



Łagodzenie uciążliwości antropogenicznych przez roślinność: propozycja wskaźników dla skali miejscowej na przykładzie obiektów infrastruktury technicznej Warszawy

Mitigation of anthropogenic nuisances through vegetation: proposal of local-scale indicators on the example of technical infrastructure sites in Warsaw

Andrzej Affek  Edyta Regulska  Anna Kowalska  Jacek Wolski 
Jerzy Solon  Bożena Degórska  Marek Degórski 

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyńskiego PAN

ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

a.affek@twarda.pan.pl (autor korespondencyjny) • eregulska@twarda.pan.pl • aniak@twarda.pan.pl •

j.wolski@twarda.pan.pl • j.solon@twarda.pan.pl • pl.bodego@twarda.pan.pl • m.degor@twarda.pan.pl

Zarys treści. W artykule zaproponowaliśmy zestaw wskaźników służących do oceny zdolności roślinności do łagodzenia uciążliwości pochodzenia antropogenicznego w skali lokalnej, odpowiadającej poziomowi planowania miejscowego. Opracowana nowatorska metodyka łączy wskaźnik ogólny – średni indeks liściowy (LAI) w buforze 60 m wokół obiektu – z trzema wskaźnikami szczegółowymi, obliczonymi na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego (ALS): (1) średnią objętością roślinności na jednostkę powierzchni bufora, (2) średnią maksymalną wysokością roślinności w poszczególnych segmentach bufora, uśrednioną dla całego bufora oraz (3) udziałem długości bufora przekraczającym określone progi wysokości (1, 2, 5, 10 m). Wskaźniki przetestowaliśmy na dwóch obiektach infrastruktury technicznej Warszawy – oczyszczalni ścieków Czajka i elektrociepłowni Żerań. Wyniki wskazują na wyższy potencjał buforowy roślinności wokół „Czajki” (średni LAI w buforze: 1,79 latem i 0,30 zimą; średnia objętość roślinności: 4,06 m³·m⁻²; średnia wysokość: 17,62 m) niż wokół „Żerania” (odpowiednio: 1,28; 0,23; 1,70 m³·m⁻²; 11,55 m). Proponowane wskaźniki umożliwiają porównawczą ocenę efektywności zielonych buforów, identyfikację odcinków o niedostatecznym przesłanianiu oraz określenie minimalnych wymogów dla zieleni o funkcji przesłaniania w planach ogólnych. Wskazaliśmy ograniczenia metody oraz możliwości kalibracji wskaźników w odniesieniu do pomiarów hałasu, odorów i widoczności. Zaproponowany zestaw wskaźników BUFOR1-BUFOR2 stanowi operacyjne narzędzie wykorzystujące powszechnie dostępne dane, przeznaczone do wspierania planowania zielonej infrastruktury w miastach.

Słowa kluczowe: zielona infrastruktura, usługi ekosystemowe, bufor roślinny, LAI, ALS/LiDAR, hałas, odory, Warszawa.

Keywords: green infrastructure, ecosystem services, vegetative environmental buffer, LAI, ALS/LiDAR, noise, odor, Warsaw.

Wstęp

W szybko urbanizującym się świecie miasta stały się głównymi ośrodkami presji antropogenicznej, skupiając zarówno źródła potencjalnych uciążliwości (hałas, odory, nieatrakcyjne widoki), jak i ludność najbardziej narażoną na ich oddziaływanie. Dynamiczny rozwój przestrzenny, wzrost gęstości zaludnienia i intensyfikacja transportu zwiększają ekspozycję

mieszkańców ośrodków miejskich na negatywne bodźce środowiskowe, wpływając na ich dobrostan i jakość życia (Bolund i Hunhammar, 1999; Degórska, 2017, Affek et al., 2023a). W literaturze podkreśla się, że dalsze rozszerzanie zabudowy miejskiej oraz wzrost mobilności będą prowadzić do narastania presji na ekosystemy miejskie, a tym samym do zwiększenia zapotrzebowania na usługi regulacyjne, w tym te, które łagodzą skutki działalności człowieka (Depietri et al., 2012; Affek et al., 2023b). Urbanizacja stanowi zatem nie tylko wyzwanie dla zrównoważonego rozwoju, lecz także szansę na wdrażanie nowatorskich rozwiązań planistycznych i przyrodniczych służących poprawie jakości środowiska życia człowieka. Coraz większą rolę przypisuje się zielonej i błękitnej infrastrukturze, postrzeganej jako integralny element struktury miasta, zapewniający zarówno korzyści ekologiczne, jak i społeczne (Szumigała et al., 2021; Hossu et al., 2024). Inwestycje oparte na ekosystemach – tzw. *nature-based solutions* – wspierają adaptację do zmian klimatu, ograniczają skutki ekstremalnych zjawisk pogodowych, a równocześnie zwiększają atrakcyjność i komfort życia w mieście (Elmqvist et al., 2013, 2016; Zwierzchowska et al., 2019). Mimo to praktyka planistyczna wciąż dysponuje ograniczonym zestawem narzędzi ilościowych pozwalających ocenić, w jakim stopniu zieleń miejska przyczynia się do łagodzenia uciążliwości antropogenicznych, zwłaszcza w bezpośrednim sąsiedztwie infrastruktury technicznej. Potrzebne są wskaźniki oparte na wiarygodnych danych, dostosowane do skali lokalnej – poziomu planu ogólnego – i możliwe do rutynowego stosowania w zarządzaniu przestrzenią (Maes et al., 2016; Solon et al., 2017; Affek et al., 2020).

W ramach klasyfikacji CICES V5.1 (Haines-Young i Potschin, 2018) ograniczanie tych uciążliwości ujmowane jest w sekcji „Regulacja i utrzymanie” w grupie usług ekosystemowych określanej jako łagodzenie uciążliwości pochodzenia antropogenicznego, obejmującej trzy klasy świadczeń: redukcję zapachu, tłumienie hałasu oraz kształtowanie widoku. Wspólnym mianownikiem tych usług jest przesłonowa i filtracyjna rola roślinności, która separuje źródła oddziaływań od miejsc przebywania ludzi i modyfikuje percepcję bodźców (Tyndall i Colletti, 2007; Brush et al., 1979; Xu et al., 2022; Zhao et al., 2021). Liczne badania potwierdziły, że roślinność miejska – szczególnie w formie gęstych pasów drzew i krzewów – może skutecznie ograniczać negatywne oddziaływania infrastruktury technicznej poprzez tłumienie hałasu, redukcję odorów i przesłanianie nieatrakcyjnych widoków. Efekty te mają zarówno charakter fizyczny, jak i percepcyjny (Dzhambov i Dimitrova, 2014). Badania akustyczne wskazują, że wzrost gęstości i wysokości drzewostanu prowadzi do istotnej redukcji poziomu hałasu (Tyagi et al., 2013; Zhao et al., 2021; Xu et al., 2022). Drzewa o rozwiniętej koronie zapewniają większą powierzchnię pochłaniania i rozpraszania fal dźwiękowych (Fang i Ling, 2005), a wskaźniki struktury roślinności, takie jak indeks liściowy LAI czy miary oparte na danych LiDAR, silnie korelują z efektywnością akustyczną (Xu et al., 2022). Autorzy ci rekomendują także analizę zdolności buforowych roślinności w jednostkach o stałej powierzchni („kwadrantach”) oraz wykorzystywanie zestawów wskaźników zamiast pojedynczych miar, by uniknąć nadmiernych uproszczeń.

Z kolei badania nad redukcją odorów (Lin et al., 2007; Tyndall i Colletti, 2007; Parker et al., 2012) wykazały, że tzw. bufony roślinne (ang. *vegetative environmental buffers*) skutecznie obniżają koncentrację zapachów poprzez przechwytywanie cząstek stałych, lotnych związków organicznych i amoniaku oraz wzmacnianie pionowego mieszania powietrza. Eksperymenty terenowe wskazują, że odpowiednio zaprojektowane pasy zieleni mogą zredukować intensywność zapachu o 50% w obrębie bufora i o 60-70% w odległości kilkunastu metrów z wiatrem za nim (Parker et al., 2012). Bufory te pełnią również funkcję

psychologiczną – przesłonięcie źródła zapachu powoduje subiektywne obniżenie jego uciążliwości (Tyndall et al., 2007).

W odniesieniu do przesłaniania widoku, klasyczna praca Brusha et al. (1979) określiła szerokości pasów zieleni niezbędnych do pełnego zakrycia obiektów – od 10 m w przypadku gęstej warstwy krzewów i podszytu po 130 m w drzewostanach pozbawionych podszytu, w których jedynym elementem przesłaniania na wysokości 1,5 m są pnie drzew. W warunkach zimowych, przy braku liści i podszytu, wartości te rosną odpowiednio do 35-150 m. Z kolei zalecenia USDA (U.S. Department of Agriculture; Bentrup, 2008) dotyczące projektowania buforów roślinnych wskazują szerokości 6-30 m dla tłumienia hałasu, 10-100 m dla przesłaniania widoku i buforu złożone z gatunków iglastych o umiarkowanym zwarciu (50-65%) do redukcji odorów. Podkreśla się przy tym sezonową zmienność efektywności – zimą roślinność liściasta zapewnia nawet o 40% słabsze przesłanianie niż roślinność ziemieliżna, co ma istotne znaczenie przy projektowaniu pasów ochronnych.

Przytoczone przykłady wskazują, że skuteczność roślinności w łagodzeniu uciążliwości pochodzenia antropogenicznego zależy od kombinacji jej cech strukturalnych (gęstości, wysokości, składu gatunkowego) oraz od szerokości i ciągłości bufora względem źródła oddziaływań. W skali planowania miejscowego wciąż brakuje spójnego, powtarzalnego i opartego na powszechnie dostępnych danych zestawu wskaźników, który łączyłby trzy wymienione klasy usług w jedną „wiązkę świadczeń” (*bundle*) i umożliwił diagnozowanie, gdzie i w jaki sposób interwencje w zieleń mogą najbardziej ograniczyć negatywne oddziaływanie infrastruktury technicznej. Ze względu na fakt, że analiza pojedynczych usług ekosystemowych (ES) może prowadzić do odmiennych wyników, sugeruje się, że powinny być one rozpatrywane łącznie (Łowicki et al., 2025). Współczesne zasoby danych – satelitarne produkty LAI dla różnych pór roku oraz gęste lotnicze skanowanie laserowe (ALS/LiDAR) – dają możliwość budowy właśnie takich operacyjnych wskaźników.

Celem prezentowanych badań było opracowanie i przetestowanie w skali lokalnej zestawu wskaźników oceniających wykorzystanie roślinności do łagodzenia uciążliwości generowanych przez obiekty miejskiej infrastruktury technicznej, obejmujących następujące usługi: redukcję zapachu, tłumienie hałasu oraz kształtowanie widoku¹. Zaproponowaliśmy podejście dwutorowe: (1) wskaźnik ogólny bazujący na średniej wartości LAI w buforze o stałej szerokości wokół obiektu (z rozróżnieniem sezonu letniego i zimowego), oraz (2) trzy wskaźniki szczegółowe bazujące na danych ALS – obejmujące: objętość roślinności na m² bufora, maksymalną wysokość roślinności w poszczególnych segmentach bufora, uśrednioną dla całego bufora oraz łączny udział jednostkowych długości bufora przekraczających progi wysokości (1, 2, 5, 10 m). Postawiliśmy następujące pytania badawcze: (1) czy zaproponowany zestaw wskaźników umożliwi porównawczą ocenę zdolności buforowej roślinności przy różnych obiektach infrastruktury? (2) czy prezentowane wskaźniki są wystarczająco czytelne i operacyjne, by wspierać zapisy planistyczne (określenie minimalnych standardów i identyfikację odcinków o słabej skuteczności przesłaniania)? (3) jakie są ograniczenia zastosowanych danych oraz implikacje związane z ich wykorzystaniem w projektowaniu zielonej infrastruktury (m.in. sezonowość, dobór gatunków, wymagane szerokości i wysokości pasów zieleni)?

Zaproponowane rozwiązania metodyczne testujemy na dwóch warszawskich obiektach reprezentujących infrastrukturę techniczną – oczyszczalni ścieków Czajka

¹ Pierwszą wersję tego zestawu wskaźników zaprezentowaliśmy w raporcie technicznym na potrzeby projektu ECOSERV-POL (Degórski et al., 2022).

i elektrociepłowni Żerań. Obiekty te generują typowe dla dużych miast uciążliwości i sąsiadują z obszarami regularnie użytkowanymi przez mieszkańców, co uzasadnia ich wybór do oceny praktycznej przydatności opisanych wskaźników. W dalszych częściach przedstawiamy ramy teoretyczne, materiały i metody, wyniki analiz oraz implikacje dla planowania miejscowego, w tym propozycje parametrów minimalnych zielonych buforów przy infrastrukturze technicznej.

Teren badań

Badania przeprowadziliśmy na dwóch obiektach infrastruktury technicznej zlokalizowanych w północno-wschodniej części Warszawy, w dzielnicy Białołęka: oczyszczalni ścieków Czajka oraz elektrociepłowni Żerań. Oba obiekty stanowią istotne źródła uciążliwości dla mieszkańców – głównie zapachowych, akustycznych i wizualnych – oraz sąsiadują z terenami mieszkaniowymi i rekreacyjnymi.

Oczyszczalnię ścieków Czajka (52,7 ha) z trzech stron otacza zwarty kompleks leśny, a od strony południowo-wschodniej występują użytki zielone i nieużytki (ryc. 1).



Ryc. 1. Oczyszczalnia ścieków Czajka: A – widok z góry (Esri Maps – ortofoto), B-C – widok z ziemi (fot. A. Affek) “Czajka” wastewater treatment plant: A – aerial view (Esri Maps – orthophoto), B-C – ground view (photo: A. Affek)

Zewnętrzny pas roślinności składa się głównie z drzew liściastych i krzewów w postaci nieciągłych szpalerów, natomiast sam obiekt tworzy typowa zabudowa techniczna z wysokim udziałem powierzchni nieprzepuszczalnych oraz znikomym powierzchni zadrzewionych. Zakład przyjmuje ścieki z większości prawobrzeżnych i północnych lewobrzeżnych dzielnic Warszawy oraz kilku okolicznych gmin. Obiekt po modernizacji w 2012 r. wyposażony został w system hermetyzacji i chemicznej neutralizacji powietrza, jednak w jego otoczeniu nadal rejestrowane są umiarkowane uciążliwości zapachowe (Piotrowski, 2024; TuBiałołęka.pl, 2023).

Elektrociepłownia Żerań zlokalizowana jest ok. 8 km na południe od oczyszczalni, pomiędzy ulicą Modlińską a wałem przeciwpowodziowym doliny Wisły (ryc. 2). To druga pod względem wytwarzanej mocy elektrociepłownia w Warszawie (moc cieplna 1580 MWt, elektryczna 386 MWe) uruchomiona została w 1954 r. Teren zakładu ma charakter silnie uprzemysłowiony, z minimalnym udziałem roślinności – powierzchnia koron drzew stanowi ok. 2-3% powierzchni działki. Od zachodu elektrociepłownia sąsiaduje z terenami przemysłowymi, od wschodu z zabudową usługową i mieszkalną. Od południowego zachodu graniczy z doliną Wisły, która jest jednym z korytarzy napowietrzających centrum Warszawy. Brak roślinności, która przesłoniłaby nieatrakcyjną zabudowę infrastruktury



Ryc. 2. Elektrociepłownia Żerań: A – widok z góry (Esri Maps – ortofoto), B-C – widok z ziemi – ze ścieżki pieszo-rowerowej (fot. A. Affek, J. Wolski)
“Żerań” Power Plant: A – aerial view (Esri Maps – orthophoto), B-C – ground-level views – from pedestrian and bicycle path (photos by A. Affek and J. Wolski)

technicznej jest najbardziej problematyczny w miejscach, w których elektrociepłownia sąsiaduje bezpośrednio ze szlakami komunikacyjnymi dla pieszych i rowerzystów (ryc. 2B, C). Bufor roślinny pomógłby również w tłumieniu hałasu, który towarzyszy procesom technologicznym (Żyłowski, 2022).

Wyboru tych dwóch obiektów dokonaliśmy z uwagi na ich reprezentatywność dla infrastruktury generującej uciążliwości miejskie oraz zróżnicowany udział zieleni w ich otoczeniu. Kontrast między zwartym, leśnym otoczeniem oczyszczalni Czajka a silnie uszczelnionym i niemal pozbawionym roślinności terenem elektrociepłowni Żerań umożliwił ocenę, w jakim stopniu różnice w strukturze i zwarciu roślinności przekładają się na wartość proponowanych wskaźników.

Materiały i metody

Jednostka analizy i założenia przestrzenne

Analizy przeprowadziliśmy w buforze o szerokości 60 m wokół granic obiektów infrastruktury technicznej. Szerokość ta odpowiada maksymalnym odległościom rekomendowanym w badaniach przesłaniania obiektów (10-100 m; Brush et al., 1979) oraz średnim zasięgom buforów zapachowych zalecanych przez USDA (Bentrup, 2008). Takie założenie pozwala analizować zarówno roślinność zarządzaną w granicach obiektu, jak i w najbliższym otoczeniu przestrzeni publicznej lub prywatnej, przy jednoczesnym zachowaniu wymiarów przestrzennych możliwych do projektowania w ramach planów ogólnych. Oś bufora wyznaczała granica działki zajmowanej przez dany obiekt. W obrębie bufora wydzieliśmy segmenty – prostokątne jednostki o szerokości 5 m (wzdłuż granicy obiektu) i długości 60 m (prostopadle do granicy). Takie segmenty (o średniej powierzchni $\approx 300 \text{ m}^2$) umożliwiają analizę ciągłości roślinności wokół całego obiektu i identyfikację odcinków o niskiej skuteczności pod względem łagodzenia uciążliwości.

Wskaźniki obliczyliśmy dla każdego segmentu, a następnie uśredniliśmy dla całego bufora wokół obiektu. Do dalszych analiz włączyliśmy tylko segmenty o powierzchni zbliżonej do nominalnej (280-320 m^2), co minimalizowało błędy geometryczne wynikające z nieregularnego przebiegu granic.

Dane źródłowe

- 1. Warstwa obiektów infrastruktury technicznej** (granice terenów) – dane Biura Architektury i Planowania Przestrzennego m.st. Warszawy (BAiPP), rok 2022
- 2. Indeks liściowy (LAI, Leaf Area Index)** – produkt Copernicus Land Monitoring Service HR-VPP (EEA, 2022), rozdzielczość 10 m, w dwóch terminach: (a) szczyt sezonu wegetacyjnego (1 lipca 2022 r.), (b) okres bezlistny (13 marca 2022 r.). Dane HR-VPP (w tym indeks LAI) obejmują całą powierzchnię Polski i są udostępniane jako 10-dniowe trajektorie sezonowe oraz roczne produkty VPP od 2017 r.
- 3. Dane ALS (Airborne Laser Scanning)** – chmury punktów w formacie LAZ (GUGiK), pozyskane 3 kwietnia 2018 r., gęstość punktów 12 pkt·m⁻², klasyfikacja: grunt, roślinność niska/średnia/wysoka. Według skorowidzów GUGiK udostępnianych na geoportal.gov.pl, krajowe dane wysokościowe LiDAR obejmują obecnie niemal całą powierzchnię Polski, z wyjątkiem wąskiego pasa przy granicy z Białorusią, a dla

około dwóch trzecich kraju dostępne są co najmniej dwa terminy pomiarowe z lat 2011-2025. Ponieważ zasadniczym celem pozyskania tych danych jest szczegółowo odwzorowanie rzeźby terenu, pomiary wykonywane są zgodnie ze standardem przed rozwojem liści i wzrostem roślinności zielnej (ang. *leaf-off*).

Opracowanie danych ALS i modele wysokościowe

Na podstawie chmur punktów ALS w programie CloudCompare v2.12.4 utworzyliśmy:

- **Numeryczny Model Terenu (NMT)** – raster 0,5 m, interpolacja średniej wysokości punktów klasy „grunt”,
- **Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT)** – raster 0,5 m, interpolacja wartości maksymalnych wysokości punktów klasy grunt i wszystkich klas roślinnych.

Z wykorzystaniem algebry map obliczyliśmy model różnicowy:

$$H_{veg} = NMPT - NMT$$

gdzie H_{veg} oznacza względną wysokość roślinności (m). Dla każdego segmentu obliczyliśmy średnią \bar{H}_{veg} i maksymalną H_{max} wysokość roślinności przy użyciu narzędzia *Zonal Statistics as Table* (ArcGIS 10.1).

Definicje i wzory wskaźników

- Wskaźniki ogólne (BUFOR1)

W obliczeniach wykorzystaliśmy średni indeks liściowy (LAI) w obrębie bufora:

$$BUFOR1a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LAI_i^{(lato)}$$

$$BUFOR1b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LAI_i^{(zima)}$$

$$BUFOR1c = \frac{BUFOR1a + BUFOR1b}{2}$$

gdzie n – liczba pikseli LAI (10×10 m) w obrębie bufora. Jednostka: m²·m⁻². Wskaźnik BUFOR1a odzwierciedla potencjał roślinności w pełni sezonu wegetacyjnego, BUFOR1b – potencjał zimowy, BUFOR1c – średnioroczny potencjał do łagodzenia uciążliwości.

- Wskaźniki szczegółowe (BUFOR2)

Wskaźniki te wyliczyliśmy dla segmentów bufora na podstawie danych ALS.

(a) Średnia objętość roślinności na jednostkę powierzchni:

$$BUFOR2a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{H}_{veg,j}$$

Jednostka: m³·m⁻² (równoważna średniej wysokości roślinności w segmencie).

(b) Średnia maksymalna wysokość roślinności w segmentach:

$$BUFOR2b = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_{max,j}$$

Jednostka: m.

Wskaźnik określa, do jakiej wysokości obiekt jest przesłaniany, co ma znaczenie zwłaszcza dla obiektów wysokich.

(c) Udział długości bufora przekraczający określone progi wysokości:

$$BUFOR2c = 100 \times \frac{L(\bar{H}_{veg,j} \geq X)}{L_{buf}}$$

gdzie $X \in \{1, 2, 5, 10\}$ m, L_{buf} – całkowita długość bufora (m).

Wskaźnik opisuje strukturę pionową i ciągłość przesłony – im większy udział segmentów o dużej wysokości roślinności, tym większy potencjał do łagodzenia uciążliwości.

Progi wysokości $X = 1, 2, 5, 10$ m przyjęliśmy na podstawie analizy literatury (Fang i Ling, 2005; Bentrup, 2008; Xu et al., 2022) jako wartości reprezentujące typowe poziomy wysokości roślinności skutecznej w tłumieniu hałasu i przesłanianiu widoku. Zakres od 1 do 10 m obejmuje roślinność od niskiej krzewiastej po zwarte drzewostany o wysokości 10-20 m.

Analizy porównawcze i wizualizacja wyników

Wszystkie wskaźniki obliczyliśmy w środowisku GIS (ArcGIS 10.1, QGIS 3.30). Wartości BUFOR1-BUFOR2 zestawiliśmy dla dwóch obiektów („Czajka” i „Żerań”). Porównanie różnic między obiektami dla wskaźników segmentowych (BUFOR2a, BUFOR2b) wykonaliśmy testem nieparametrycznym Manna-Whitneya ($\alpha = 0,05$). Dla każdej pary wskaźników szczegółowych przedstawiliśmy:

Tabela 1. Badana usługa ekosystemowa w klasyfikacji CICES V5.1 oraz metadane opracowanych wskaźników
The investigated ecosystem service in CICES V5.1 and metadata of the proposed indicators

Element	Opis
Usługa ekosystemowa	Łagodzenie uciążliwości pochodzenia antropogenicznego (redukcja zapachu, tłumienie hałasu, kształtowanie widoku)
Sekcja / Dział / Grupa (CICES V5.1)	Regulacja i utrzymanie / Przekształcanie czynników wprowadzanych do ekosystemów / łagodzenie uciążliwości pochodzenia antropogenicznego
Klasy usług	2.1.2.1 Redukcja zapachu; 2.1.2.2 Tłumienie hałasu; 2.1.2.3 Kształtowanie widoku
Przedmiot pomiaru	Wykorzystanie roślinności do łagodzenia uciążliwości generowanych przez objekty miejskiej infrastruktury technicznej
Zestaw wskaźników	BUFOR1a-c: indeks liściowy LAI; BUFOR2a-c: objętość roślinności, wysokość maksymalna, udział progów wysokości,
Jednostka przestrzenna	Bufor 60 m wokół granic obiektu, segmenty 5 m × 60 m
Dane źródłowe	Copernicus HR-VPP (LAI, 10 m), dane ALS 12 pkt/m ² (GUGiK), granice obiektów (BAiPP Warszawa)
Poziom planowania	Lokalny (plan ogólny)

Źródło: opracowanie własne na podstawie EEA (2022), GUGiK, BAiPP Warszawa.

- rozkłady segmentowe (wykresy pudełkowe) (ryc. 5),
- mapy przestrzenne wartości w segmentach (do identyfikacji odcinków o niskiej skuteczności pod względem łagodzenia uciążliwości) (ryc. 4),
- syntetyczne wartości uśrednione w tabeli wynikowej (tab. 2).

Wyniki

Wszystkie obliczone wskaźniki – zarówno ogólne (LAI), jak i szczegółowe (ALS) – wskazały na wyraźnie większy potencjał buforowy roślinności w otoczeniu oczyszczalni (tab. 2).

- Wskaźniki ogólne (BUFOR1)

Średni indeks liściowy LAI w 60-metrowym buforze wokół oczyszczalni „Czajka” wyniósł $1,79 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ latem i $0,30 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ zimą, co odpowiada wartości uśrednionej $1,04 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (tab. 2, ryc. 3). W przypadku elektrociepłowni „Żerania” wartości te były niższe – odpowiednio $1,28$, $0,23$ i $0,76 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Różnice te świadczą o większej gęstości i powierzchni czynnej liści w otoczeniu „Czajki”, co przekłada się na lepsze właściwości przestronowe i filtracyjne. Sezonowy spadek LAI zimą wynosił ok. 83% dla „Czajki” i 82% dla „Żerania”, co wskazuje na dominację gatunków liściastych w strukturze roślinności.

- Wskaźniki szczegółowe (BUFOR2)

Średnia objętość roślinności w buforze (BUFOR2a) wyniosła $4,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ dla „Czajki” i $1,70 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ dla „Żerania” (tab. 2, ryc. 4). Oznacza to ponad dwukrotnie większą gęstość przestrzenną i zwarcie roślinności w otoczeniu oczyszczalni.

Tabela 2. Wartości wskaźników BUFOR1-BUFOR2 dla dwóch obiektów infrastruktury technicznej (Warszawa)
Values of indicators BUFOR1-BUFOR2 for two technical infrastructure sites in Warsaw

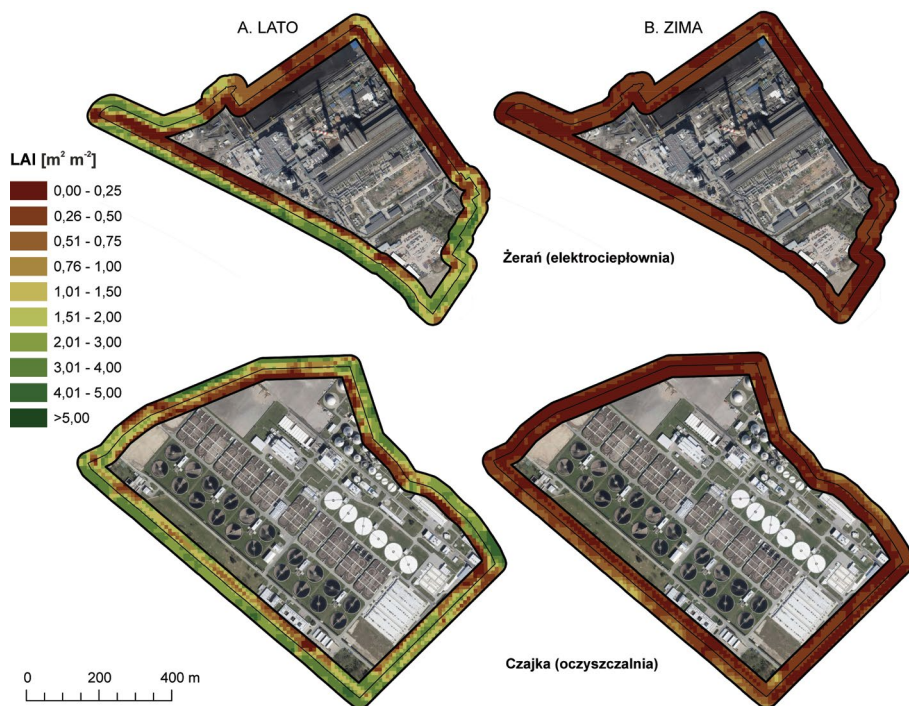
Wskaźnik	Jednostka	Czajka (oczyszczalnia)	Żerania (elektrociepłownia)
BUFOR1a – Średni indeks liściowy w buforze latem	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$	1,79	1,28
BUFOR1b – Średni indeks liściowy w buforze zimą	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$	0,30	0,23
BUFOR1c – Uśredniony z zimy i lata indeks liściowy	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$	1,04	0,76
BUFOR2a – Średnia objętość roślinności na m^2 bufora	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$	4,06	1,70
BUFOR2b – Średnia maksymalna wysokość roślinności z segmentów bufora	m	17,62	11,55
BUFOR 2c – % długości bufora z wysokością roślinności sięgającą:			
1 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$ (BUFOR2c1)	%	99,32	86,10
2 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$ (BUFOR2c2)	%	99,15	81,22
5 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$ (BUFOR2c5)	%	97,29	72,38
10 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$ (BUFOR2c10)	%	92,37	56,14

Średnia maksymalna wysokość roślinności (BUFOR2b) w segmentach bufora wokół „Czajki” wyniosła 17,62 m, natomiast wokół „Żerania” 11,55 m. Oznacza to, że jedynie w przypadku oczyszczalni wysokość drzew przekracza średnią wysokość większości obiektów technologicznych i zapewnia pełne przesłanianie w kierunku terenów zamieszkałych (tab. 2, ryc. 4).

Wskaźniki progowe (BUFOR2c) wskazują, że niemal cały obwód bufora wokół „Czajki” charakteryzuje się wysokością roślinności przekraczającą 1-5 m (97-99%), a ponad 92% długości bufora osiąga wartość powyżej 10 m (tab. 2). W przypadku „Żerania” odsetek ten spada do 56%, co wskazuje na liczne odcinki pozbawione wystarczającego zwarcia drzew lub krzewów. Największe luki występują w południowo-wschodniej i północno-wschodniej części bufora wokół elektrociepłowni, gdzie dominuje zabudowa techniczna i powierzchnie utwardzone.

- Analiza przestrzenna i zróżnicowanie segmentowe

Mapy rozkładu wskaźników szczegółowych (ryc. 4) pokazały wyraźne zróżnicowanie przestrzenne potencjału buforowego. W przypadku „Czajki” najwyższe wartości objętości



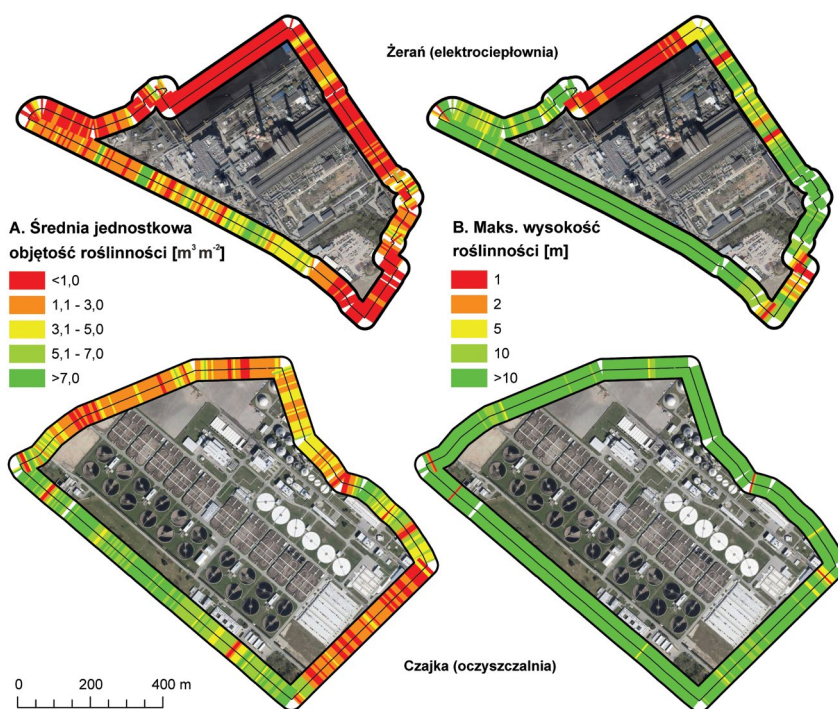
Ryc. 3. Wykorzystanie roślinności do łagodzenia uciążliwości generowanych przez dwa obiekty miejskiej infrastruktury technicznej (oczyszczalnię Czajka i elektrociepłownię Żerań) przedstawione za pomocą dwóch wskaźników ogólnych (BUFOR1a i BUFOR1b): wartości indeksu liściowego (LAI) w buforze wokół obiektów: (A) latem i (B) zimą. Źródło ortofotomapy: geoportal.gov.pl.

Use of vegetation to mitigate nuisances generated by two urban technical infrastructure sites (the “Czajka” wastewater treatment plant and the “Żerań” power plant) shown using two general indicators (BUFOR1a and BUFOR1b): Leaf Area Index (LAI) values within the buffer around the facilities: (A) in summer and (B) in winter. Source of orthophoto map: geoportal.gov.pl.

i wysokości roślinności koncentrują się od strony wschodniej i zachodniej, gdzie pasy leśne są najbardziej rozległe. Wokół „Żerań” jedynie krótkie odcinki od strony wschodniej (przy ul. Modlińskiej) wykazują wartości BUFOR2a powyżej $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$; większość buforu charakteryzuje się niską i rozproszoną roślinnością o wysokości poniżej 10 m.

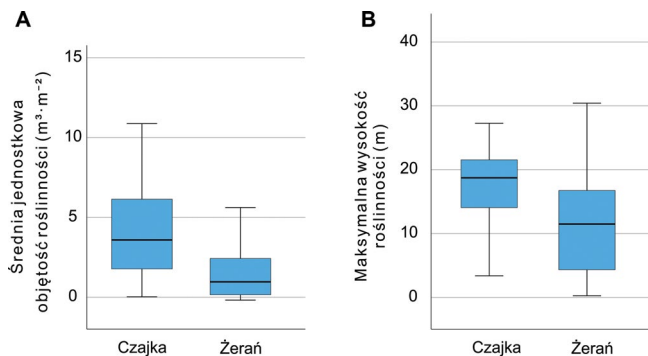
- Różnice statystyczne między obiektami

Test U Manna-Whitneya dla rozkładów wartości segmentowych (BUFOR2a i BUFOR2b) wykazał istotne różnice ($p < 0,001$) między obiektami, potwierdzając wyższy poziom wskaźników dla „Czajki” (tab. 3, ryc. 5). Rozstęp międzykwartyłowy BUFOR2a dla oczyszczalni wynosił $1,8\text{-}6,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, natomiast dla elektrociepłowni $0,2\text{-}2,4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, co wskazuje na znacznie większe zróżnicowanie i większą pojemność buforową roślinności w pierwszym przypadku.



Ryc. 4. Wykorzystanie roślinności do łagodzenia uciążliwości generowanych przez dwa obiekty miejskiej infrastruktury technicznej (oczyszczalnię Czajka i elektrociepłownię Żerań) przedstawione za pomocą dwóch wskaźników szczegółowych (BUFOR2a i BUFOR2b): (A) objętości roślinności oraz (B) maksymalnej wysokości roślinności, obu wyliczonych w poszczególnych pięciometrowych segmentach bufora wokół obiektów. Źródło ortofotomapy: geoportal.gov.pl.

Use of vegetation to mitigate nuisances generated by two urban technical infrastructure sites (the “Czajka” wastewater treatment plant and the “Żerań” power plant) shown using two detailed indicators (BUFOR2a and BUFOR2b): (a) vegetation volume and (b) maximum vegetation height, both calculated for individual 5-meter segments of the buffer around the facilities. Source of orthophoto map: geoportal.gov.pl. BUFOR1b): Leaf Area Index (LAI) values within the buffer around the facilities: (A) in summer and (B) in winter. Source of orthophoto map: geoportal.gov.pl.



Ryc. 5. Wykresy pudełkowe przedstawiające rozkład (A) średniej jednostkowej objętości roślinności ($m^3 \cdot m^{-2}$) [BUFOR2a] oraz (B) maksymalnej wysokości roślinności (m) [BUFOR2b] w buforach wokół elektrociepłowni Żerań i oczyszczalni Czajka. Podstawową jednostką przestrzenną jest segment o pow. $\sim 300 m^2$. Pudełka obejmują rozstęp międzykwartylowy (IQR), czyli zakres wartości pomiędzy pierwszym (Q1) a trzecim kwartylem (Q3). Linia wewnątrz pudełka oznacza medianę, a wąsy – minimalne i maksymalne wartości mieszczące się w odległości $1,5 \times IQR$ od kwartyli. N segmentów = 1148 (Czajka – 590, Żerań – 558).

Boxplots showing the distribution of (A) mean vegetation volume per unit area ($m^3 \cdot m^{-2}$) [BUFOR2a] and (B) maximum vegetation height (m) [BUFOR2b] within buffers around the “Żerań” power plant and the “Czajka” wastewater treatment plant. The basic spatial unit is a segment of approximately $300 m^2$. Boxes represent the interquartile range (IQR), that is the range between the first (Q1) and third quartile (Q3). The line inside the box indicates the median, and the whiskers represent the minimum and maximum values within $1.5 \times IQR$ from the quartiles. Number of segments: $N = 1,148$ (Czajka – 590, Żerań – 558).

Tabela 3. Podstawowe statystyki rozkładów segmentowych wskaźników szczegółowych (BUFOR2a, BUFOR2b) i wyniki testu U Manna-Whitneya

Basic statistics of segment-level indicators (BUFOR2a, BUFOR2b) and Mann-Whitney test results

Obiekt	Wskaźnik	Mediana	Q1	Q3	Min	Max	Test M-W	p
Czajka	BUFOR2a	3,59	1,77	6,14	0,02	13,34	89062,5	<0,001
Żerań	BUFOR2a	0,96	0,15	2,43	0,00	9,84		
Czajka	BUFOR2b	18,63	13,98	21,45	0,13	27,19	73622,0	<0,001
Żerań	BUFOR2b	11,35	4,18	16,62	0,10	30,27		

Dyskusja

Zaproponowany przez nas zestaw wskaźników umożliwia ilościową ocenę zdolności roślinności do łagodzenia uciążliwości antropogenicznych w skali lokalnej, odpowiadającej poziomowi planowania miejscowego. Metoda w sposób nowatorski integruje informacje o strukturze pionowej roślinności pozyskane z danych ALS z oceną jej aktywnej powierzchni fotosyntetycznej wynikającej z indeksu LAI, tworząc jeden spójny zestaw miar odnoszących się do trzech klas usług ekosystemowych: redukcji zapachu, tłumienia hałasu i kształtowania widoku. Takie połączenie pozwala nie tylko na ocenę skuteczności istniejącej zieleni buforowej, lecz także na identyfikację odcinków wymagających działań uzupełniających lub kompensacyjnych. Wyniki uzyskane dla dwóch obiektów infrastruktury technicznej w Warszawie – oczyszczalni Czajka i elektrociepłowni Żerań – potwierdzają zarówno przydatność wskaźników do analiz porównawczych, jak i ich praktyczną użyteczność, m.in.

przy formułowaniu minimalnych standardów zieleni buforowej w dokumentach planistycznych, planach adaptacji do zmian klimatu oraz decyzjach środowiskowych.

- Przydatność wskaźników jako proxy dla usług ekosystemowych

Wskaźniki wykorzystujące LAI pozwalają uchwycić cechy roślinności istotne dla tłumienia hałasu i przesłaniania widoku. Wartości BUFOR1a (lato) i BUFOR1b (zima) pozwalają określić zmienność sezonową funkcji przesłonowej, wskazując obniżenie zdolności buforowych zimą o około 80-85%. Zależność tę potwierdzają zarówno eksperymenty wskazujące na wzrost pozytywnej oceny wizualnej wraz ze zwiększeniem pokrycia roślinnością (Garrido Velarde et al., 2019), jak i badania terenowe wykazujące istotne różnice w tłumieniu hałasu pomiędzy sezonem bezlistnym a pełnym ulistnieniem (Tashakor i Chamani, 2021; Gaudon et al., 2022).

W kontekście redukcji odorów wskaźnik LAI może być traktowany jako pośrednia miara cech roślinności istotnych dla procesów filtracji i intensywności mieszania atmosferycznego. Choć w badaniach Tyndalla i Colletiego (2007) oraz Parkera et al. (2011) nie analizowano bezpośrednio tego wskaźnika, opisane przez autorów mechanizmy redukcji odorów – filtracja cząstek i zwiększone mieszanie powietrza – są ściśle powiązane z gęstością i strukturą roślinności, które LAI pośrednio odzwierciedla. Zaproponowane przez nas wskaźniki szczegółowe, zwłaszcza BUFOR2a i BUFOR2b, uzupełniają tę charakterystykę, dostarczając informacji o pionowej strukturze i wysokości roślinności – parametrach wielokrotnie wskazywanych jako istotne dla efektywności akustycznej (Fang i Ling, 2005; van Renterghem, 2019; Xu et al., 2022). Dzięki temu nasz zestaw wskaźników pozostaje spójny z dotychczasowymi badaniami nad rolą zieleni w łagodzeniu uciążliwości środowiskowych, jednocześnie oferując narzędzie umożliwiające ilościową ocenę przestrzenną w kontekście planowania miejscowego i projektowania zieleni buforowej. Warto jednak podkreślić, że zastosowane metryki opisują potencjał buforowy roślinności, a nie aktualny poziom redukcji uciążliwości – w pracy nie prowadzono bowiem bezpośrednich pomiarów hałasu, odorów ani percepcji wizualnej. Z tego względu proponowane miary są bardziej uniwersalne, niezależne od natężenia uciążliwości ich wysokiej zmienności w czasie, a przez to odpowiednie do porównań i planowania przestrzennego. Dostarczają pośredniej charakterystyki struktury roślinności, która – zgodnie z dotychczasowymi badaniami – jest ściśle powiązana z efektywnością świadczenia analizowanych usług ekosystemowych.

- Znaczenie sezonowości i struktury roślinności

Porównanie wskaźników letnich i zimowych (BUFOR1a i BUFOR1b) wskazuje, że skuteczność buforów roślinnych jest silnie uzależniona od fenologii roślin (Gaudon et al., 2022). Bufory z dominacją gatunków liściastych wykazują znaczne obniżenie efektywności zimą, co potwierdza zasadność wprowadzania gatunków zimozielonych (iglaste, krzewy liściaste półzimozielone) w odcinkach najbardziej narażonych na emisję hałasu czy nieprzyjemnych zapachów (Bentrup, 2008).

Wiele badań podkreśla również większą efektywność (także latem) gatunków iglastych w pochłanianiu zanieczyszczeń gazowych i pyłowych, ściśle związanych z odorami, co wynika z morfologii i struktury powierzchniowej igieł (Barnes et al., 2007; Tyndall i Colletti, 2007). W przypadku gatunków liściastych efektywność pochłaniania zależy nie tylko od biomasy ulistnienia i architektury drzewa, lecz także od morfologii liści (szorstkość powierzchni, wielkość i położenie aparatów szparkowych, owłosienie, pokrywa woskowa)

(Nowak et al. 2006). W konsekwencji różna jest także odporność – a więc także i śmiertelność – poszczególnych gatunków drzew na zanieczyszczenia gazowe i pyłowe powiązane z odorami (Zhang et al., 2016). Zależności te powinny być brane przy ocenach szczegółowych w skali miejscowej, a następnie na etapie planowania odpowiednich nasadzeń. Oprócz składu gatunkowego istotne znaczenie mają również parametry strukturalne buforów. Zwarcie i wysokość roślinności, mierzone wskaźnikami BUFOR2a i BUFOR2b, są kluczowe dla pełnego przesłaniania obiektów o większej kubaturze.

- Przydatność planistyczna

Opracowane przez nas wskaźniki są przystosowane do integracji z systemami informacji przestrzennej i mogą być bezpośrednio wykorzystane w procedurach planistycznych. Pozwalają one na:

- identyfikację kierunków i odcinków o niedostatecznym udziale zieleni buforowej,
- formułowanie standardów minimalnych (np. średnia objętość roślinności $\geq 3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, udział segmentów z wysokością $\geq 5 \text{ m} > 70\%$),
- monitorowanie zmian w czasie na podstawie danych ogólnodostępnych (Copernicus, GUGIK).

Wskaźniki te mogą także stanowić wsparcie w ocenie oddziaływania inwestycji na środowisko oraz w programach adaptacji do zmiany klimatu poprzez wskazanie lokalnych deficytów zieleni funkcjonalnej.

- Porównanie z zaleceniami literaturowymi

Wysokie wartości BUFOR2a i BUFOR2b dla oczyszczalni Czajka (średnia objętość $4,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, wysokość 17,62 m) mieszczą się w przedziałach uznawanych za skuteczne ekrany roślinne (10-20 m wysokości, 50-65% zwarcia – Bentrup, 2008). Różnice między „Czajką” a „Żeraniem” potwierdzają, że gęstość i ciągłość pasów zieleni stanowią główny czynnik ograniczający skuteczność przesłonową.

- Uwagi metodyczne

Jako wskaźnik ogólny przyjęliśmy uśrednioną z całej powierzchni bufora wartość indeksu liściowego LAI, czyli stosunku powierzchni liści do powierzchni gruntu. Przyjęliśmy bowiem, że im większa jest powierzchnia liści na m^2 gruntu w buforze, tym większa jest rola obecnej w buforze roślinności w zakresie tłumienia hałasu, redukcji odorów oraz kształtowania widoku (przesłaniania) (Xu et al., 2022). Należy jednak mieć na uwadze, że indeks liściowy uwzględnia jedynie powierzchnię fotosyntetycznie czynną roślin, czyli zieloną (liście, igły, łodygi), więc jako wskaźnik przesłaniania nie oddaje roli przesłonowej pozostałych części roślin (pni drzew, zdrewniałych łodyg, kwiatów) (Ow i Ghosh, 2017). Z tego względu wartości wskaźnika BUFOR1b mogą niedoszacowywać zdolności roślinności do łagodzenia uciążliwości, w szczególności w zestawieniu ze wskaźnikiem BUFOR1a dla pełni sezonu wegetacyjnego. Nasze badania nie uwzględniały także efektywności przesłaniania związanej ze zróżnicowaniem gatunkowym struktury liści i innych części roślin. Literatura bowiem pokazuje wyraźne różnice między grupami gatunków – zwłaszcza pomiędzy drzewami iglastymi i liściastymi oraz między gatunkami o różnej teksturze liści i chropowatości kory (Sultan et al., 2024; Sun et al., 2025).

Zastosowana metoda obliczania objętości roślinności polegająca na wylczeniu prostej różnicy NMPT i NMT pozornie wydaje się przeszacowywać objętość, ponieważ nie

uwzględnić pełnej złożoności struktury pionowej roślinności, w tym pustych przestrzeni pod koronami drzew. Warto jednak zauważyć, że badania wskazują na systematyczne niedoszacowywanie wysokości roślinności otrzymanej z lotniczego skanowania laserowego (Estornell et al., 2012). Dlatego też przyjęliśmy założenie, że wpływ czynników odpowiedzialnych za przeszacowanie i niedoszacowanie objętości roślinności w przybliżeniu równoważy się i nie ma potrzeby korekty otrzymanych wartości w żadną stronę. Wydaje się, że do uzyskania pełniejszej informacji o objętości i gęstości roślinności z danych LiDAR można wykorzystać miary powiązane ze stopniem penetracji impulsu laserowego przez roślinność (np. stosunek punktów z klasy grunt do wszystkich punktów w jednostce powierzchni; Kissling et al., 2025), brakuje jednak jeszcze szacunków co do trafności takich wskaźników.

Do kompleksowego uchwycenia zmienności sezonowej zdolności przestronowych roślinności należałoby obliczyć wysokość i objętość roślinności także z danych LiDAR pozyskanych w pełni sezonu wegetacyjnego (ang. *leaf-on*), jednak dane takie są rzadko pozyskiwane, a w krajowym zasobie nie ma ich w ogóle. Niemniej, badania wskazują, że różnice w szacowanej wysokości roślinności między sezonem wegetacyjnym a okresem bezlistnym są często niewielkie i przeważnie nieistotne statystycznie (White et al., 2015; Davison et al., 2020).

- Transferowalność i możliwości rozszerzenia

Metodyka jest możliwa do powielenia i wykorzystania w innych miastach Polski i Europy, o ile dostępne są dane ALS. Może ona zostać rozszerzona o dodatkowe wskaźniki, takie jak: (1) sezonowa dynamika LAI (spadek między BUFOR1a i BUFOR1b), (2) kierunkowa ekspozycja segmentów względem dominujących wiatrów, (3) uzupełnienie o lokalne pomiary hałasu lub odorów oraz (4) analizę składu gatunkowego buforów roślinnych pod kątem zróżnicowania morfologicznego. Takie podejście umożliwiłoby stworzenie kompleksowego systemu monitorowania i modelowania potencjału roślinności w łagodzeniu uciążliwości w miastach.

Wnioski

1. Zaproponowany zestaw wskaźników BUFOR1-BUFOR2 umożliwia ilościową ocenę zdolności roślinności do łagodzenia uciążliwości antropogenicznych w skali planowania miejscowego.
2. Wskaźniki łączą dane satelitarne (LAI) i lotnicze (ALS), co zapewnia ich powtarzalność i możliwość aktualizacji w oparciu o ogólnodostępne źródła danych.
3. Test na dwóch obiektach warszawskich wykazał wyższy potencjał buforowy roślinności przy oczyszczalni Czajka niż przy elektrociepłowni Żerań, co odzwierciedla różnice w zwarcu i wysokości roślinności.
4. Wskaźniki progowe (BUFOR2c) są intuicyjne i mogą być bezpośrednio stosowane w zapisach planistycznych jako minimalne standardy zieleni buforowej.
5. Sezonowość LAI podkreśla znaczenie gatunków zimozielonych oraz utrzymania struktury wielowarstwowej dla zachowania funkcji buforowych zimą.

6. Pomimo ograniczeń danych (sezon pomiaru ALS, brak walidacji funkcjonalnej), metoda jest operacyjna i może stanowić podstawę krajowych standardów oceny zielonej infrastruktury.
7. Dalsze prace powinny objąć kalibrację wskaźników w odniesieniu do pomiarów terenowych hałasu, odorów i widoczności, co pozwoli na ustalenie progów efektywności buforów roślinnych dla różnych typów obiektów infrastruktury miejskiej.

Badania zostały przeprowadzone w ramach projektu „Usługi świadczone przez główne typy ekosystemów w Polsce – Podejście stosowane”. Projekt korzysta z dofinansowania otrzymanego od Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach funduszy EOG 2014-2021 o wartości 6 454 526 zł oraz dofinansowania budżetu państwa o wartości 1 139 034 zł. Celami Projektu są przeniesienie wiedzy naukowej na temat usług ekosystemowych istniejącej w Europie do procesu rozpoznania i oceny usług ekosystemowych w Polsce, zwiększenie potencjału naukowego oraz zdolności administracji i zainteresowanych grup społecznych do wdrażania tego podejścia w zarządzaniu środowiskiem.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Affek, A., Kowalska, A., Regulska, E., Solon, J., Degórska, B., Wolski, J., & Degórski, M. (2023a). Mapowanie i ocena usług ekosystemów miejskich w skali ogólnopolskiej. *Przegląd Geograficzny*, 95(2), 163-186. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.2.3>
- Affek, A., Wolski, J., Degórska, B., Solon, J., Kowalska, A., Regulska, E., & Degórski, M. (2023b). Usługi ekosystemów miejskich (zurbanizowanych). W: M. Stępniewska, & A. Mizgajski (red.), *Usługi ekosystemowe w zarządzaniu układami przyrodniczymi* (s. 65-84). Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe. <https://doi.org/10.12657/9788379864690-04>
- Affek, A.N., Degórski, M., Wolski, J., Solon, J., Kowalska, A., Roo-Zielińska, E., Grabińska, B., & Kruczkowska, B. (2020). *Ecosystem service potentials and their indicators in postglacial landscapes: Assessment and mapping*. Amsterdam-Oxford-Cambridge: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04088-0>
- Barnes, J., Davison, A., Balaguer, L., & Manrique-Reol, E. (2007). Resistance to Air Pollutants: From Cell to Community. W: F. Pugnaire & F. Valladares (red.), *Functional Plant Ecology* (s. 601-626). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420007626-20>
- Bentrop, G., (2008). Conservation buffers: design guidelines for buffers, corridors, and greenways. Ashville, NC. Gen. Tech. Rep.SRS-109. Asheville, NC: Department of Agriculture, ForestService, Southern Research Station. <https://doi.org/10.2737/SRS-GTR-109>
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29, 293-301. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(99)00013-0)
- Brush, R.O., Williamson, D.N., & Fabos, J.Gy. (1979). Visual screening potential of forest vegetation. *Urban Ecology*, 4(3), 207-216. [https://doi.org/10.1016/0304-4009\(79\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0304-4009(79)90002-0)

- Davison, S., Donoghue, D.N.M., & Galitsatos, N. et al. (2020). The effect of leaf-on and leaf-off forest canopy conditions on LiDAR-derived estimations of forest structural diversity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102160. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102160>
- Degórska, B. (2017). Urbanizacja przestrzenna terenów wiejskich na obszarze metropolitalnym Warszawy: kontekst ekologiczno-krajobrazowy. *Prace Geograficzne IGI PZ PAN*, 262, Warszawa.
- Degórski, M., Affek, A., Degórska, B., Kowalska, A., Regulska, E., Wolski, J., & Solon, J. (2022). Identyfikacja znaczących interakcji między usługami ekosystemowymi oraz istotnych zestawów usług na przykładzie podtypów ekosystemów miejskich Warszawy. Pobrane z: https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGIK/projekty/ecoserv/Raport_5.pdf (12.08.2025).
- Depietri, Y., Renaud, F.G., & Kallis, G. (2012). Heat waves and floods in urban areas: A policy-oriented review of ecosystem services. *Sustainability Science*, 7, 95-107. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0142-4>
- Dzhambov, A.M., & Dimitrova, D.D. (2014). Urban green spaces' effectiveness as a psychological buffer for the negative health impact of noise pollution: a systematic review. *Noise Health*, 16(70), 157-65. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.134916>
- EEA. (2022). Copernicus Land Monitoring Service: High Resolution Vegetation Phenology and Productivity (HR-VPP), Daily Raw Vegetation Indices. User Manual, Issue 2.2, Copenhagen: European Environment Agency. Pobrane z: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/product-user-manual-of-vegetation-indices> (03.04.2025)
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., & Seto, K.C. (red.) (2013). *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities*. Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1>
- Elmqvist, T., Gómez-Baggethun, E., & Langemeyer, J. (2016). Ecosystem services provided by urban green infrastructure. W: R. Haines-Young, R. Fish, & R. Turner (red.), *Routledge Handbook of Ecosystem Services* (pp. 249-262). Abingdon: Routledge.
- Estornell, J., Ruiz, L.A., Velázquez-Martí, B., & Hermosilla, T. (2012). Estimation of biomass and volume of shrub vegetation using LiDAR and spectral data in a Mediterranean environment. *Biomass and Bioenergy*, 46, 710-721. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.023>
- Fang, C.F., & Ling, D.L. (2005). Guidance for noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 71, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.01.005>
- Garrido Velarde, J., Montero Parejo, M.J., Hernández Blanco, J., & García Moruno, L. (2019). Using Native Vegetation Screens to Lessen the Visual Impact of Rural Buildings in the Sierras de Béjar and Francia Biosphere Reserve: Case Studies and Public Survey. *Sustainability*, 11(9), 2595. <https://doi.org/10.3390/su11092595>
- Gaudon, J.M., McTavish, M.J., Hamberg, J., Cray, H.A., & Murphy, S.D. (2022). Noise attenuation varies by interactions of land cover and season in an urban/peri-urban landscape. *Urban ecosystems*, 25(3), 811-818. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01194-4>
- Haines-Young, R. & Potschin, M.B. (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. Pobrane z: www.cices.eu (01.02.2025).
- Hossu, C.-A., Breuste, J., Ioja, I.-C., Onose, D.A., Vrînceanu, A., Ponizy, L., Zwierzchowska, I., Kryger, R., & Mizgajski, A. (2024). The Use of Green Infrastructure in the Suburbs: Insights from Three European Cities. *Land*, 13(11), 1862. <https://doi.org/10.3390/land13111862>

- Kissling, D., Mulder, W., Wang, J., & Shi, Y. (2025). Data of vegetation structure metrics retrieved from airborne laser scanning surveys for European demonstration sites. *Data in Brief*, 60, 111548. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111548>
- Lin, X.J., Barrington, S., Nicell, J., & Choiniere, D. (2007). Effect of natural windbreaks on maximum odour dispersion distance (MODD). *Canadian Biosystems Engineering*, 49, 21-32.
- Łowicki, D., Fornal-Pieniak, B., & Schwerk, A. (2025). Urban greenery services for noise attenuation, pollutant filtration, and temperature lowering: Supply potential, demand, and budgets in Poznań, Poland. *Ecosystem Services*, 73, 101713. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101713>
- Maes, J., Zulian, G., Thijssen, M., Castell, C., Baró, F., Ferreira, A., et al. (2016). Mapping and assessment of ecosystems and their services: Urban ecosystems. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Pobrane z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC101639> (03.02.2025).
- Nowak, D.J., Crane, D.E., & Stevens, J.C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forest Urban Greening*, 4(3-4), 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>
- Ow, L.F., & Ghosh, S. (2017). Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied Acoustics*, 120, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.007>
- Parker, D.B., Malone, W., & Walter, D. (2012). Vegetative environmental buffers and exhaust fan deflectors for reducing downwind odor and VOCs from tunnel ventilated swine barns. *Transactions of the ASABE*, 55(1), 227-240. <https://doi.org/10.13031/2013.41250>
- Piotrowski, M. (2024). Koniec smrodu z „Czajki”? Ta inwestycja ma ograniczyć nieprzyjemny problem mieszkańców Białoleki. *Raport Warszawski*. Pobrane z: <https://www.raportwarszawski.pl/artukul/1479,koniec-smrodu-z-czajki-ta-inwestycja-ma-ograniczyc-nieprzyjemny-problem-mieszkanow-bialoleki> (27.11.2025).
- van Renterghem, T. (2019). Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.007>
- Solon, J., Roo-Zielińska, E., Affek, A., Kowalska, A., Kruczkowska, B., Wolski, J., Degórski, M., Grabińska, B., Kończowska, E., Regulska, E., & Zawiska, I. (2017). *Świadczenia ekosystemowe w krajobrazie młodogłacjalnym: ocena potencjału i wykorzystania*. Warszawa: Wydawnictwo Akademickie SEDNO i IGIPIZ PAN.
- Sultan, T., Shahid, S., Rasheed, J., Alsubai, S. (2024). Investigation of tree characteristics for traffic noise abatement. *Environ Prot Eng*, 50(1), 43-70. <https://doi.org/10.37190/epe240103>
- Sun, G., Ma, B., Li, X., Liao, J., Wei, L., Guo, X., Xu, C., Kong, X., Jin, G., & Jin, Y. (2025). Noise Was Obviously Reduced by Both Leaf Texture and Surface Roughness in Leaf Scale. *Plants*, 14(9), 1363. <https://doi.org/10.3390/plants14091363>
- Szumigała, P.P., Urbański, P., Tomczak, P., Walerzak, M., Sosnowska, S. & Szumigała, K.O. (2021). The idea of sustainable development in the landscape contemporary cities. *TEKA*, 3 Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych Oddział Polskiej Akademii Nauk w Lublinie.
- Tashakor, S., & Chamani, A. (2021). Temporal variability of noise pollution attenuation by vegetation in urban parks. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(18), 23143-23151. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12355-5>
- Tyagi, V., Kumar, K., & Jain, V.K. (2013). Road traffic noise attenuation by vegetation belts at some sites in the Tarai region of India. *Archives of Acoustics*, 38(3), 389-395. <https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0046>

- Tyndall, J.C., & Colletti, J.P. (2007). Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: A review. *Agroforestry Systems*, 69, 45-65. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9017-6>
- TuBiałołęka.pl (2023). Smród z Czajki jest nie do zniesienia. MPWiK wyjaśnia. Pobrane z: https://tustolica.pl/bialoleka-choszczowka-oczyszczalnia-sciekow-czajka-miejskie-przedsiębiorstwo-wo-dociagow-i-kanalizacji-smrod_90110 (27.11.2025).
- White, J.C., Wulder, M.A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Pitt, D., & Woods, M. (2015). Evaluating the impact of leaf-on and leaf-off airborne laser scanning data on the estimation of forest inventory attributes. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(11), 1498-1513. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0192>
- Xu, C., Han, B., Lu, F., & Wu, T. (2022). Assessing the traffic noise reduction effect of roadside green space using LiDAR point cloud data in Shenzhen, China. *Forests*, 13(5), 50765. <https://doi.org/10.3390/f13050765>
- Zhang, P., Liu, Y., Chen, X., Yang, Z., Zhu, M., & Li, Y. (2016). Pollution resistance assessment of existing landscape plants on Beijing streets based on air pollution tolerance index method. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 212-223, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.003>
- Zhao, N., Prieur, J.F., Liu, Y., Kneeshaw, D., Lapointe, E.M., Paquette, A., Zinszer, K., Dupras, J., Ville-neuve, P.J., Rainham, D.G., Lavigne, E., Chen, H., van den Bosch, M., Oiamo, T., & Smargiassi, A. (2021). Tree characteristics and environmental noise in complex urban settings – A case study from Montreal, Canada. *Environmental Research*, 202, 111887 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111887>
- Zwierzchowska, I., Fagiewicz, K., Poniży, L., Lupa, P., & Mizgajski, A. (2019). Introducing nature-based solutions into urban policy – facts and gaps. Case study of Poznań. *Land Use Policy*, 85, 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.025>
- Żyłowski, M., (2022). Hałas na Żeraniu zaniepokoił mieszkańców. PGNiG tłumaczy, skąd się bierze. wyborcza.pl. Pobrane z: <https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,28963983,glosne-halasy-na-zeraniu-pgnig-tlumaczy-z-czego-moga-wynikac.html> (27.11.2025).

Summary

In the context of rapid urbanization, cities have become major centers of anthropogenic pressures such as noise, odors, and unattractive views. Increasing exposure to these nuisances highlights the importance of green and blue infrastructure as well as nature-based solutions that act as environmental buffers and enhance residents' quality of life. The aim of this study was to develop a set of indicators enabling a quantitative assessment of vegetation's capacity to mitigate nuisances generated by technical infrastructure at the local spatial-planning scale. Two types of indicators were proposed: (1) a general indicator (BUFOR1) based on the mean Leaf Area Index (LAI) within a 60-m buffer (distinguishing between summer and winter seasons), and (2) three detailed indicators (BUFOR2) derived from airborne laser scanning (ALS) data, describing vegetation volume, height, and continuity. The new methodology was tested on two major technical infrastructure sites in Warsaw, Poland – the "Czajka" wastewater treatment plant and the "Żerań" power plant. Results show a markedly higher buffering potential of vegetation around "Czajka" (mean LAI: 1.79 in summer and 0.30 in winter; mean vegetation volume: 4.06 m³·m⁻²; mean height: 17.6 m) compared to "Żerań" (1.28; 0.23; 1.70 m³·m⁻²; 11.6 m). LAI-based indicators effectively reflected vegetation capacity to reduce noise and visual exposure,

while ALS-derived metrics enabled identification of poorly screened buffer segments. Seasonal analysis revealed a decrease in buffering effectiveness by approximately 80-85% in winter, emphasizing the need for evergreen and multi-layered vegetation structures. The proposed BUFOR1-BUFOR2 indicator set is replicable, based on widely available datasets (Copernicus, ALS national data), and can be directly applied in spatial planning to define minimum vegetation standards, assess environmental impacts, and monitor green infrastructure over time. Despite data limitations (seasonality of LAI, timing of ALS acquisition), the method provides an operational, data-driven framework supporting urban green infrastructure design and climate adaptation strategies.