



## Zastosowanie metody minimalnego drzewa rozpinającego (najkrótszego dendrytu) w ocenie efektywności i spójności sieci osadniczej województwa mazowieckiego

### *Application of the minimum spanning tree method in assessing the effectiveness and cohesion of the settlement network of Mazowieckie voivodeship*

Przemysław Śleszyński<sup>1</sup>  Paweł Sudra<sup>1, 2</sup> 

<sup>1</sup>Institut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN

ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

[psleszyn@twarda.pan.pl](mailto:psleszyn@twarda.pan.pl) • [p.sudra@twarda.pan.pl](mailto:p.sudra@twarda.pan.pl)

<sup>2</sup>Institut Rozwoju Miast i Regionów

ul. Targowa 45, 03-728 Warszawa

[pawel.sudra@igpim.pl](mailto:pawel.sudra@igpim.pl)

**Zarys treści.** W artykule przedstawiono wykorzystanie metody minimalnego drzewa rozpinającego (MDR), inaczej najkrótszego dendrytu, dla zbioru punktów adresowych województwa mazowieckiego, do określenia stopnia rozproszenia zabudowy. Zaproponowano dwa wskaźniki: efektywności sieci osadniczej (rozumianej jako stosunek długości MDR do liczby ludności, co pozwala ocenić koszty jednostkowe w przypadku np. budowy infrastruktury, koniecznej do połączenia punktów osadniczych) oraz spójności sieci osadniczej (uwzględniającej gęstość zaludnienia, co dodatkowo wskazuje na koszty związane z obsługą odosobnionych siedlisk, kolonii i zabudowy rozproszonej). Opracowanie wykonano na podstawie danych z końca 2016 r. dla ponad 1 mln punktów adresowych, wykreślając grafy na podstawie geometrycznych odległości euklidesowych dla każdej z 314 gmin województwa. Następnie wyniki przedstawiono na mapach, przeprowadzając ich dyskusję w kontekście historycznych i współczesnych uwarunkowań rozwoju osadnictwa. Wskazano też na przydatność wskaźników dla oceny i planowania obsługi infrastrukturalnej, biorąc pod uwagę wysokie koszty chaosu przestrzennego.

**Słowa kluczowe:** minimalne drzewo rozpinające, najkrótszy dendryt, spójność i efektywność sieci osadniczej, rozproszenie zabudowy, chaos przestrzenny, województwo mazowieckie.

## Wstęp

Polska należy do krajów o rozproszonej strukturze lokalnego osadnictwa. Dotyczy to zarówno typowych terenów wiejskich, jak też obszarów urbanizujących się oraz w dużym stopniu miast różnej wielkości. Dla każdego z tych typów osadniczych uwarunkowania rozproszenia są odmienne. Na lokalizację, wielkość i kształt wsi wpływ miały czynniki głównie glebowe i geomorfologiczne, związane z rzeźbą terenu i żyznością gleb, a także topoklimatyczne i związane z potrzebami obronnymi (Szulc, 1995). Na przykład krajobraz polodowcowy z dużą ilością drobnych form, takich jak wzniesienia (pagórki) i zagłębienia,

w naturalny sposób sprzyjał powstawaniu małych skupień zabudowy, równocześnie skutecznie ograniczając ich rozrost.

Współcześnie obserwowane układy osadnicze noszą w sobie liczne ślady przekształceń, które zachodziły na ziemiach polskich pod zaborami w XIX w. Silne rozproszenie osadnictwa w wielu regionach kraju jest też efektem wadliwej struktury agrarnej, zwłaszcza w byłym zaborze austriackim, powodującej dzielenie siedlisk na bardzo małe nieraz działki (Domański i inni, 2010). Wsie, zwłaszcza we wschodniej i centralnej części kraju, posiadają wiele kolonii i pojedynczych, oddalonych od siebie zagród. W zaborze rosyjskim było to związane m.in. z bezpieczeństwem przeciwpożarowym, ale też polityką władz carskich „rozluźniania” zabudowy, aby osłabiać relacje społeczne i ryzyko buntu ludności chłopskiej. W zaborze pruskim, w guberni poznańskiej, po zmianach prawnych, sprzyjających rozdrabnianiu działalności folwarcznej, w latach 1824–1859 powstało około 19 tys. tzw. „wysiółków”, czyli wsi samotniczych (Zaborski, 1926). Często spotykane na Warmii i Mazurach „wybudowania” powstawały przeważnie po separacji gruntów wiejskich (Batyk, 2010). Stąd też skutki zagospodarowania wielu układów, w tym zwłaszcza w otoczeniu miast, kształtują się odmiennie na obszarze Galicji, byłego Królestwa Kongresowego, Wielkopolski, Śląska czy też tzw. Ziemi Zachodnich i Północnych.

Strefy podmiejskie zaczęły kształtować się już we wczesnośredniowiecznych formach osadniczych typu miejskiego, w postaci zespołów gród-osada służebna (Koter, 1980). W kolejnych wiekach ich rozwój następował ewolucyjnie. Na kształtowanie się współczesnych stref podmiejskich w Polsce istotnie wpłynęła dziewiętnastowieczna rewolucja przemysłowa, a po części też realizacja potrzeb lotniskowych i rekreacyjnych w okresie międzywojennym. Procesy suburbanizacji zintensyfikowały się od II połowy XX w., w okresie Polski Ludowej. W związku z kształtowaniem się aglomeracji wielkomiejskich powstały różne ich delimitacje, uwzględniające również wskaźniki osadnicze (Sudra, 2018). Strefy podmiejskie mają rozproszoną strukturę zabudowy szczególnie wskutek wadliwego prawa planistycznego ustanowionego po 1990 r. (w tym zwłaszcza Ustawy z 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym), gdy jeszcze bardziej zwiększyło się tempo suburbanizacji (Kowalewski i inni, 2018). Natomiast stosunkowo niska gęstość zaludnienia i użytkowania terenu w miastach wynika z tego, że rozwijały się one po II światowej w warunkach gospodarki centralnie sterowanej i braku mechanizmów renty gruntowej (Węćławowicz, 1996). Spowodowało to ekstensywne zagospodarowanie terenów miejskich, a po 1990 r. chaotyczne, żywiołowe procesy przekształceń, w tym zwłaszcza centrów miast (Liszewski i Wolaniuk, 1998), wymagające kosztownej rewitalizacji (Zuziak, 1998).

Silne rozproszenie zabudowy jest podstawową przyczyną wysokich kosztów funkcjonowania infrastruktury technicznej i społecznej, przeznaczonej do jej obsługi. Według ostatnich szczegółowych badań P. Gibasa i K. Heffnera (2018), koszty uzbrojenia i utrzymania części infrastruktury technicznej (drogi, wodociągi, kanalizacja, energetyka) dla tych pojedynczych zabudowań, które są oddalone powyżej 180 m od zwartej zabudowy, w ciągu 8 lat wynoszą w skali całego kraju około 60 mld zł. Problem ten nabrzmiewa z powodu braku skutecznych narzędzi planistycznych, w tym ograniczeń prawnych dla chaotycznej, niekontrolowanej urbanizacji, zwłaszcza w strefach podmiejskich i regionach turystyczno-rekreacyjnych.

Na tym tle celowe staje się poszukiwanie wskaźników i mierników, pozwalających z jednej strony znajdować prawidłowości w lokalizacji historycznie i współcześnie ukształtowanej zabudowy, a z drugiej strony racjonalnie planować zagospodarowanie przestrzenne,

związane z układem topologicznym obiektów osadniczych. Służą temu zwłaszcza wskaźniki koncentracji i rozproszenia. Są one szeroko stosowane w różnorodnych badaniach układów osadniczych i przemian urbanizacyjnych, także w Polsce (Uhorczak, 1932; Kostrubiec, 1972; Golachowski i inni, 1974; Chilczuk, 1975; Jażdżewska, 2008; Śleszyński red., 2013; Szmytkie, 2014; Sudra, 2016). Jako że koncentracja (*versus* rozproszenie) jest jedną z podstawowych cech w morfologii osadnictwa, opracowano już kilkaset wskaźników, od stosunkowo prostych (klasyczną, najprostszą miarą jest ilorazowy współczynnik gęstości zabudowy lub zaludnienia), do bardziej zaawansowanych, wykorzystujących m.in. metody statystyczne i analizy skupień. Należą do nich m.in. wskaźnik Giniego (Gini, 1912; Alonso-Villar, 2011; Stępnia, 2014; Arbia i inni, 2015), metoda najbliższego sąsiada (Clark i Evans, 1954; Boots i Getis, 1988; Broitman i Czamanski, 2012), miary centrograficzne (Sviatlovsky i Eells, 1937; Wong, 1999; Jażdżewska, 2018) oraz entropia Shannona (Shannon, 1948; Miedwiedkow, 1966; Thomas, 1981; Yeh i Li, 2001; Verzosa i Gonzalez, 2010; Paulov i Bezák, 2017).

Podstawowym problemem metodologicznym przy wyznaczaniu wskaźników koncentracji form osadniczych jest ustalenie definicji rozproszenia i skupienia, zawierającej kryteria lub warunki topologii i odległości między obiektami lub obszarami zabudowy. Proces koncentracji zjawiska w przestrzeni wiąże się bowiem z jego skupianiem na pewnym obszarze w charakterystyczny topologicznie sposób (równomierny-nierównomierny, regularny-nieregularny, uporządkowany-losowy itd.). Istotą tworzenia wskaźników jest tu jednoznaczna i niebudząca wątpliwości interpretacyjnych możliwość ich matematycznego (algebraicznego, geometrycznego) zdefiniowania (Śleszyński, 2013; Sudra, 2016).

Przedmiotem badania może być sieć osadnicza, która rozumiana jest zazwyczaj jako układ osiedli (miast i wsi) uporządkowanych przestrzennie, tzn. pozostających w pewnych relacjach przestrzennych wynikających z ich bliższego lub dalszego sąsiedztwa; zróżnicowanych pod względem wielkościowym (struktura hierarchiczna) i pełniących określone funkcje, wynikające z terytorialnego podziału pracy (Runge i Runge, 2008). Sieć osadniczą tworzy jednak zbiór realnych obiektów przestrzennych, przede wszystkim budynków. Budynki zaś mają swoje adresy (o czym będzie mowa dalej). Dlatego do celów niniejszego badania przyjęto, że sieć osadniczą stanowi zbiór budynków, traktowanych jako punkty osadnicze. Podejście to można byłoby określić badaniem struktury sieci mikroosadniczej. Nie negując potrzeby badania powiązań pomiędzy poszczególnymi jednostkami osadniczymi (miastami i wsiami), a schodząc o poziom niżej i analizując zbiór wszystkich budynków, jesteśmy w stanie lepiej rozpoznać rozproszenie zabudowy.

Celem opracowania jest ocena efektywności i spójności sieci osadniczej województwa mazowieckiego przy użyciu zaproponowanych nowych wskaźników bazujących na metodzie grafowej. Wykorzystanym w tym celu grafem jest minimalne drzewo rozpinające (*minimum spanning tree*), zwane tradycyjnie najkrótszym dendrytem<sup>1</sup>. W kontekście funkcjonowania sieci osadniczej wyliczanie wskaźników koncentracji i rozproszenia jest niezwykle przydatne praktycznie, bowiem pomaga ocenić koszty jednostkowe, związane zwłaszcza z obsługą infrastrukturalną (komunikacyjną, wodno-ściekową, gazową, energetyczną i innymi). Z pomocą przychodzą tutaj grafowe metody optymalizacji tras przejazdu między punktami. Bazują na nich także takie zagadnienia, jak „problem komiwojażera” (*travelling salesman problem*) czy „problem chińskiego listonosza” (*Chinese postman pro-*

<sup>1</sup> W artykule zdecydowano się na użycie w pierwszej kolejności określenia „minimalne drzewo rozpinające”, które współcześnie jest częściej stosowane.

blem) (Potrykowski i Taylor, 1982). Struktura sieci transportowej rozpatrywana w dynamicznym ujęciu grafowym pozwala ukazać jej wpływ na dostępność przestrzenną różnych lokalizacji, która związana jest także z prędkością podróży (Pomianowski, 2018).

### Metoda grafowa w badaniach geograficznych i osadniczych

Teoria grafów jako część topologii algebraicznej znajduje szerokie zastosowanie w naukach geograficznych, w których istotną rolę odgrywa badanie struktury (Ratajczak, 1977). Dendryt wrocławski – metoda taksonomiczna zaproponowana przez grupę matematyków polskich pracujących przed II wojną światową na Uniwersytecie Lwowskim, a po wojnie na Uniwersytecie Wrocławskim (Florek i inni, 1951) – jest używany do grupowania w skupienia obiektów jak najbardziej do siebie podobnych, przy czym możliwe jest określenie z góry liczby wynikowych grup, zależnie od przyjętej wartości krytycznej. Macierz odległości taksonomicznych stanowi podstawę różnorodnych szczegółowych procedur hierarchicznego grupowania obiektów. Różni autorzy, w tym geografowie, konstruowali dendryty służące podziałowi zbioru elementów na podzbiory, stosując te procedury m.in. w celu zdefiniowania węzłowej, hierarchicznej struktury powiązań między miastami i analizy zróżnicowania przestrzennego miast pod względem wybranych cech społeczno-ekonomicznych (Nystuen i Dacey, 1968; Domański, 1970; Parysek, 1985; Runge, 1992).

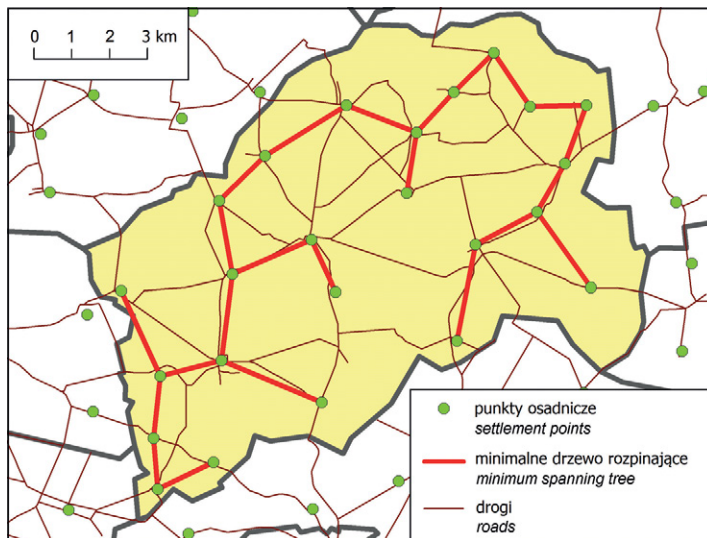
Metody grafowe w badaniach morfologii osadnictwa rozwinął w literaturze polskiej A. Zagożdżon (1970, 1971). W jego ujęciu poszczególne jednostki osadnicze, określone poprzez szkielet dróg łączących oznaczone punktowo krańce siedliska, utożsamiane są z odpowiednio rozwiniętym grafem. Stopień wypełnienia grafu wynika z rozwoju strukturalnego, i na ogół także gospodarczego, danej miejscowości. Badając wykształcenie form osadniczych autor ten wykorzystał wskaźniki wprowadzone wcześniej przez J. Kansky'ego (1963) do badań sieci transportowej. A. Zagożdżon (1970, 1977) zwrócił uwagę, że tak jak w analizie funkcjonalnej jednostki osadniczej jest ona traktowana jako pojedynczy graf, tak w analizie morfologicznej sieci każda miejscowość staje się węzłem, czyli jednym z elementów sieci jako grafu (lub systemu grafów).

Krawędziami w tych grafach są elementy urządzeń sieciowych (np. istniejące linie komunikacyjne), bądź też faktyczne połączenia związane np. z przeptywami osób (dojazdy do pracy, usług itp.), towarów czy informacji. Mogą być też nimi połączenia prostoliniowe na płaszczyźnie euklidesowej i wówczas, przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów kolejności łączenia wierzchołków, otrzymujemy graf zwany dendrytem najkrótszych odległości inaczej najkrótszym dendrytem (Kostrubiec, 1972), bądź minimalnym drzewem rozpinającym (MDR; *minimum spanning tree*; *MST*) (Graham i Hell, 1985). MDR łączy wszystkie wierzchołki w ten sposób, że suma odległości pomiędzy nimi jest najmniejsza (ryc. 1). Analiza grafu pozwala na ilościowe rozpoznanie i ocenę koncentracji (rozproszenia) punktów osadniczych. Ocena stopnia skupienia sieci stanowi punkt wyjścia do dalszych etapów charakterystyki struktury przestrzennej danego układu.

Nie zagłębiając się w zagadnienie budowy algorytmów służących do wyliczenia i skonstruowania MDR, zauważmy, że jest ich kilka, przy czym trzy klasyczne, deterministyczne algorytmy o złożoności liniowo-logarytmicznej znajdujące dla zadanego grafu minimalne drzewo rozpinające, to: algorytm Borůvki (Borůvka, 1926; Choquet, 1938; Florek i inni, 1951; Sollin, 1965), algorytm Prima (Jarnik, 1930; Prim, 1957; Dijkstra, 1959) i algorytm

Kruskala (Kruskal, 1956). Do współczesnych, bardziej wydajnych algorytmów należy rekurencyjny i niedeterministyczny algorytm znajdowania minimalnego drzewa rozpinającego w oczekiwanym czasie liniowym autorstwa D. Kargera i innych (1995), a także algorytm złożony wykorzystujący odwrotną funkcję Ackermanna (Chazelle, 2000).

Metoda minimalnego drzewa rozpinającego nadaje się do wykorzystania wszędzie tam, gdzie potrzebna jest minimalizacja odległości. Jedno z pierwszych zastosowań pochodzi od K. Borůvky (1926), a opracowany algorytm posłużył do optymalizacji przebiegu sieci energetycznej. W Polsce metodę najkrótszego dendrytu zastosował m.in. B. Kostrubiec (1972) dla oceny koncentracji i spójności sieci miast. Podejmowano też z sukcesem analizy optymalizacji sieci infrastrukturalnych różnego typu, m.in. składowania biomasy (Duczowska-Kądział i inni, 2013), obsługi farm wiatrowych (Wędzik, 2014), a także badania dotyczące możliwości najszybszej i najbardziej efektywnej migracji elementów środowiska w krajobrazie (Solon i Pomianowski, 2014). W literaturze zagranicznej odnoszącej się do analizy zjawisk oraz metodyki badań geograficznych są także dość liczne przykłady zastosowań MDR, m.in.: w procedurze generalizacji map za pomocą teorii grafów (MacKanness i Beard, 1993), opracowaniu procedury klasyfikacji służącej wydzieleniu przestrzennych jednostek społeczno-gospodarczych (regionalizacji) (Assunção i inni, 2006), wyjaśnieniu zmienności przestrzennej i migracji gatunków roślin i zwierząt (Ruegg i Smith, 2002; Liepelt i inni, 2010), analizie powiązań przestrzennych w krajobrazie (Bunn i inni, 2000).



**Ryc. 1.** Minimalne drzewo rozpinające (najkrótszy dendryt) wyznaczone dla wybranych punktów osadniczych (gmina Wodynie w powiecie siedleckim)

*Minimum spanning tree (shortest dendrite) constructed for selected settlement points (gmina of Wodynie, powiat of Siedlce)*

Opracowanie własne, tak samo pozostałe ryciny/Authors' own elaboration, like remaining figures.

## Minimalne drzewo rozpinające – nowa propozycja wykorzystania

Na bazie MDR można zaproponować kilka wskaźników spójności lub efektywności sieci osadniczej, wiążących łączną długość odcinków grafu z innymi zmiennymi, takimi jak np. liczba budynków, ludność lub powierzchnia obszaru objętego zagospodarowaniem. Dwa wskaźniki, które będą dalej wykorzystane, przedstawiają się następująco:

$$W_E = \frac{S}{l} \text{ oraz} \quad (1)$$

$$W_S = \frac{S}{l/p} \text{ lub } W_S = \frac{S}{l \times p}, \text{ gdzie:} \quad (2)$$

$W_E$  – wskaźnik efektywności sieci osadniczej,

$W_S$  – wskaźnik spójności sieci osadniczej,

$S$  – długość grafu (MDR),

$l$  – liczba ludności lub inna zmienna ekonomiczna (liczba przedsiębiorstw, budynków),

$p$  – powierzchnia obszaru, który obsługuje MDR (gmina, dzielnica, województwo lub inny region).

Efektywność sieci osadniczej wiąże się ze spójnością sieci infrastruktury (drogowej, technicznej itd.). Jak zauważył A. Zagożdżon (1977, s. 167) analiza grafowa, odpowiadając na pytanie „jak jest”, pozwala też na sformułowanie odpowiedzi na pytanie „jak zrobić lepiej”, może być zatem wykorzystana do optymalizacji struktury przestrzennej (np. skrócenia dróg, jakimi przemieszczają się ludzie w mieście pomiędzy węzłami, czyli miejscami zamieszkania, pracy, nauki, korzystania z usług). To samo dotyczy przemieszczeń osób, ładunków i informacji poprzez sieci infrastruktury. Przyjęcie jako węzłów sieci (wierzchołków grafów) punktów osadniczych wyznaczonych przez budynki, a nie przez całe jednostki osadnicze powoduje, że możemy badać efektywność sieci w skali lokalnej, co sprawdzi się szczególnie na terenach wiejskich, charakteryzujących się rozproszeniem zabudowy. W odróżnieniu od analizy grafowej morfologii siedliska proponowanej przez A. Zagożdżona (1970), ale również analizy sieci osadniczej metodą *quasi-dendrytów* B. Miszewskiej (1976), w badaniu wzięto pod uwagę nie tylko skrajne zabudowania każdego siedliska (miejscowości), lecz zbiór wszystkich budynków w gminie (przynajmniej tych posiadających adresy).

Semantyczne rozróżnienie wskaźników pod względem efektywności i spójności jest celowe. Wskaźnik spójności, odnoszony do powierzchni, bazując na ułożeniu topologicznym punktów MDR pokazuje równocześnie ich koncentrację (rozproszenie). Natomiast efektywność jest miarą ekonomiczną i klasycznie oznacza stosunek włożonego wysiłku do uzyskanych efektów. Wysiłek ten jest ponoszony w ramach różnej aktywności człowieka, m.in. związanej z podróżami i transportem towarów, więc powinien być odnoszony do takich charakterystyk, jak liczba ludności zamieszkałej w punktach adresowych, liczba działających przedsiębiorstw, itp. Proponowany wskaźnik spójności także zawiera parametr liczby ludności. Dodatkowo poprzez odniesienie do powierzchni badanej jednostki, otrzymujemy miernik będący pochodną gęstości zaludnienia i długości najkrótszego dendrytu. Szczególnie dobrze nadaje się on do oceny obszarów słabo zaludnionych, na któ-

rych kwestie racjonalnego związania punktów adresowych są najbardziej problematyczne ze względu na niewielką populację rozłożoną na dużym obszarze. Wskaźnik spójności może więc być interpretowany jako wskaźnik nierównomierności rozmieszczenia zjawiska i związanej z nią możliwości obsługi ludności.

MDR jest metodą grafową, która w tym przypadku tworzy model realnie istniejącej przestrzeni geograficznej (geodezyjnej) i pokazuje idealne połączenia między punktami w terenie. W praktyce rzeczywiste połączenia między tymi punktami, np. drogowe czy wodociągowe, najczęściej nie są liniami prostymi. Różnice te są szczególnie duże na terenach wiejskich, w tym o urozmaiconej rzeźbie, z występującymi przeszkodami terenowymi (wody, kompleksy leśne, duże obiekty infrastrukturalne, np. autostrady rozcinające dotychczasową lokalną sieć drogową między wsiami). Stąd też prezentowana metoda dla niektórych rodzajów działalności i dla niektórych, rzadziej spotykanych obszarów, nadaje się raczej do oceny stopnia rozproszenia (koncentracji) niż do oceny efektywności i kosztów jednostkowych związanych z obsługą osadnictwa. Do tego drugiego celu w innej pracy zaproponowano zestawienie wskaźników sprawności transportowo-osadniczej, uwzględniających m.in. takie zmienne, jak rzeczywista długość tras komunikacyjnych (względem idealnej w linii prostej) oraz rzeczywista prędkość poruszania się (Śleszyński, 2014). Ponadto należy wziąć pod uwagę, że sieci infrastruktury mają charakter hierarchiczny. Podczas gdy te o charakterze magistralnym są najczęściej prowadzone w oderwaniu od sieci drogowej, to w przypadku powiązań lokalnych niekoniecznie już tak jest. Wówczas konstrukcja wskaźników związanych z siecią drogową sprawdzi się lepiej niż tworzenie ich na podstawie odległości euklidesowych. Pomimo powyższych zastrzeżeń można mieć nadzieję, że proponowane wskaźniki przyczynią się do wzbogacenia wachlarza metod związanych z oceną funkcjonowania rozproszonego osadnictwa.

### **Źródła danych, techniki i narzędzia badawcze**

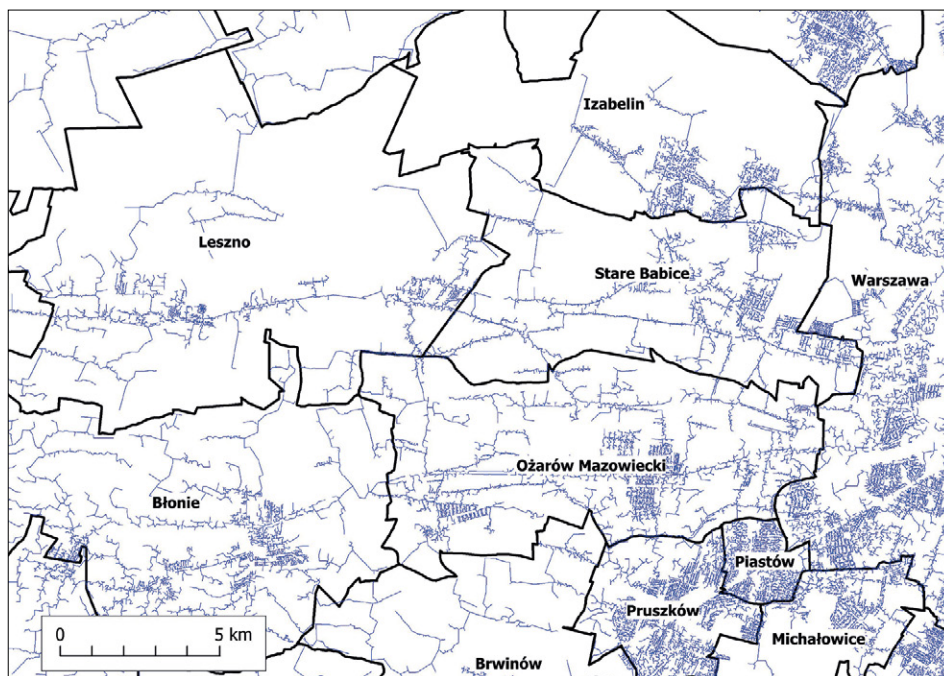
W analizie wykorzystano bazę punktów adresowych pozyskaną z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, udostępnianego przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Baza danych została utworzona na podstawie źródeł niższego rzędu (gminnych rejestrów administracyjnych) pod koniec 2016 r. W granicach województwa mazowieckiego zawiera ona 1,1 mln adresów. Każdy adres opisany jest dokładnymi współrzędnymi geograficznymi (pięć miejsc po przecinku, tj. dokładność rzędu 2–3 m). Ponieważ urzędowa baza punktów adresowych stanowi kluczowe źródło informacji do analiz w wielu branżach, należy przyjąć, że odzwierciedla ona wiarygodnie rozmieszczenie obiektów zabudowy w obszarze badania. Zasadniczo każdy budynek, oprócz różnego rodzaju zabudowań gospodarczych (np. w ramach zabudowy zagrodowej), przyfabrycznych czy kolejowych, czasem także domów letniskowych, powinien mieć swój adres. Niemniej nie można wykluczyć występowania sporadycznych błędów w bazie adresowej (brak ustandaryzowania, nieprawidłowa identyfikacja, nieprawidłowe położenie, duplikaty adresowe). Problemy te nie były szczegółowo badane, chociaż przed wykonaniem analiz sprawdzono pozyskaną bazę pod kątem ewidentnych błędów i niespójności.

Przyjęto, że wskaźnik rozwinięcia grafu MDR, wyrażony przez jego całkowitą długość, będzie wyliczony niezależnie dla każdej jednostki podziału terytorialnego. Na podstawie zbioru punktów adresowych wygenerowano grafy minimalnych drzew rozpinających

(najkrótsze dendryty) w programie ArcGIS z rozszerzeniem SpanningTreeTools. Nakładka ta umożliwia tworzenie różnych wariantów grafów euklidesowych dla obiektów rozmieszczonych w przestrzeni geograficznej. Minimalne drzewa rozpinające obliczono i tym samym automatycznie wykreślono dla wszystkich punktów adresowych, niezależnie w każdej gminie. Użycie narzędzia SpanningTreeTools wbudowano w algorytm iteracyjny zastosowany w ModelBuilder (wizualnym języku programowania dla ArcGIS) na zbiorze punktów dla całego województwa mazowieckiego, przyjmując jako wartość pola dla wykonania każdego kolejnego grafu kod TERYT danej gminy z tabeli atrybutów bazy danych geograficznych. Pojedyncze odcinki dendrytów połączono w jedną polilinię dla każdej jednostki. Powstało w ten sposób 314 grafów, oddzielnie dla każdej gminy (ryc. 2). Kolejnym etapem było odniesienie otrzymanych wyników, tj. długości euklidesowej grafów do wzorów (1) i (2).

Podstawowe informacje statystyczne dotyczące danych wejściowych (liczby punktów adresowych, powierzchni i ludności oraz długości MDR) i wskaźników dla zbioru wszystkich gmin oraz sumarycznie dla województwa zawiera tabela 1.

W porównaniach wskaźników posłużono się klasyfikacją funkcjonalną typów gmin, wydzielonych na podstawie hierarchii administracyjnej, morfologii i funkcji społeczno-gospodarczych (Śleszyński i Komornicki, 2016). Oryginalnie wyróżniono w niej 10 kategorii (typów) gmin (A–J), ale dla celów zwiększenia przejrzystości klasyfikację w niniejszym opracowaniu zredukowano do 5 kategorii:



**Ryc. 2.** Fragment mapy z wyrysowanym MDR dla obszaru kilku gmin na zachód od Warszawy  
*Part of map with MST constructed for several gminas located west of Warsaw*



**Tabela 1.** Podstawowe charakterystyki danych wejściowych i wskaźników obliczonych na ich podstawie dla gmin województwa mazowieckiego*Basic characteristics of the input data and indicators calculated for gminas in Mazowieckie voivodeship*

Cecha/Feature	Powierzchnia (km <sup>2</sup> ) Area (km <sup>2</sup> )	Ludność (tys.) Population (thous.)	Liczba punktów adresowych (tys.) Number of address points (thous.)	MDR MST	W <sub>E</sub> Wskaźnik efektywności sieci osadniczej (m na osobę) Settlement network effectiveness indicator (m per capita)	W <sub>C</sub> Wskaźnik spójności sieci osadniczej (km na osobę na km <sup>2</sup> ) Settlement network cohesion indicator (km per capita x km <sup>2</sup> )
Wartość minimalna <i>Minimum value</i>	5,8	1,7	0,5	23,8	1,80	0,02
Wartość maksymalna <i>Maximum value</i>	517,2	1 744,4	110,0	3 145,9	47,73	10,72
Średnia arytmetyczna <i>Arithmetic mean</i>	113,2	17,1	3,5	177,3	22,05	2,70
Mediana <i>Median</i>	110,8	6,7	2,2	152,4	22,59	2,58
Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>	57,3	99,3	6,6	186,3	9,74	1,72
Suma dla województwa (314 gmin) <i>Sum for the voivodeship (314 communes)</i>	35 558,2	5 349,1	1 080,5	55 667,1	–	–

Opracowanie własne na podstawie danych z bazy punktów adresowych, udostępnionej przez GUGiK, według stanu na koniec 2016 r.

*Authors' own elaboration based on the adress points database, published by GUGiK, as at the end of 2016.*

- AC: (A) – największe miasta, będące stolicami województw (Warszawa); (C) – pozostałe duże i średnie ośrodki miejskie (miasta powiatowe grodzkie i byłe wojewódzkie: Ciechanów, Ostrołęka, Płock, Radom, Siedlce);
- BD: strefy podmiejskie miast wojewódzkich i powiatowych grodzkich (w typach AC);
- E: miasta-ośrodki wielofunkcyjne (większe miasta powiatowe);
- FG: gminy urbanizujące się (poza strefami podmiejskimi większych miast), tj. położone wzdłuż korytarzy transportowych, turystyczne, przemysłowe itp., a także gminy miejsko-wiejskie z miastem o dużym udziale ludności w populacji gminy;
- HIJ: gminy rolnicze i rolniczo-leśne.

## Wyniki

Na rycinie 3 przedstawiono zróżnicowanie przestrzenne pierwszego z wymienionych wskaźników, tj. wskaźnika efektywności sieci osadniczej, obliczonego jako długość MDR na mieszkańca. Im wyższa wartość wskaźnika, tym trzeba więcej infrastruktury na związanie sieci osadniczej i budynków. Oznacza to wyższe koszty jednostkowe uzbrojenia i utrzymania różnorodnych systemów komunikacyjnych, wodno-ściekowych, energetycznych itp.

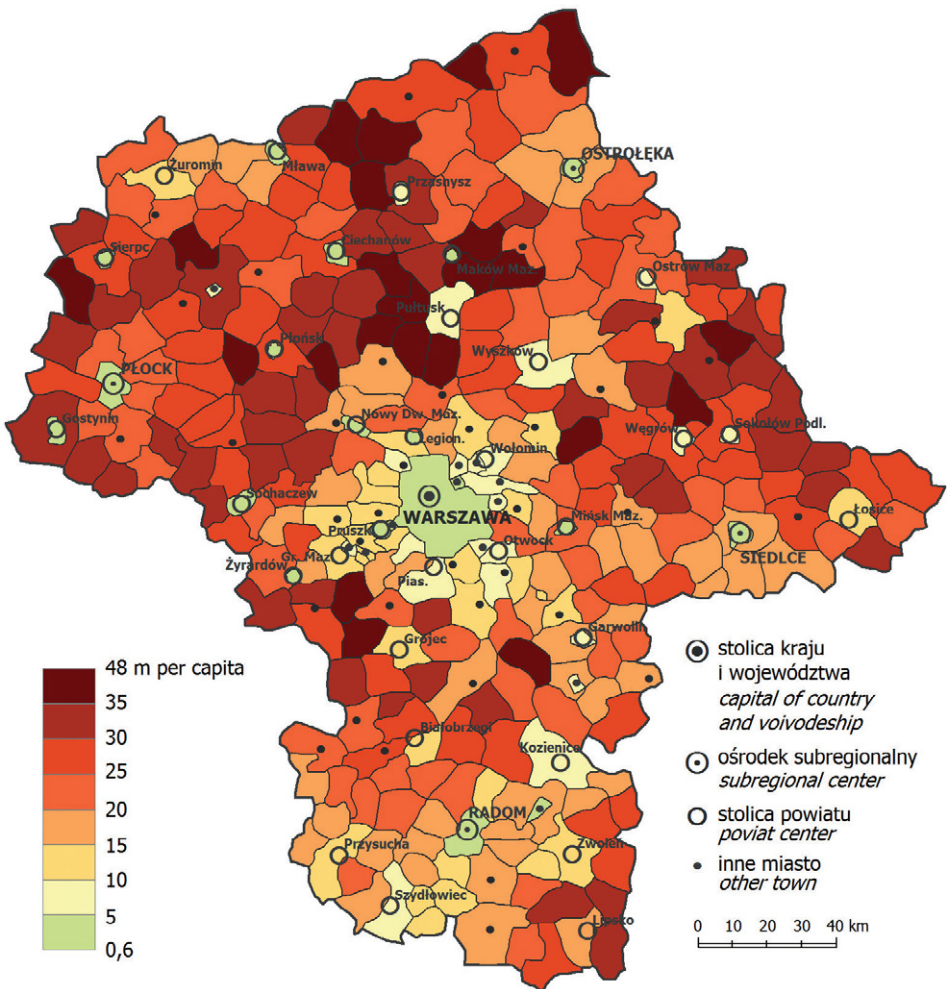
W gminach województwa mazowieckiego wskaźnik efektywności wahał się od 0,6 do 48 m na mieszkańca, a zatem różnice były kilkudziesięciokrotne. Najwyższą efektywnością, co rozumiałe, charakteryzują się obszary zurbanizowane, na czele z Warszawą (poniżej 5 m/osobę). W jej strefie podmiejskiej podobne wartości osiągnęły jedynie miasta Legionowo, Nowy Dwór Mazowiecki, Ożarów Mazowiecki, Piastów. Miasta te charakteryzują się znaczącym udziałem zabudowy mieszkaniowej zarówno jednorodzinnej, jak i wielorodzinnej oraz stosunkowo gęstą strukturą zabudowy. Legionowo i Piastów należą do najgęściej zaludnionych miast w Polsce (ok. 4 tys. os./km<sup>2</sup>), Ożarów Mazowiecki oraz Nowy Dwór Mazowiecki są rzadziej zaludnione (1–1,3 tys. os./km<sup>2</sup>). Następnie, w przedziale wskaźnika efektywności osadniczej 5–10 m/osobę mieszczą się m.in. Piaseczno, Wołomin i Zielonka. Gminy te mają różną specyfikę. Piaseczno jest rozległą gminą miejsko-wiejską w bezpośrednim sąsiedztwie stolicy i od lat obszarem intensywnej suburbanizacji. Wołomin to typowe miasto satelickie stolicy. Zielonka zawdzięcza wysoki wskaźnik efektywności skupieniu urbanizacji na niewielkim obszarze. Większa część gminy to obszary leśne, praktycznie niezamieszkałe.

W przeciwstawnej sytuacji są peryferyjne gminy wiejskie, w których wskaźnik przekracza 35 m/osobę (np. Krzynowłoga Mała, Łyse, Dzierzgowo). Są to gminy położone w północnej części województwa (Równina Kurpiowska, Wzniesienia Mławskie) o typowo rolniczej charakterystyce, także ze znaczącym udziałem użytków zielonych i lasów. Podobną charakterystykę mają też niektóre gminy ziemi siedleckiej (Ceranów, Miedzna). Co jednak interesujące, tak wysokie wartości wskaźnika dotyczą też strefy gmin niezbyt oddalonych od stolicy województwa (Żabia Wola, Pniewy, Strachówka, Wilga). Wysokie rozproszenie występuje też w gminach Tarczyn, Prażmów, Wieliszew, Serock i Wiązowna. Świadczy to wyraźnie o rozproszeniu osadnictwa w strefie podmiejskiej, bowiem wymienione jednostki, w relacji sąsiedztwa z Warszawą, należą do drugiego pierścienia gmin otaczających stolicę, a Wiązowna graniczy z Warszawą bezpośrednio. Podobna sytuacja dotyczy gmin Kampinoskiego Parku Narodowego, takich jak Czostnów, Leoncin, Brochów i Kampinos, w przypadku których ochrona przyrody skutecznie ograniczyła rozwój zabudowy na rozległych obszarach. Zgrupowanie gmin o dużym rozproszeniu osadnictwa znajduje się jeszcze w rejonie Pułtusa (Pokrzywnica, Winnica, Gzy, Świercze, Gołymień-Ośrodek), chociaż sama gmina Pułtusk należy już do jednostek o wysokim wskaźniku efektywności.

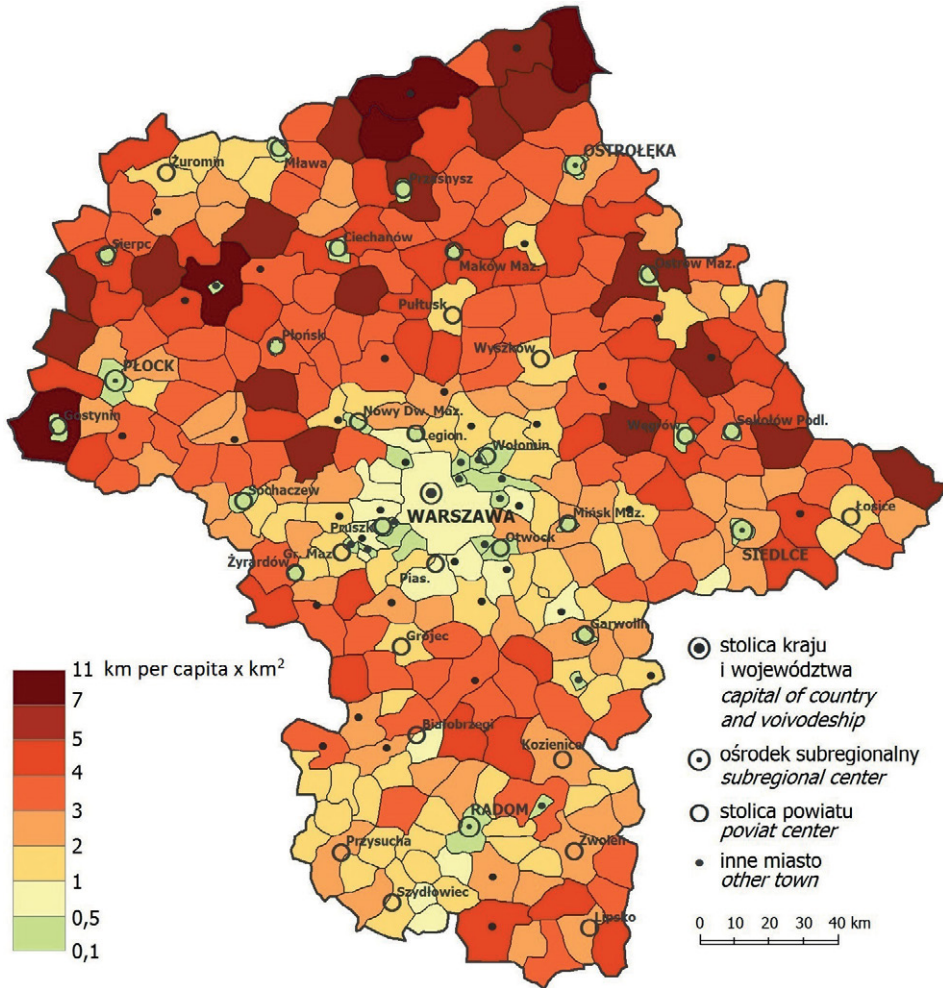
Na rycinie 4 przedstawiono wyniki obliczeń dla wskaźnika spójności sieci osadniczej. Mapa w pewnym stopniu przedstawia zmienność przestrzenną będącą pochodną międzygminnego zróżnicowania wskaźnika efektywności, ale ujawniają się pewne różnice (ryc. 5). Rosną one wraz ze zwiększaniem się stopnia rozproszenia. Na przykład w gminie Chorzele (północ województwa) wskaźnik  $W_s$  wyniósł blisko 11 km na osobę na km<sup>2</sup> (maksymalna wartość wśród wszystkich badanych gmin), podczas gdy wskaźnik  $W_\varepsilon$  – niecałe 30 m na osobę – plasował się niewiele wyżej niż mediana (22). Z tego powodu obydwa wskaźniki można uznać za komplementarne w ocenie stopnia koncentracji (rozprosze-

nia) i spójności sieci osadniczej. Ogólną interpretację wskaźników efektywności i spójności sieci osadniczej przedstawiono już w rozdziale pt. Metoda grafowa i propozycja jej wykorzystania.

W praktyce obydwa wskaźniki zachowują się inaczej w różnych kategoriach gmin. Aby rozpoznać to zjawisko, posłużono się opisaną w części metodycznej klasyfikacją gmin na 5 typów. Wyniki porównań wskaźników (minimum, maksimum, średnia arytmetyczna) ilustruje ryc. 6. Główną cechą charakterystyczną jest niezwykle silne zróżnicowanie gmin rolniczych i peryferyjnych (typ III), ale również gmin podmiejskich (BD) i urbanizujących się (FG). Warto tu zwrócić uwagę, że w poszczególnych, w miarę jednorodnych typach,

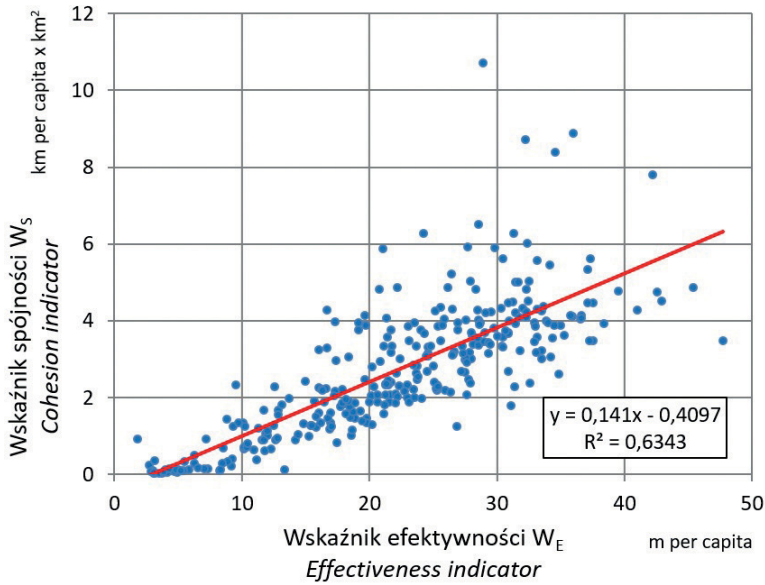


**Ryc. 3.** Efektywność sieci osadniczej w gminach według wskaźnika długości minimalnego drzewa rozpinającego (MDR) na osobę (mieszkańca)  
Effectiveness of the settlement network in gminas according to the minimum spanning tree (MST) length indicator, calculated per capita (inhabitant)

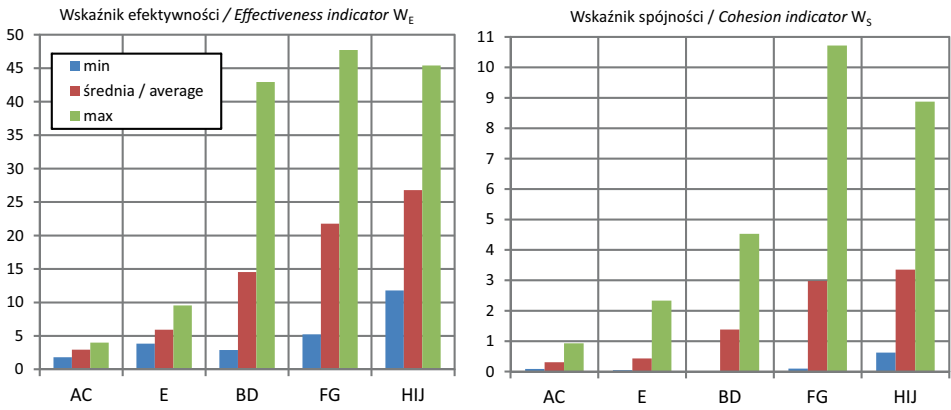


**Ryc. 4.** Spójność sieci osadniczej według wskaźnika długości minimalnego drzewa rozpinającego (MDR) w przeliczeniu na gęstość zaludnienia  
*Cohesion of the settlement network in gminas according to the minimum spanning tree (MST) length indicator, calculated in line with population density*

różnice pomiędzy skrajnymi wartościami wskaźników obliczonych dla gmin są nawet dziesięciokrotne. Świadczy to o daleko idących różnicach w sieci osadniczej, powodujących dysfunkcje w zagospodarowaniu przestrzennym. Szczególnie niepokojące jest, że niektóre gminy podmiejskie mają wskaźniki efektywności i spójności na poziomie gorszym niż mediana dla gmin rolniczych. Z drugiej strony można wskazać pozytywne przykłady gmin, np. miasta Gostynin, Łaskarzew i Raciąż, cechujące się zwartą zabudową, czy też wiejskie Domanice, Jastrząb, Mirów, Wierzbica, na których korzyść działa stosunkowo wysoka, jak na gminy niemiejskie, gęstość zaludnienia.



**Ryc. 5.** Porównanie wartości wskaźników efektywności i spójności sieci osadniczej dla 314 gmin województwa mazowieckiego  
*Comparison of values for the effectiveness and cohesion indicators regarding the settlement network in the case of 314 gminas of Mazowieckie voivodeship*



**Ryc. 6.** Porównanie wartości wskaźników efektywności i spójności sieci osadniczej dla 5 typów gmin województwa mazowieckiego  
*Comparison of values for the effectiveness and cohesion indicators regarding 5 types of gmina in Mazowieckie voivodeship*  
 AC – Warszawa oraz inne duże i średnie ośrodki miejskie, E – strefa podmiejska Warszawy oraz miast powiatowych grodzkich (byłych wojewódzkich), BD – miasta – ośrodki wielofunkcyjne (większe miasta powiatowe), FG – gminy urbanizujące się, HIJ – gminy rolnicze i rolniczo-leśne  
 AC – Warsaw and other large and medium-sized urban centers, E – suburban zone of Warsaw and cities with poviat rights (former voivodeship capitals), BD – towns – multifunctional centers (larger poviat towns), FG – urbanising communes, HIJ – agricultural and agricultural-forestry communes

## Podsumowanie

Przeprowadzone analizy pozwalają na wyciągnięcie kilku wniosków o charakterze poznawczym, metodologicznym i praktycznym:

1. Województwo mazowieckie charakteryzuje się dużym rozrzutem wartości wskaźników rozproszenia i spójności sieci osadniczej. W niemiejskich kategoriach gmin różnice pomiędzy jednostkami o najniższych i najwyższych wartościach wskaźników są nawet dziesięciokrotne. Świadczy to o niezwykle zróżnicowanych drogach rozwojowych osadnictwa od czasów historycznych do współczesnych. Ma to związek ze złożonymi uwarunkowaniami rozwoju osadnictwa w toku ewolucji społeczno-gospodarczej regionu (Gieysztor i Samsonowicz, 1994; Plit, 1996; Owsiański i Śleszyński, 2016).
2. Najmniej efektywne i sprawne (spójne) osadnictwo występuje w północnej i zachodniej części województwa, tj. zwłaszcza na Kurpiach oraz na pograniczu Mazowsza i Podlasia. Są to obszary wyludniające się (Wiśniewski i inni, 2016) i zmarginalizowane pod względem rozwoju społeczno-gospodarczego (tzw. obszary problemowe; Śleszyński i inni, 2017). Wydaje się, że zaproponowane wskaźniki mogą być pomocne w delimitacji tego typu obszarów, w związku np. z depopulacją w dłuższym okresie czasu (Śleszyński i inni, 2018b).
3. Z kolei poza największymi miastami i pewną częścią stref podmiejskich stosunkowo dobre wyniki osiągnęły gminy w środkowo-południowej części województwa (dolina Pilicy, m.in. gminy sadownicze w rejonie Warki i Grójca). Świadczyć to może o pozytywnym wpływie wysokotowarowego rolnictwa na koncentrację zabudowy wiejskiej, jak też na ograniczanie nadmiernej defragmentacji krajobrazu (Śleszyński i Solon, 2017).
4. Korzystne wskaźniki mają też gminy w południowej części województwa (dawne województwo radomskie), co wiąże się z ogólnie większą spójnością sieci osadniczej w gminach południowej i zachodniej części kraju. Może to oznaczać, że struktura zagospodarowania przestrzeni w tym fragmencie województwa jest już bardziej typowa dla historycznej Małopolski niż dla Mazowsza, do którego gminy te zostały administracyjnie wcielone. Może to być również efekt pozycji i znaczenia Radomia w zaborze rosyjskim, w okresie gdy dość intensywnie rozwijało się na tym obszarze osadnictwo.
5. Analizy wskazują na nadmierne rozproszenie zabudowy w strefach podmiejskich miast (zwłaszcza Warszawy). Przy tym współczesna tendencja do rozpraszania i bezładnej lokalizacji zabudowy oraz różnego rodzaju działalności nałożyła się na już istniejące układy lokalne, związane z historycznie uwarunkowanym rozproszeniem osadnictwa wiejskiego w byłym zaborze rosyjskim. Układy te można postrzegać jako chaotyczne, nieracjonalne i nieefektywne, chociaż z punktu widzenia ówczesnej polityki ich ukształtowanie było w dużej mierze rezultatem celowych działań.
6. Wskaźniki stosunkowo dobrze odwzorowują rozproszenie (koncentrację) zabudowy, przy czym łatwiejszy do interpretacji jest wskaźnik efektywności  $W_e$ , w którym długość MDR jest odnoszona do liczby mieszkańców. Wskaźnik ten może mieć zastosowanie w ocenie zagospodarowania infrastrukturalnego w kontekście ponoszonych kosztów jednostkowych, związanych zwłaszcza z chaosem przestrzennym i chłonnością demograficzną obszarów (Śleszyński i inni, 2018a), a także w kontekście

kształtowania się sieci transportowo-osadniczych w strefach podmiejskich (Wolny i Żróbek, 2017) oraz problemów wykluczenia infrastrukturalnego, w tym transportowego (Jaroš, 2017).

7. Wskaźniki rozproszenia oparte na MDR mogą mieć zastosowanie w badaniach porównawczych, zwłaszcza osadnictwa wiejskiego, w którym dominuje zabudowa jednorodzinna i zagrodowa, a gęstość zaludnienia i rozmieszczenie zabudowań ma duże znaczenie przy podejmowaniu decyzji dotyczących rozwijania sieci infrastruktury technicznej, a także lokalizacji obiektów infrastruktury społecznej (Zabrowski, 2018). Wysokie wartości wskaźnika świadczą tutaj o dużej równomierności rozmieszczenia rozproszonego osadnictwa, a wartości niskie – o sytuacji odwrotnej, tj. skupionych wsiach, bez nadmiernej liczby odosobnionych zabudowań.
8. Zaproponowane wskaźniki mogą być pomocne w studiach nad genezą i ewolucją osadnictwa, pozwalając zidentyfikować obszary o mniej lub bardziej oddalonych od siebie zabudowie i tym samym wskazywać na rolę zabudowy samotniczej, przysiółków, kolonii itd.
9. Metoda grafowa sprawdza się dobrze szczególnie przy analizie dużych i różnorodnych zbiorów danych punktowych i powiązań przestrzennych między nimi. Grafy są stosowane od lat w geografii osadnictwa zarówno do analizy morfologii pojedynczych jednostek osadniczych, jak i całych sieci i systemów jednostek. Obliczenie MDR dla punktów adresowych, reprezentujących budynki, wpisuje się w coraz istotniejszy nurt badań odnoszących się do dużych zbiorów danych (*big data analysis*).
10. Uzupełniające wykorzystanie proponowanej metody może także objąć wyznaczenie grafów dla zbioru gmin, w celu wykazania najkrótszych połączeń przekraczających granice administracyjne, uwzględniających międzygminne układy sieci osadniczej. Ma to uzasadnienie o tyle, że obsługa infrastrukturalna może być prowadzona w ramach porozumień międzygminnych. Walorem wyznaczenia grafów niezależnie dla poszczególnych gmin jest jednak możliwość przedstawienia przestrzennego zróżnicowania rozwinięcia MDR w tym układzie jednostek.

---

Artykuł opracowano w związku z realizacją projektu badawczego pt. „Procesy rozpraszania zabudowy w aglomeracji warszawskiej po 1989 roku w różnych skalach przestrzennych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (nr 2014/15/N/HS4/01343).

## Piśmiennictwo

- Alonso-Villar O., 2011, *Measuring concentration: Lorenz curves and their decompositions*, The Annals of Regional Science, 47, 2, s. 451–475.
- Arbia G., Espa G., Giuliani D., 2015, *Analysis of spatial concentration and dispersion* [w:] C. Karlsson, M. Andersson, T. Norman (red.), *Handbook of Research Methods and Applications in Economic Geography*, Edward Elgar Publishing, s. 135–157.
- Assunção R.M., Neves M.C., Câmara G., Da Costa Freitas C., 2006, *Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees*, International Journal of Geographical Information Science, 20, 7, s. 797–811.

- Batyk I.M., 2010, *Dziedzictwo kulturowe Warmii*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2, s. 34–43.
- Boots B., Getis A., 1988, *Point pattern analysis*, Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, series no. 07–001, Sage Publications.
- Borůvka O., 1926, *O jistém problému minimálním*, Práce Moravské přírodovědecké společnosti, 3, 3, s. 37–58.
- Broitman D., Czamanski D., 2012, *Cities in competition, characteristic time, and leapfrogging developers*, Environment and Planning B: Planning and Design, 39, 6, s. 1105–1118.
- Bunn A.G., Urban D.L., Keitt T.H., 2000, *Landscape connectivity: A conservation application of graph theory*, Journal of Environmental Management, 59, 4, s. 265–278.
- Chazelle B., 2000, *A minimum spanning tree algorithm with inverse-Ackermann type complexity*, Journal of the Association for Computing Machinery, 47, 6, s. 1028–1047.
- Chilczuk M., 1975, *Osadnictwo wiejskie. Metody badań koncentracji zabudowy i kształtów wsi*, PWN, Warszawa.
- Choquet G., 1938, *Étude de certains réseaux de routes*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 206, s. 310–313.
- Clark P.J., Evans F.C., 1954, *Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in population*, Ecology, 35, 4, s. 445–453.
- Dijkstra E. W., 1959, *A note on two problems in connexion with graphs*, Numerische Mathematik, 1, 1, s. 269–271.
- Domański R., 1970, *Syntetyczna charakterystyka obszaru na przykładzie Okręgu Przemysłowego Kolin-Łęczyca-Inowrocław*, Komitet i Zakład Badań Rejonów Uprzemysławianych, PWN, Warszawa.
- Domański B., Guzik R., Gwosdz K., Micek G., 2010, *Rozwój i struktura regionu w perspektywie długiego trwania – przypadek Małopolski*, [w:] A. Kukliński, K. Pawłowski, J. Woźniak (red.), *Polonia quo vadis? Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego*, Kraków, s. 181–211.
- Duczowska-Kądział A., Duda J., Wasilewski M., 2013, *Application of the minimum spanning tree (MST) approach to searching for an optimum location of biomass storage*, Chemik, 67, 10, s. 935–944.
- Florek K., Łukaszewicz J. Perkal J., Steinhaus H., Zubrzycki S., 1951, *Taksonomia wrocławska*, Przegląd Antropologiczny, 17, s. 193–211.
- Gibas P., Heffner K., 2018, *Społeczne i ekonomiczne koszty bezładu przestrzeni – osadnictwo obszarów wiejskich*, [w:] A. Kowalewski, T. Markowski, P. Śleszyński (red.), *Koszty chaosu przestrzennego*, Studia KPZK PAN, 182, 2, Warszawa, s. 163–195.
- Gieysztor A., Samsonowicz H. (red.), 1994, *Dzieje Mazowsza do 1526 roku*, PWN, Warszawa.
- Gini C., 1912, *Variabilità e mutabilità*, Studi economico-giuridici pubblicati per cura della Facoltà di Giurisprudenza della Regia Università di Cagliari, 3, 2, s. 211–382.
- Golachowski S., Kostrubiec B., Zagożdżon A., 1974, *Metody badań geograficzno-osadniczych*, PWN, Warszawa.
- Graham R.L., Hell P., 1985, *On the history of the minimum spanning tree problem*, Annals of the History of Computing, 7, 1, s. 43–57.
- Jarník V., 1930, *O jistém problému minimálním (z dopisu panu O. Borůvkovi)*, Práce moravské přírodovědecké společnosti, 6, 4, s. 57–63.
- Jaroš V., 2017, *Social and transport exclusion*, Geographia Polonica, 90, 3, s. 247–263.
- Jażdżewska I., 2008, *Przemiany miejskiej sieci osadniczej w Polsce w świetle metod matematycznych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.



- Jażdżewska I., 2018, *The use of centographic measures in analysing the dispersion of historic factories, villas and palaces in Łódź (Poland)*, *Folia Geographica*, 60, 1, s. 50–61.
- Kansky K., 1963, *Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics*, Research Paper, 84, Department of Geography, University of Michigan, Michigan.
- Karger D., Klein P., Tarjan R., 1995, *A randomized linear-time algorithm to find minimum spanning trees*, *Journal of the ACM*, 42, 2, s. 321–328.
- Kostrubiec B., 1972, *Analiza zjawisk koncentracji w sieci osadniczej – problemy metodyczne*, *Prace Geograficzne*, 93, Instytut Geografii PAN, Warszawa.
- Koter M., 1980, *Kształtowanie się strefy podmiejskiej w świetle badań historyczno-geograficznych*, [w:] *Pojęcia i metody badań strefy podmiejskiej. Materiały XIII Łódzkiej Konferencji Naukowej 19–20 I 1980*, Wydawnictwo UŁ, Łódź, s. 1–17.
- Kowalewski A., Markowski T., Śleszyński P. (red.), 2018, *Studia nad chaosem przestrzennym*, *Studia KPZK PAN*, 182, 1–3, Warszawa.
- Kruskal J.B., 1956, *On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem*, *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7, s. 48–50.
- Liepelt S., Mayland-Quellhorst E., Lahme M., Ziegenhagen B., 2010, *Contrasting geographical patterns of ancient and modern genetic lineages in Mediterranean Abies species*, *Plant Systematics and Evolution*, 284, 3–4, s. 141–151.
- Liszewski S., Wolaniuk A., 1998, *Centra miast polskich w okresie transformacji (przykład Łodzi)*, [w:] T. Markowski, T. Marszał (red.), *Gospodarka przestrzenna miast polskich w okresie transformacji*, *Biuletyn KPZK PAN*, 182, s. 129–151.
- Mackaness W.A., Beard K.M., 1993, *Use of Graph Theory to Support Map Generalization*, *Cartography and Geographic Information Systems*, 20, 4, s. 210–221.
- Miedwiedkow J.V., 1966, *Regularnaja komponenta w sięciach rassieleniija izobrazennykh nakartie*, *Izwestia AN SSSR, Seria Geograficzeskaja*, 4, s. 110–122.
- Miszewska B., 1976, *Morfologia sieci osadniczej jako układu linii*, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 302, *Studia Geograficzne*, 22, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa-Wrocław.
- Nystuen J.D., Dacey M.F., 1968, *A graph theory interpretation of nodal regions*, *Geographia Polonica*, 15, s. 135–152.
- Owsiński J.W., Śleszyński P., 2016, *Modelling of the social, economic and spatial transformations in the Province of Masovia*, *Geographia Polonica*, 89, 2, s. 251–257.
- Parysek J.J., 1985, *Zróżnicowanie struktury społeczno-ekonomicznej głównych miast Jugosławii*, *Czasopismo Geograficzne*, z. 3–4, s. 327–341.
- Paulov J., Bezák A., 2017, *Constraints as factors reducing the entropy of distributions: an entropy-maximizing spatial interaction model as an example*, *Przegląd Geograficzny*, 89, 4, s. 517–533.
- Plit J., 1996, *Antropogeniczne i naturalne przeobrażenia krajobrazów roślinnych Mazowsza (od schyłku XVIII w. do 1990 r.)*, *Prace Geograficzne*, 166, IGIPIZ PAN, Warszawa.
- Pomianowski W., 2018, *Wpływ struktury sieci transportowej na dostępność przestrzenną. Dynamiczne ujęci grafowe*, IGIPIZ PAN, Warszawa (rozprawa doktorska).
- Potrykowski M., Taylor Z., 1982, *Geografia transportu. Zarys problemów, modeli i metod badawczych*, PWN, Warszawa.
- Prim R.C., 1957, *Shortest connection networks and some generalizations*, *Bell System Technical Journal*, 36, 6, s. 1389–1401.
- Ratajczak W., 1977, *Metody grafowe w geografii ekonomicznej* [w:] Z. Chojnicki (red.), *Metody ilościowe i modele w geografii*, PWN, Warszawa, s. 143–157.

- Ruegg K.C., Smith T.B., 2002, *Not as the crow flies: a historical explanation for circuitous migration in Swainson's thrush (Catharus ustulatus)*, Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences, 269, s. 1375–1381.
- Runge J., 1992, *Wybrane zagadnienia analizy przestrzennej w badaniach geograficznych*, Skrypty Uniwersytetu Śląskiego, 469, Uniwersytet Śląski, Katowice.
- Runge A., Runge J., 2008, *Słownik pojęć z geografii społeczno-ekonomicznej*, Videograf Edukacja.
- Shannon C.E., 1948, *A mathematical theory of communication*, Bell System Technical Journal, 27, s. 379–423, 623–656.
- Sollin G., 1965, *Le tracé de canalisation*, [w:] C. Berge, A. Ghouilla-Houri (red.), *Programming, Games, and Transportation Networks*, John Wiley & Sons, London.
- Solon J., Pomianowski W., 2014, *Program „GraphScape” – nowe narzędzie do analizy struktury przestrzennej i stopnia łączności w obrębie krajobrazu*, Problemy Ekologii Krajobrazu, 38, s. 15–32.
- Stępnik M., 2014, *Przekształcenia przestrzennego rozmieszczenia zasobów mieszkaniowych w Warszawie w latach 1945–2008*, Prace Geograficzne, 245, IGIPIZ PAN, Warszawa.
- Sudra P., 2016, *Zastosowanie wskaźników koncentracji przestrzennej w badaniu procesów urban sprawl*, Przegląd Geograficzny, 88, 2, s. 247–272.
- Sudra P., 2018, *Ewolucja kryteriów delimitacji wielkomiejskich układów osadniczych w Polsce*, Przegląd Geograficzny, 90, 2, s. 181–208.
- Sviatlovsky E., Eells W.C., 1937, *The centrophical method and regional analysis*, Geographical Review, 27, 2, s. 240–254.
- Szmytkie R., 2014, *Metody analizy morfologii i fizjonomii jednostek osadniczych*, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, 35, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Szulc H., 1995, *Morfogeneza osiedli wiejskich w Polsce*, Prace Geograficzne, 163, IGIPIZ PAN, Warszawa.
- Śleszyński P. (red.), 2013, *Wskaźniki zagospodarowania i ładu przestrzennego w gminach*, Biuletyn KPZK PAN, 252, Warszawa.
- Śleszyński P., 2014, *Transport- and settlement-related time efficiency of road journeys taken in Poland*, Geographia Polonica, 87, 1, s. 157–160.
- Śleszyński P., Bański J., Degórski M., Komornicki T., 2017, *Delimitation of problem areas in Poland*, Geographia Polonica, 90, 2, s. 131–138.
- Śleszyński P., Komornicki T., 2016, *Klasyfikacja funkcjonalna gmin Polski na potrzeby monitoringu planowania przestrzennego*, Przegląd Geograficzny, 88, 4, s. 469–488.
- Śleszyński P., Solon J., 2017, *A map of the landscape diversity of Poland*, Geographia Polonica, 90, 3, s. 369–377.
- Śleszyński P., Stępnik M., Mazurek D., 2018a, *Oszacowanie skutków presji inwestycyjnej i nadpodaży gruntów budowlanych w strefie podmiejskiej Warszawy na przykładzie gmin pasma zachodniego*, Przegląd Geograficzny, 90, 2, s. 209–240.
- Śleszyński P., Wiśniewski R., Szejgiec-Kolenda B., 2018b, *Demographic processes in Poland in the years 1946–2016 and their consequences for local development: Current state and research perspectives*, Geographia Polonica, 91, 3, s. 317–334.
- Thomas R.W., 1981, *Information Statistics in Geography*, Geo Abstracts, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom.
- Uhorczak F., 1932, *Z metodyki badań nad osadnictwem*, Czasopismo Geograficzne, 10, 1–3, s. 11–28.
- Verzosa L.C.O., Gonzalez R.M., 2010, *Remote sensing, geographic information systems and shannon's entropy: Measuring urban sprawl in a mountainous environment* [w:] W. Wagner, B. Székely (red.), ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, IAPRS, 38, 7A, Wiedeń, s. 269–274.

- Węclawowicz G., 1996, *Contemporary Poland. Space and society*, UCL Press, London.
- Wędzik A., 2014, *The optimization of cable layout design in wind farm internal networks*, *Acta Energetica*, 3, 20, s. 144–149.
- Wiśniewski R., Szejgiec-Kolenda B., Śleszyński P., 2016, *Population changes and population ageing in Poland between 1960 and 2011*, *Geographia Polonica*, 89, 2, s. 259–265.
- Wong D.W.S., 1999, *Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: Using centrophographic measures as examples*, *Geographic Information Sciences*, 5, 2, s. 163–174.
- Wolny A., Żróbek R., 2017, *The interdependence between suburban enclaves and the road network in the development process: a case study in Poland*, *Geographia Polonica*, 90, 2, s. 41–57.
- Yeh A.G.O., Li X., 2001, *Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy*, *Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 1, s. 83–90.
- Zaborowski T., 2018, *Land acquisition and land value capture instruments as determinants of public urban infrastructure provision: A comparison of the Polish legal framework with its German counterpart*, *Geographia Polonica*, 91, 3, s. 353–369.
- Zaborski B., 1926, *O kształtach wsi w Polsce i ich rozmieszczeniu*, *Prace Komisji Etnograficznej PAU*, 1, Kraków.
- Zagożdżon A., 1970, *Metody grafowe w badaniach osadnictwa, ze szczególnym uwzględnieniem morfologii siedlisk*, *Przegląd Geograficzny*, 42, 2, s. 335–334.
- Zagożdżon A., 1971, *Morfologia osiedli województwa opolskiego* [w:] S. Golachowski (red.), *Struktury i procesy osadnicze*, 2, Opole-Wrocław, Instytut Śląski, s. 321–372.
- Zagożdżon A., 1977, *Wykorzystanie metod i technik grafowych w analizie struktur przestrzennych* [w:] Z. Chojnicki (red.), *Metody ilościowe i modele w geografii*, PWN, Warszawa, s. 158–169.
- Zuziak Z.K., 1998, *Strategie rewitalizacji przestrzeni śródmiejskiej*, *Monografie*, 236, Politechnika Krakowska.

## Summary

Contemporary settlement systems observed in Poland bear numerous traces of historical transformations of rural settlements which took place in the 19th century, at the time of foreign partitioning of Polish territory, in different ways in particular regions. The result of processes occurring from the second half of the 20th century is the extensive development of urban areas, and – after 1990 – chaotic, spontaneous processes of transformation in suburban zones.

Research methods using graph theory have been applied for years in investigating settlement networks on various scales. One of the more useful graphs is the minimum spanning tree (MST), which connects all vertices in such a way that the sum of the distances between them is the shortest. This article presents the application of the minimum spanning tree (or shortest dendrite) method with a view to its suitability for determining the degree of dispersion and spatial cohesion of urbanised structures being assessed.

Two indicators have been proposed thanks to alignment of the shortest dendrite length to other variables. The settlement network effectiveness indicator is the ratio of MST length to the population in an area. This measure has a bearing on the economy, because it provides for an assessment of the unit costs of connecting the settlement network and buildings with communication networks and technical infrastructure, as well as their maintenance. The settlement network cohesion indicator is in turn the ratio

of the MST length to population density. It indicates the spatial concentration of buildings, in particular in relation to sparsely inhabited areas.

Mazowieckie voivodeship has been chosen as the research area, while address points obtained from the central official database collecting data from municipal records have been chosen as the source dataset. Over 1 million address points were considered, in line with their status as at the end of 2016. Minimum spanning trees were plotted for each of the 314 gminas (local-authority areas) making up the voivodeship, using *ArcGIS* software. Subsequently, the proposed indicators were calculated by reference to the MSTs. The results were then mapped.

The region emerges as characterised by a wide spread of values for indicators of the dispersion and cohesion of the settlement network. In non-urban categories of gmina, the differences between units with lowest and highest values of the index even vary across a tenfold range. This testifies to the extremely diversified development routes of the settlement in the region. In many places local layouts, conditioned historically by the dispersion of rural settlements in the formerly Russian–Partitioned area, have been imposed by the contemporary tendency to scatter and locate buildings and various types of activities in a disorderly fashion.

It appears that the region is characterized by a large spread of the indicators of the effectiveness and cohesion of the settlement network. In non-urban categories of communes, the differences between units with the lowest and highest values of the indicators are even tenfold. This testifies to the extremely diversified development routes of the settlement in the region. In many places the local layouts, historically conditioned by the dispersion of rural settlements in the former Russian Partition, have been imposed by the contemporary tendency to scatter and disorderly locate buildings and various types of activities.

The least-effective and least-cohesive settlement is associated with the northern and western part of the province, especially the Kurpie area, and the borderland between Mazovia and Podlasie. These are areas subject to depopulation and marginalised in terms of socio-economic development (problem areas). Analyses also indicate excessive dispersion of buildings in the suburban zones of cities, especially Warsaw. In general, the most cohesive settlement structure is in turn found in the largest cities and in some suburban areas, as well as in the central-southern part of the voivodeship (the region of high-productivity agriculture, mainly fruit-growing) and in the southern part historically forming part of Małopolska.

The proposed indicators may be helpful in studies on the origin of settlements, allowing areas with varying degrees of uniformity or isolation of building locations to be indicated. They can be made use of in comparative studies, especially concerning rural settlements, in which single-family housing predominates, and hamlets and buildings standing in isolation are present. The effectiveness indicator can be used in the assessment of infrastructural coverage, i.a. in the context of the costs of spatial chaos and demographic capacity.