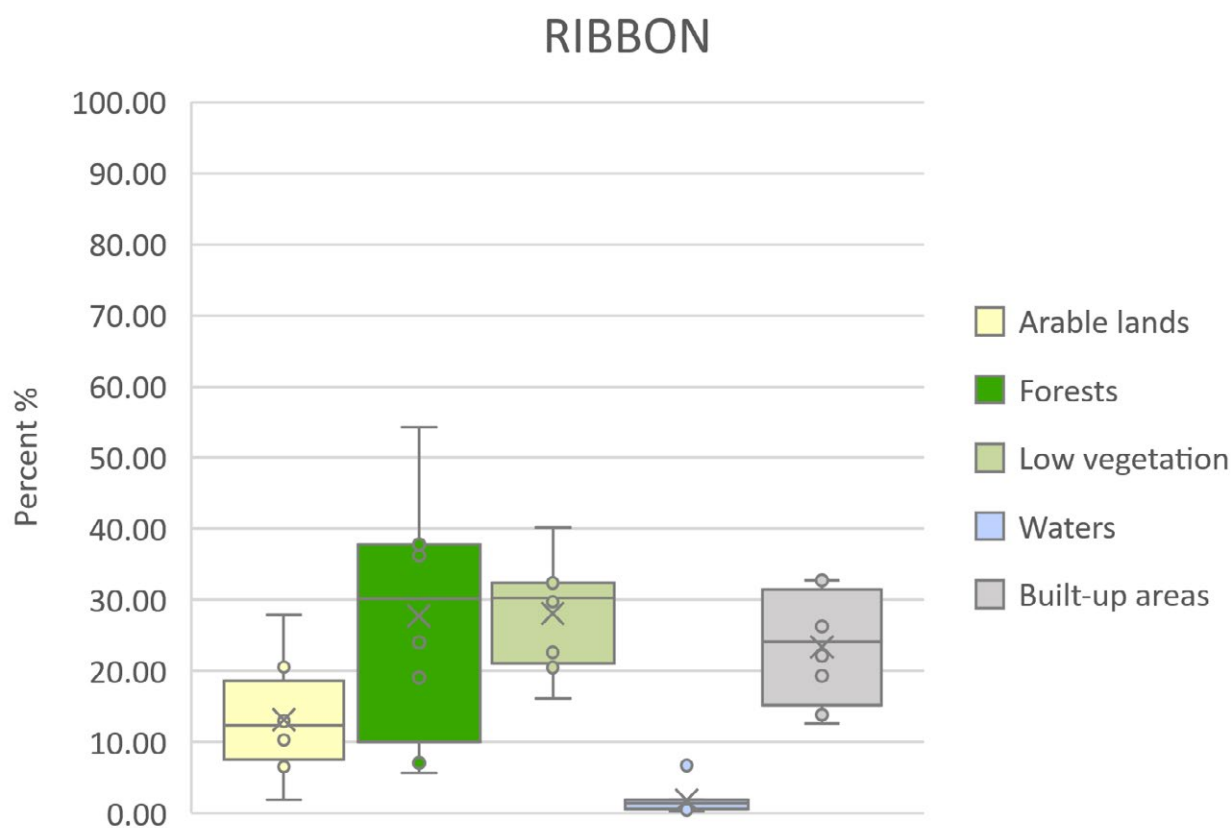
III. 7b. Medium-sized cities – Enveloped model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 7b. Średnie miasta — model okalający — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



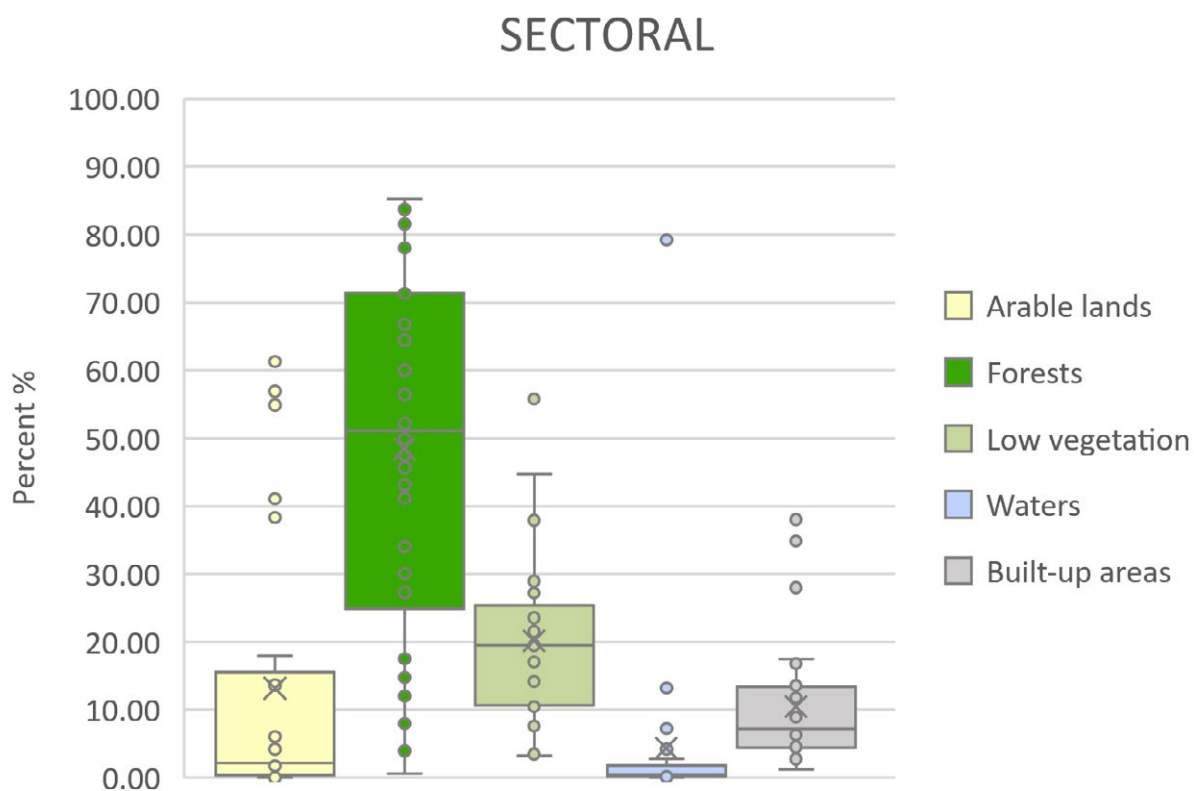
III. 8a. Small-sized cities – Ribbon model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 8a. Małe miasta — model pasmowy — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



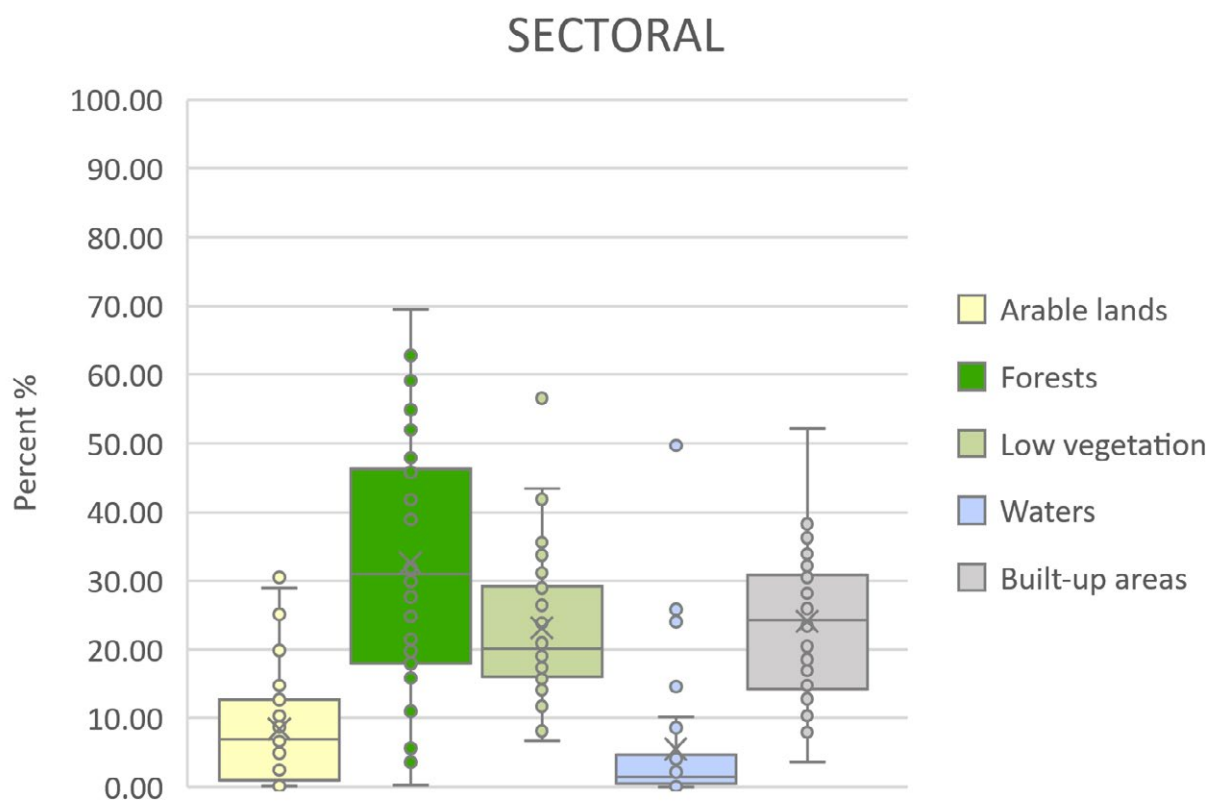
III. 8b. Medium-sized cities – Ribbon model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 8b. Średnie miasta — model pasmowy — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



III. 9a. Small-sized cities – Sectoral model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 9a. Małe miasta — model sektorowy — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.



III. 9b. Medium-sized cities – Sectoral model – LULC proportion (in percentages). Source: original work.

II. 9b. Średnie miasta — model sektorowy — udział procentowy klas pokrycia/użytkowania terenu. Źródło: opracowanie własne.

1. WPROWADZENIE

Zielona infrastruktura to dziś już dobrze rozpoznawalna koncepcja, uwzględniająca strukturę i funkcje obszarów naturalnych i półnaturalnych, a także innych rozwiązań środowiskowych zaprojektowanych i zarządzanych w celu dostarczenia szerokiego zakresu korzyści dla ludzi, przyrody i gospodarki (Benedict, McMahon, 2002; Haq, 2011; Fryd i in., 2011; Wang, Banzhaf, 2018; Szulczewska, 2018; Goodspeed i in., 2022). Termin ten jest nieco inaczej interpretowany w skali lokalnej, ponadlokalnej lub regionalnej (Erickson, 2006; Ying i in., 2022). Uwzględniając skalę miasta, najogólniej zakłada się, że zielona infrastruktura obejmuje tereny trwale pokryte roślinnością i wodami, takie jak: parki, lasy i inne obszary zadrzewione, łąki, płynące i stojące otwarte wody oraz inne obszary, zwyczajowo zaliczane do terenów zieleni. W oparciu o tę interpretację, w niniejszym artykule używany będzie termin „zielona infrastruktura miasta” (ZIM), aby odnosić się do wspomnianych wyżej obszarów, niezależnie od terminologii stosowanej przez autorów cytowanych publikacji. Termin ZIM będzie również używany przy omawianiu wyników przeprowadzonych badań.

Mimo znacznego udziału ZIM w granicach miast i rosnącego uznania jej znaczenia, badania nad morfologią ZIM są niewystarczająco reprezentowane (Whiteland, 2019; Pezzagno i in., 2021). Zhu i Ling (2022) twierdzą, że mimo licznych badań nad terenami zieleni lub szerzej — terenami otwartymi w miastach, nadal istnieje potrzeba prowadzenia większej liczby badań poświęconych ich morfologii.

Badania morfologii miast dotyczą fizycznej formy miast i wyjaśniają układ oraz kompozycję ich struktury przestrzennej (Kropf, 2013; Oliveira, 2019). W odniesieniu do ZIM, badania morfologiczne dotyczą przede wszystkim ich struktury i rozmieszczenia oraz wzorca przestrzennego (Zhu, Ling, 2022). Pomimo obserwowanego w ostatniej dekadzie zainteresowania badaniami nad morfologią ZIM na świecie, z wyjątkiem Chin, pojawiło się ich niewiele (Zou, Wang, 2021). Ponadto brakuje badań nad wzorcami morfologicznymi ZIM (Lian, Feng, 2022). Dotyczy to zwłaszcza badań identyfikujących i klasyfikujących istniejące modele miejskich systemów terenów zieleni w skali miasta. Na podstawie przeglądu przeprowadzonego przez Zou i Wang (2021) można stwierdzić, że dotychczas zdefiniowano następujące wzorce morfologiczne ZIM: zielone kliny (Kühn, Gailing, 2008), zielone pasy (pierścienie) (Abercrombie, 1945; Buxton, Goodman, 2002; Tang i in., 2007; Amati, 2008), zielone sieci (Evans, Freestone, 2010) i zbliżone do wcześniej wymienionych (Burke, 1966; Yokohari i in., 2000). Niemniej jednak należy podkreślić, że wspomniane

wyżej wzorce określają modele ZIM w skali ogólnej, wywodzące się z planowania przestrzennego i krajo-brazowego. Nie odzwierciedlają zatem w pełni rzeczywistego rozkładu elementów ZIM (Meneguetti, Lemes de Oliveira, 2021). Ponadto nie wyczerpują one możliwej konfiguracji terenów zieleni w obrębie tkanki miejskiej. Jedno z pionierskich badań dotyczących identyfikacji, klasyfikacji i opisu różnych wzorców ZIM zostało przeprowadzane przez Pezzagno i współautorów (2021) dla historycznych centrów sześciu europejskich miast. Badania te wyróżniły trzy główne powtarzające się konfiguracje ZIM (określane tutaj jako wzorce przestrzenne zielonych obszarów miejskich) związane z rozkładem i ziarnistością terenów zieleni, tj. pofragmentowane, zwarte i liniowe. Podobne badania przeprowadzone zostały przez Lian i Feng (2022) dla pięciu głównych miast Greater Bay Area. Krzystając ze wskaźników określających układ przestrzenny ZIM, autorzy podzielili powstałe wzorce na trzy kategorie: punktowo-powierzchniowe, graniczne i korytarzowe.

Niektóre odniesienia do wymienionych wyżej „klasycznych” modeli można znaleźć w historii polskich badań dotyczących klasyfikacji wzorców przestrzennych terenów zieleni w miastach. Ptaszycka (1950) opierając się na analizie planów miast, identyfikuje następujące „układy otwartych przestrzeni”: plamowy, pierścieniowy (opasujący), promienisty (klinowy) i pasmowy. Dodatkowo odnosi się do potencjału „łączenia” wspomnianych wzorców w planowaniu rozwoju przestrzennego miast. Czarnecki (1961) kontynuował to podejście i zaproponował pięć modelowych układów: plamowy, pierścieniowy, promienisty, pasmowy oraz połączony. W latach 70. XX wieku Smogorzewski (1974) analizował przestrzenny rozkład terenów otwartych miast (szerzej rozumianych niż tylko tereny zieleni). Przedmiotem jego analizy i rekomendacji były: powierzchnia (m.in. pożądana szerokość pasów rozdzielających zabudowę), relacje przestrzenne i rozkład terenów otwartych w mieście.

Inne podejście, które zdominowało myślenie o morfologii ZIM w latach 80. XX wieku, wiązało się z koncepcją sieci ekologicznych, wywiedzioną z modelu płat-korytarz-matryca, zaproponowanego przez Formana i Godrona (1981). W Polsce ta koncepcja zaowocowała różnymi podejściami kształtowania struktury przyrodniczej miast oraz różnymi metodami identyfikacji obszarów posiadających potencjał do włączenia w te struktury (Szulczewska, Kaliszuk, 2005). W ostatnich latach badania ściśle związane z morfologią (rozumianą jako układ obszarów pokrytych roślinnością) są w Polsce rzadkie i dotyczą wybranych „studiów przypadku” (Cieślak, 2006) lub są tylko pośrednio związane z problematyką morfologii. Na przykład, Bożętka (2008) używa układów (modeli) prezentu-

jąc ewolucję systemów miejskich terenów zieleni w Polsce. Badach i współautorzy (2022), analizując potencjał wykorzystania ZIM do zarządzania jakością powietrza w czterech polskich miastach, odwołują się do „klasycznych” modeli zaproponowanych przez Ptaszycką (1950) na potrzeby scharakteryzowania układu ZIM w konkretnych miastach.

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule było ustalenie, na ile modele ZIM zakorzenione w literaturze przedmiotu mogą być zidentyfikowane przy użyciu danych przestrzennych określających faktyczne pokrycie/użytkowanie gruntów w miastach.

Ponadto zbadano, na ile zidentyfikowane modele charakteryzują się unikalnymi i statystycznie istotnymi cechami dotyczącymi ich komponentów. Aby to sprawdzić, przeprowadzono statystyczną weryfikację proporcji i konfiguracji głównych klas pokrycia terenu/użytkowania gruntów.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. Terminologia

Ze względu na zróżnicowaną terminologię i koncepcje związane z analizą morfologii ZIM, opisane we wprowadzeniu, autorzy zdecydowali się przyjąć następujące założenia dotyczące pojęć, które będą używane w analizach:

- termin „wzorzec” będzie używany w odniesieniu do istniejącego rozkładu przestrzennego elementów ZIM, przedstawionego na mapach przygotowanych na potrzeby prowadzonego badania;
- termin „model” będzie używany w odniesieniu do przypisania zidentyfikowanych wzorców do „klasycznych” modeli opisanych w literaturze; w tym przypadku model jest rozumiany, za Mironowicz (2013), jako system, którego celem jest imitacja różnych cech innego systemu (oryginalnego); modele nie są rzeczywistością, są to specyficzne projekcje rzeczywistości pozwalające lepiej zrozumieć — w tym przypadku — cechy i relacje zidentyfikowanego wzorca; ponadto model obejmuje tylko te cechy obiektu, które są istotne dla celów analizy (Cieszewska, 2004).

2.2. Obszary badań

Badanie obejmowało 264 miasta, czyli wszystkie gminy miejskie w Polsce o liczbie ludności poniżej 100 000. Ten zbiór został podzielony na 148 miast średniej wielkości i 116 małych miast. W miastach tych mieszka 23,58% mieszkańców Polski. W literaturze nie ma jednoznacznej definicji określającej podział miast pod względem ich wielkości. Jedynym ogólnie akceptowanym kryterium jest liczba mieszkańców (Runge, 2012). Zgodnie z podziałem przyjętym w literaturze polskiej i analizach statystycznych

publikowanych przez Główny Urząd Statystyczny (GUS, 2018): miasto średniej wielkości charakteryzuje się populacją między 20 000 a 100 000, a miasto małe ma mniej niż 20 000 mieszkańców. Warto wspomnieć, że oprócz gmin miejskich istnieją również gminy miejsko-wiejskie (652), które zostały wyłączone z analiz ze względu na nieco odmienne problemy rozwoju i zarządzania. Rozkład miast średniej wielkości i małych w Polsce nie jest równomierny. Większość z nich położona jest w centralnej i południowej części kraju, co wynika z uwarunkowań historycznych i gospodarczych (il. 1). Analizy zostały przeprowadzone w granicach administracyjnych miast. ZIM została zdefiniowana jako obszary porośnięte roślinnością i wodami, które wspierają procesy przyrodnicze w obrębie miasta: geodynamiczne, klimatyczne, hydrologiczne i biologiczne.

2.3. Metody badań

Procedura badań obejmowała następujące etapy (il. 2.): 1) Przetwarzanie wstępnych danych wejściowych; 2) Identyfikacja wzorców ZIM; 3) Generalizacja wzorców w celu uzyskania modeli ZIM oraz ocena ich istotności statystycznej.

Głównym źródłem informacji wykorzystanym w badaniu była Baza Danych Obiektów Topograficznych w skali 1:10 000 (BDOT10k). Jest to podstawowy zbiór danych przestrzennych dostarczany przez Infrastrukturę Informacji Przestrzennej (IIP), która jest dostępna w Polsce na podstawie Ustawy o infrastrukturze informacji przestrzennej (Dz.U. 2021 poz. 214) i stanowi część Infrastruktury Informacji Przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE), zdefiniowanej w dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady, zwanej Dyrektywą INSPIRE. Omawiany zbiór danych został opracowany w taki sposób, aby był wszechstronny dla różnych zastosowań. Oznacza to, że implementacja BDOT10k w tym badaniu wymagała ponownej interpretacji jego systemu klasyfikacji dla nowego zastosowania.

Elementy ZIM w skali miasta były identyfikowane jako te formy pokrycia terenu i użytkowania gruntów, które mogą być jednoznacznie opisane jako obszary pokryte roślinnością lub wodami, i które mają znaczenie dla podtrzymywania procesów przyrodniczych. Obejmują one tereny zieleni, takie jak parki, lasy oraz obszary pokryte niską roślinnością (łąki, pastwiska, zarośla). Jednakże, niektóre kategorie użytkowania terenu są dyskusyjne. Do nich należą grunty orne, ponieważ zazwyczaj są one pokryte roślinnością tylko przez część sezonu wegetacyjnego i dlatego wspierają procesy przyrodnicze w ograniczonym stopniu. Pomimo tych zastrzeżeń, w analizie częściowo uwzględniono grunty rolne z uwagi na zachodzące w ich obrębie procesy hydrologiczne, potencjał do infiltracji i za-

silanie wód podziemnych. W odniesieniu do stopnia urbanizacji, tereny otwarte z potencjałem dla zielonej infrastruktury są pokryte zabudową w maksymalnie 5–10%, nie posiadają stałego użytkowania i mają potencjał do przekształcenia.

Obszary zabudowane nie zostały uwzględnione jako elementy ZIM, a uznano je za tło. Wynikało to z faktu, że są one zróżnicowane pod względem udziału roślinności. Można znaleźć przypadki, w których udział roślinności jest stosunkowo wysoki, powyżej 60% w stosunku do powierzchni działki, ale także sytuacje, gdzie jest on znikomy, poniżej 10–20% powierzchni działki. Proporcja wysokiej roślinności również różni się znacznie. Inne problemy, to często wysoki odsetek powierzchni nieprzepuszczalnych, ograniczenie procesów hydrologicznych i biologicznych (utrudniona naturalna łączność poprzez ogrodzenia, dominacja gatunków obcych, co nie zawsze sprzyja gatunkom rodzimym na tych obszarach). Dodatkowo różne kategorie pokrycia/użytkowania terenu musiały być traktowane holistycznie dla tak dużej populacji badawczej 264 miast, bez możliwości dalszego podziału na podgrupy. Wymienione cechy wpłynęły ostatecznie na wykluczenie obszarów zabudowanych jako potencjalnych elementów ZIM w skali całego miasta.

Przestrzenne wzorce ZIM analizowanych miast zostały przypisane do klasycznych modeli, opisanych w cytowanej literaturze za pomocą metody eksperckiej. Inspiracją do takiego podejścia były refleksje Pietrzaka (2023) na temat metod badania struktury krajobrazu, a badanie struktury ZIM można uznać za takie. Omawia on zastosowanie metody opartej na używaniu umysłu do uogólniania i syntezy informacji, zgodnie ze „szkołą starych mistrzów”. Metoda poszukiwania nowych faktów i związków oraz budowanie hipotez na tej podstawie odnosi się do metod heurystycznych, które, według Blazego i Łysienia (2017), w planowaniu urbanistycznym skupiają się na analizie graficznej i relacjach przestrzennych. Mosler i Hobson (2021) również odnoszą się do konwencjonalnych metod w projektowaniu terenów zieleni w miastach.

Pierwsza iteracja analizy polegała na wizualnym uogólnieniu przestrzennego układu ZIM i dopasowaniu go do tradycyjnego modelu, opisanego w litera-

turze: pierścieniowego (kompaktowego), pasmowego (liniowego), plamowego (rozdrobnionego) i klinowego (tego nie znaleziono w badanych miastach). Miasta, które nie kwalifikowały się do żadnego z klasycznych modeli, zostały ponownie przeanalizowane w drugiej iteracji. Zbadano informacje na temat procentowej powierzchni pokrytej roślinnością i wodami (PLAND) oraz konfigurację przestrzenną terenów ZIM wobec obszarów zabudowanych. Na tej podstawie zidentyfikowano nowe typy modeli: perforowany i sektorowy. Postanowiono nie wyznaczać modeli o mieszanej strukturze przestrzennej.

Dla miast charakteryzujących się typowymi modelami ZIM przeprowadzono statystyczną weryfikację proporcji i konfiguracji głównych klas pokrycia terenu/użytkowania ziemi, aby sprawdzić, czy wyróżnione modele charakteryzują się odrębnością w zakresie cech tych składowych. Strukturę ZIM w badanych miastach scharakteryzowano za pomocą podstawowych wskaźników krajobrazowych (Tabela 1) (McGarigal, Marks, 1995), które są często stosowanym podejściem do oceny struktury krajobrazu. Obliczano je przy użyciu warstw wektorowych, zawierających klasy pokrycia/użytkowania terenu, przy użyciu narzędzia V-LATE 2.0 (Vector-based Landscape Analysis Tools Extension) (Lang, Tiede, 2003). Analiza własności statystycznych wymienionych cech w miastach wykazała istotną różnicę między klasami pokrycia/użytkowania terenu pomiędzy miastami małymi i średnimi. Na tej podstawie postanowiono podzielić zbiór danych na te dwie grupy, które następnie analizowano osobno. Przypisanie modeli do poszczególnych miast za pomocą metody eksperckiej odbyło się przy wykorzystaniu udziału procentowego (PLAND) każdej z klas pokrycia/użytkowania terenu oraz połączonych w jedną warstwę terenów ZIM. Aby sprawdzić statystyczną odrębność modeli struktury przestrzennej ZIM wykorzystano również dodatkowe wskaźniki krajobrazowe: MSI, PSSD i SPLIT. Przy ich użyciu przeprowadzono nieparametryczny test rang Kruskala-Wallisa z analizą post-hoc. Testy zostały zagregowane, ponieważ przeprowadzono je na czterech wskaźnikach dla sześciu grup pokrycia terenu, co dało 24 wyniki.

Tabela 1. Objaśnienie wskaźników krajobrazowych wykorzystanych do analizy.

Wyszczególnienie	Równanie	Wyjaśnienie
Procent krajobrazu (PLAND)	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	PLAND reprezentuje udział procentowy (%) obszaru zajmowanego przez daną klasę w granicach miasta.
Odchylenie standardowe wielkości płatu (PSSD)	$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right) \right]^2}{n_i}} \left(\frac{1}{10,000} \right)$	PSSD mierzy zmienność wielkości płatów w obrębie krajobrazu. Jest równy 0, gdy wszystkie płaty w klasie są tej samej wielkości lub gdy jest tylko jeden płat.

Wyszczególnienie	Równanie	Wyjaśnienie
Uśredniony wskaźnik kształtu płatów (MSI)	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{p_{ij}}{2\sqrt{\pi * a_i}} \right)}{n}$	MSI rośnie wraz ze wzrostem złożoności kształtu płatów danej klasy.
Wskaźnik rozproszenia (SPLIT)	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$	SPLIT jest nazywany „wskaźnikiem agregacji”. Opisuje on liczbę płatów, jeśli wszystkie płaty krajobrazu zostałyby podzielone na płaty o jednakowej wielkości.

Źródło: zmodyfikowane, na podstawie McGarigal, Marks, 1995; Jaeger, 2000.

3. WYNIKI

3.1. Zidentyfikowane modele ZIM

Na podstawie przeprowadzonej analizy zidentyfikowano pięć modeli ZIM wśród 264 gmin miejskich. W pierwszej iteracji dominował model pierścieniowy (okalający) zarówno w średnich, jak i małych miastach, podczas gdy nieliczne były miasta o modelu pasmowym i plamowym (tutaj wyspowym). Dużą grupę, równą zbiorowi miast charakteryzujących się modelem pierścieniowym (okalającym), stanowiły miasta, które nie pasowały do klasycznych wzorców. Na podstawie analizy graficznej, w drugiej iteracji badania, zaproponowano dwa dodatkowe wzorce obszarów pokrytych roślinnością i wodą: model sektorowy i model perforowany. Statystyki dotyczące liczby miast przypisanych do każdego modelu oraz wizualizacja przestrzennego rozkładu ZIM dla każdego modelu przedstawione są w Tabeli 2 i na ilustracji 3. Statystyki dotyczące procentowego udziału ZIM oraz głównych klas LULC w każdym modelu pokazane są na rysunkach 4–9, z rozróżnieniem między (a) małymi i (b) średnimi miastami.

Tabela 2. Liczba miast przypisanych do modeli ZIM określonych przez ekspertów.

MODEL	Małe miasta	Miasta średniej wielkości
wyspowy	10	27
okalający	44	41
perforowany	26	37
pasmany	6	8
sektorowy	30	35
SUMA	116	148

Źródło: opracowanie własne.

Model wyspowy został opisany przez Czarnieckiego (1961) jako plamowy, ale wydaje się, że bardziej odpowiednie jest tu porównanie zidentyfikowanego układu terenów do archipelagu, czyli grupy wysp. Mniejsze lub większe tereny zieleni są rozlokowane jak zielony archipelag między obszarami zabudowanymi dominującymi i stanowiącymi tło. W modelu tym przeważający udział powierzchni terenu pokrytego roślinnością

i wodą jest najmniejszy. Charakterystyczną cechą jest tutaj również znaczący udział zabudowy jednorodzinnej. Ten model występuje zauważalnie rzadziej niż inne konfiguracje (jedynie 37 miast), częściej w miastach średniej wielkości (27) niż w małych miastach (10).

W modelu okalającym tereny ZIM otaczają obszary zabudowane, znajdują się na obrzeżach strefy rozwoju zabudowy, która ma tendencję do koncentrowania się w centralnej (kompaktowej) części miasta. Proporcja terenu pokrytego roślinnością i wodami w stosunku do terenów zabudowanych jest w tym modelu zmienna i waha się od 53 do nawet 93%, z istotnym udziałem gruntów ornych. Model można opisać jako „pierścień” zieleni okalający obszary zabudowane z wszystkich stron. Wśród 264 miast model ten jest identyfikowany najczęściej. Występuje on w 85 miastach, co stanowi 32% wszystkich badanych miast. W miastach średniej wielkości model okalający występuje w 41 miastach (co stanowi 27,7% miast średniej wielkości), podczas gdy w małych miastach znajduje się w 44 miastach (co stanowi 37,93% małych miast).

W modelu pasmowym tereny ZIM występują w postaci równoległych pasów występujących naprzemiennie z terenami zabudowanymi. Tereny pokryte roślinnością i wodami wyraźnie dominują (68–90%) nad obszarami zabudowanymi. Duży udział lasów i czasami wód powierzchniowych jest tutaj typowy. Jest to najrzadziej występujący model zarówno wśród miast małych, jak i średnich — zidentyfikowano go jedynie w 14 przypadkach, niemal tyle samo w miastach średniej wielkości (8) i małych miastach (6).

Model perforowany nie został opisany w cytowanej wyżej literaturze. W modelu tym tereny otwarte, pokryte roślinnością i wodami, tworzą obszarowo dominujące tło (matrycę), na którym rozrzucone są obszary zabudowane. Obszary pokryte roślinnością i wodą dominują w tym modelu (56–87%) nad terenami zabudowanymi, które są niewielkie i stosunkowo zwarte (poza zabudowę jednorodziną). Obszary ZIM są silnie rozdrobnione, a ponadto, żaden z wyróżnionych typów pokrycia w nich nie dominuje. Model ten jest prawie tak samo powszechny jak model sektorowy (63 miasta) i nieco częstszy w miastach średniej wielkości (37) niż w małych miastach (26).

W modelu sektorowym obszary ZIM są silnie zwarte i zwykle zajmują znaczną powierzchnię. Tworzą one wyraźne strefy — sektory — terenów pokrytych wyłącznie roślinnością lub wodami. Takie sektory kontrastują silnie z sąsiednimi obszarami zabudowanymi. Układ ten przypomina model klinowy, ale „zielone sektory” nie zawsze penetrują obszary zabudowane. Za to we wszystkich przypadkach znajdują się one na obrzeżach w jednej lub kilku częściach miasta. Udział terenów pokrytych roślinnością i wodami w tym modelu, podobnie jak w modelu okalającym, jest znaczący i waha się od 49 do 98%. Warto zauważyć, że przeciętny udział tego wskaźnika jest bardzo wysoki i wynosi 88% powierzchni. Model ten charakteryzuje się stosunkowo wysokim udziałem lasów i — w mniejszym stopniu — gruntów ornych. Ten model jest drugim najczęściej identyfikowanym układem i występuje w 65 miastach (24,64% miast), w podziale niemal równomiernym między miastami średniej wielkości (35 miast) a małymi miastami (30).

3.2. Ocena istotności statystycznej

Wyniki nieparametrycznego testu statystycznego Kruskala-Wallisa z analizą post-hoc pokazują istotną statystycznie różnicę (przy $p > 0,05$) między cechami pokrycia/użytkowania terenu modeli zidentyfikowanych przez ekspertów. Wyniki testów Kruskala-Wallisa przedstawione są dla wszystkich wskaźników dla poszczególnych modeli w grupach miast małych i średnich (Tabele 3 i 4).

Dla małych miast porównanie parami modeli (Tabela 3) pokazuje, że hipoteza H_0 , zakładająca równość rozkładów w porównywanych populacjach, została

odrzucona w 72 przypadkach. Najczęściej odrzucono ją dla modeli sektorowego i wyspowego. Sugeruje to, że te modele są najłatwiejsze do rozpoznania. Pary modeli, które różniły się najczęściej, to sektorowy-wyspowy, wyspowy-okalający i wyspowy-perforowany. Dodatkowo, warto zauważyć, że model pasmowy wykazał najmniejszą liczbę istotnych statystycznie różnic, co wskazuje, że jest on najmniej odrębny od innych modeli. Obszary zabudowane były najistotniejszym czynnikiem różnicującym modele. Udział procentowy (PLAND) i fragmentacja (SPLIT) były najbardziej dokładnymi wskaźnikami cech klas. Konfiguracja obszarów leśnych również odgrywała istotną rolę, zwłaszcza w odniesieniu do różnic w wielkości fragmentów (PSSD) oraz ich udziału i rozproszenia. Charakterystyki terenów rolnych były mniej istotne niż wspomniane inne czynniki.

W średniej wielkości miastach test Kruskala-Wallisa wykazał (Tabela 4) wyższą częstotliwość (110) istotnych statystycznie różnic między modelami niż dla miast małych. Pary zawierające modele wyspowe, sektorowe i perforowane są najłatwiejsze do rozpoznania. Warto również wspomnieć, że model pasmowy ponownie najmniej różnił się od innych modeli. Stwierdzono, że konfiguracje obszarów zabudowanych i lasów były najważniejszymi cechami w tej grupie miast. Widoczne to było w ich udziale procentowym (PLAND), różnorodności wielkości fragmentów (PSSD) i częściowo w rozproszeniu (SPLIT). Dodatkowo udział obszarów ZIM w granicach miast okazał się istotny, prawdopodobnie ze względu na cechy lasów. Z kolei najmniej istotne były charakterystyki wód i obszarów pokrytych niską roślinnością.

Tabela 3. Małe miasta — liczba przypadków, w których test Kruskala-Wallisa wykazał różnice między modelami opartymi na wskaźnikach krajobrazowych.

Male miasta	Częstość występowania różnic między poszczególnymi modelami test Kruskala-Wallisa ($p > 0,05$)					Które modele różnią się najczęściej?
	archipelag	otoczony	perforowany	wstążka	sektorowy	
wyspowy		2	6		9	17
okalający	2		2		9	13
perforowany	6	2		1	4	13
pasmowy			1		3	4
sektorowy	9	9	4	3		25
	Które pary modeli różnią się najczęściej?					72

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Miasta średniej wielkości — liczba przypadków, w których test Kruskala-Wallisa wykazał różnice między modelami opartymi na wskaźnikach krajobrazowych.

Miasta średnie	Częstość występowania różnic między poszczególnymi modelami test Kruskala-Wallisa (p>0,05)					Które modele różnią się najczęściej?
Modele	sektorowy	perforowany	otoczony	archipelag	wstążka	
wyspowy		11	8	9	0	28
okalający	11		5	9	1	26
perforowany	8	5		6	0	19
pasmowy	9	9	6		6	30
sektorowy	0	1	0	6		7
Które pary modeli różnią się między sobą najbardziej?						110

Źródło: opracowanie własne.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że korzystając z metod jakościowych wspieranych przez metody ilościowe, możliwa była kategoryzacja wzorców użytkowania ziemi i pokrycia terenu w modele ZIM. Analiza dużej próby (264 miast) pozwoliła na wskazanie charakterystycznych modeli ZIM w badanych grupach miast (małe i średnie), przy zachowaniu istotności statystycznej prób.

Zestaw danych pochodzący z Krajowej Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT 10k) posiada wystarczający poziom szczegółowości (skala 1:10 000), aby spełnić potrzeby tego typu analiz. Dostępne dane pozwoliły na przeprowadzenie badań porównawczych dla dużej grupy miast. Jednakże, aby w pełni zrozumieć ZIM w małych i średnich miastach, w przyszłych badaniach konieczne jest uwzględnienie zabudowy jednorodzinnej i towarzyszących jej ogrodów jako istotnego elementu systemu przyrodniczego miasta.

Ze względu na dużą próbę analizowanych miast, przeprowadzone badania pozwalają ustalić, w jakim stopniu teoretyczne, „klasyczne” modele odzwierciedlają przestrzenny układ obszarów pokrytych roślinnością i wodami w miastach małych i średnich. Spośród „klasycznych” modeli najczęściej i najłatwiej rozpoznawalny okazał się model okalający, podczas gdy modele wyspowy i pasmowy były rzadkie. Przeprowadzona analiza wykazała, że nie wszystkie zidentyfikowane wzorce użytkowania ziemi można przypisać do „klasycznych” modeli. Ze względu na powtarzające się charakterystyczne układy przestrzenne terenów pokrycia/użytkowania terenu, możliwe było wskazanie dwóch nowych modeli ZIM: sektorowego i perforowanego.

Ponadto przeprowadzona analiza wykazała stosunkowo wysoki udział terenów ZIM w relacji do obszarów zabudowanych w granicach administracyjnych badanych miast. Tereny te zazwyczaj znajdują

się na obrzeżach i są to głównie grunty użytkowane rolniczo oraz lasy. Tak więc modele te są zbudowane, przede wszystkim, z obszarów zapewniających usługi ekosystemowe zaopatrzeniowe i regulacyjne. Obszary istotne dla świadczenia usług kulturowych (parki i inne tereny zieleni) występują w znikomym procencie. Częściowo wynika to z paradoksu granic administracyjnych, w ramach których zazwyczaj przeprowadza się analizy struktury przestrzennej miast. Takie podejście jest odpowiednie, gdy wyniki mają służyć władzom administracyjnym, na przykład do celów planowania przestrzennego.

REFERENCES

- Abercrombie, P. (1944), *Greater London Plan*, HM Stationery Office.
- Amati, M. (2016), *Urban green belts in the twenty-first century*, Routledge.
- Badach, J. et al. (2022), ‘Developing the Urban Blue-Green Infrastructure as a Tool for Urban Air Quality Management’, *Sustainability*, 14(15), p. 9688. Available at: <https://doi.org/10.3390/su14159688> (accessed: 13.03.2024).
- Benedict, M.A., McMahon, E.T. (2012), *Green infrastructure: linking landscapes and communities*, Island Press.
- Blazy, R., Łysień, M. (2021), ‘Teaching Spatial Planning Using Elements of Design Thinking as an Example of Heuristic in Urban Planning’, *Sustainability*, 13(8), p. 4225. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13084225> (accessed: 13.03.2024).
- Bożętka, B. (2008), ‘Systemy zieleni miejskiej w Polsce – ewolucja i problemy kształtowania’, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, p. 22.
- Burke, G.H. (1966), *Greenheart Metropolis: Planning the Western Netherlands*, New York: St. Martin’s Press.
- Buxton, M., Goodman, R. (2002), *Maintaining Melbourne’s green wedges: Planning policy and the future of Melbourne’s green belt*, School of Social Science and Planning, RMIT University.
- Cieszevska, A. (2004), ‘Model płatów i korytarzy – dyskusja pojęć’, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, p.14.

- Cieślak, I. (2006), 'Identyfikacja układu terenów otwartych w mieście Olsztynie', *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 5(1–2), pp. 17–24.
- Czarnecki, W. (1961), *Planowanie miast i osiedli: Tereny zielone*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Erickson, D. (2012), *MetroGreen: Connecting open space in North American cities*, Island Press.
- Evans, C., Freestone, R. (2010), 'From Green Belt to Green Web: Regional Open Space Planning in Sydney, 1948–1963', *Planning Practice & Research*, 25(2), pp. 223–240. Available at: <https://doi.org/10.1080/02697451003740254> (accessed: 13.03.2024).
- Forman, R.T., Godron, M. (1981), 'Patches and structural components for a landscape ecology', *BioScience*, 31(10), pp. 733–740.
- Fryd, O., Pauleit, S., Bühler, O. (2012), 'The role of urban green space and trees in relation to climate change', *CABI Reviews* (2011), pp. 1–18.
- Goodspeed, R. et al. (2022), 'A regional spatial planning model for multifunctional green infrastructure', *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(3), pp. 815–833.
- GUS (2018), *Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2018*. Available at: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-rzeczypospolitej-polskiej-2018,2,18.html> (accessed: 14.03.2024).
- Haq, S.M.A. (2011), 'Urban green spaces and an integrative approach to sustainable environment', *Journal of Environmental Protection*, 2(5), pp. 601–608.
- Jaeger, J.A.G. (2000), 'Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation', *Landscape Ecology*, 15(2), pp. 115–130. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1008129329289> (accessed: 13.03.2024).
- Kropf, K., Malfroy, S. (2013), 'What is urban morphology supposed to be about? Specialization and the growth of a discipline', *Urban Morphology*, 17(2), pp. 128–132.
- Kühn, M., Gailing, L. (2016), 'From green belts to regional parks: History and challenges of suburban landscape planning in Berlin' [in:] *Urban Green Belts in the Twenty-first Century*, p. 185–202, Routledge.
- Lang, S., Tiede, D. (2003), 'vLATE Extension für ArcGIS–vektorbasiertes Tool zur quantitativen Landschaftsstrukturanalyse', *ESRI Anwenderkonferenz*, pp. 1–10.
- Lee, A., Jordan, H., Horsley, J. (2015), 'Value of urban green spaces in promoting healthy living and wellbeing: prospects for planning', *Risk Management and Healthcare Policy*, pp. 131. Available at: <https://doi.org/10.2147/RMHP.S61654> (accessed: 13.03.2024).
- Lian, Z., Feng, X. (2022), 'Urban Green Space Pattern in Core Cities of the Greater Bay Area Based on Morphological Spatial Pattern Analysis', *Sustainability*, 14(19), p. 12365. Available at: <https://doi.org/10.3390/su141912365> (accessed: 13.03.2024).
- McGarigal, K., Marks, B.J. (1995), 'FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure', *PNW-GTR-351*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Available at: <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351> (accessed: 13.03.2024).
- Meneguetti, K.S., Lemes de Oliveira, F. (2021), 'Reconsidering green belts, green wedges and greenways', *Acta Scientiarum. Technology*, 43(1), pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v43i1.55196> (accessed: 13.03.2024).
- Mironowicz, I. (2013), 'Miasto, jego struktura i kompozycja – definicje, schematy, relacje przestrzenne' [in:] Lorens, P., Mironowicz, I. (eds.), *Wybrane teorie współczesnej urbanistyki*, Gdańsk: Politechnika Gdańska, pp. 93–113.
- Mosler, S., Hobson, P. (2021), 'Close-To-Nature Heuristic Design Principles for Future Urban Green Infrastructure', *Urban Planning*, 6(4), pp. 67–79. Available at: <https://doi.org/10.17645/up.v6i4.4451> (Accessed: 13.03.2024).
- Oliveira, V. (2019), 'Urban forms, agents, and processes of change', *The Mathematics of Urban Morphology*, pp. 529–535.
- Pezzagno, M., Frigione, B.M., Ferreira, C.S.S. (2021), 'Reading Urban Green Morphology to Enhance Urban Resilience: A Case Study of Six Southern European Cities', *Sustainability*, 13(16), p. 9163. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13169163> (accessed: 13.03.2024).
- Pietrzak, M. (2023), *Podstawy i zastosowania ekologii krajobrazu: Struktura i praktyka*, Akademia Nauk Stosowanych im. J. A. Komeńskiego w Lesznie.
- Ptaszycka, A. (1950), *Przestrzenie zielone w miastach*, Poznań: Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza.
- Runge, A. (2012), 'Metodologiczne problemy badania miast średnich w Polsce', *Prace Geograficzne*, 129, pp. 83–101.
- Smogorzewski, J. (1974), *System terenów otwartych jako element konstrukcji miasta*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Szulczewska, B. (2018), 'Zielona infrastruktura – czy koniec historii?', *Studia Komitetu Przestrzennego Zagospodarowania Kraju*, CLXXXIX, p. 189. Available at: <https://bibliotekana-uki.pl/articles/2023425.pdf> (accessed: 13.03.2024).
- Szulczewska, B., Kaliszuk, E. (2005), 'Koncepcja systemu przyrodniczego miasta: geneza, ewolucja i znaczenie praktyczne', *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych*, 1, pp. 7–24.
- Tang, B., Wong, S., Lee, A.K. (2007), 'Green belt in a compact city: A zone for conservation or transition?', *Landscape and Urban planning*, 79(3–4), pp. 358–373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.04.006> (accessed: 13.03.2024).
- Wang, J., Banzhaf, E., (2018), 'Towards a better understanding of Green Infrastructure: A critical review', *Ecological Indicators*, 85, pp. 758–772. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.018> (accessed: 13.03.2024).
- Whitehand, J.W.R. (2019), 'Green space in urban morphology: a historico-geographical approach', *Urban Morphology*, 23(1), pp. 5–17.

- Yokohari, M. et al. (2000), 'Beyond greenbelts and zoning: A new planning concept for the environment of Asian mega-cities', *Landscape and Urban Planning*, 47(3), pp. 159–171. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(99\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00084-5) (accessed: 13.03.2024).
- Ying, J. et al. (2022), 'Green infrastructure: Systematic literature review', *Economic research / Ekonomska istraživanja*, 35(1), pp. 343–366.
- Zhu, Y., Ling, G.H.T. (2022), 'A Systematic Review of Morphological Transformation of Urban Open Spaces: Drivers, Trends, and Methods', *Sustainability*, 14(17), p. 10856. Available at: <https://doi.org/10.3390/su141710856> (accessed: 13.04.2024).
- Zou, H., Wang, X. (2021), 'Progress and Gaps in Research on Urban Green Space Morphology: A Review', *Sustainability*, 13(3), p. 1202. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13031202> (accessed: 13.03.2024).