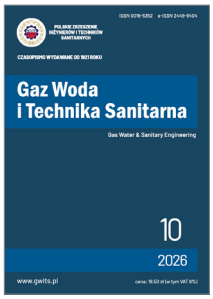
DOI: 10.65545/GWITS.2026.10.01

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH

Gaz Woda i Technika Sanitarna
Gas Water & Sanitary Engineering



Artykuł dostępny / Open Access: www.gwits.pl

Potencjał retencyjny terenu zurbanizowanego w oparciu o metodę SCS-CN na przykładzie Świdnicy, województwo dolnośląskie

Retention potential of an urbanized area based on the SCS-CN method: A case study of Świdnica, Lower Silesian Voivodeship

Mateusz Stróżyk[1], *Maciej Bełcik*[1], *Marcin Wdowikowski*[1]*

[1] *Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska*
* *Kontakt / Correspondence: marcin.wdowikowski@pwr.edu.pl*

Streszczenie:
Artykuł przedstawia ocenę potencjału retencyjnego Świdnicy z wykorzystaniem metody SCS-CN oraz narzędzi GIS. Na podstawie wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych Scalgo określono parametry retencji dla stanu istniejącego (średni CN = 83,77; S = 59,38 mm), identyfikując obszary o wysokim spływie powierzchniowym. Symulacja wdrożenia błękitno-zielonej infrastruktury (zielone dachy, nawierzchnie ażurowe) wykazała obniżenie CN do 76,43 i wzrost retencji S do 109,89 mm, co potwierdza skuteczność BZI.
Słowa kluczowe: potencjał retencyjny, zasoby wodne, błękitno-zielona infrastruktura, hydrologia miejska, metoda SCS-CN

Abstract:
This article presents an assessment of the retention potential of Świdnica using the SCS-CN method and GIS tools. Based on high-resolution Scalgo remote sensing data, retention parameters for the baseline condition were determined (average CN = 83,77; S = 59,38 mm), identifying areas with high surface runoff. Simulation of blue-green infrastructure implementation (green roofs, permeable pavements) demonstrated a reduction of CN to 76,43 and an increase in retention S to 109,89 mm, confirming the effectiveness of BGI.
Keywords: retention potential, water resources, blue green infrastructure, urban hydrology, SCS-CN method

1. Wprowadzenie

Potencjał retencyjny obszaru zurbanizowanego definiuje się jako jego zdolność do czasowego zatrzymywania i magazynowania wód opadowych oraz roztopowych, co bezpośrednio wpływa na spowolnienie i zmniejszenie fali spływu powierzchniowego [11]. Współczesne procesy urbanizacyjne, połączone z postępującymi zmianami klimatycznymi, istotnie zaburzają naturalny obieg wody w zlewniach miejskich [2]. Obserwowane w ostatnich latach przekształcenia reżimu opadowego manifestują się głównie wzrostem częstotliwości występowania gwałtownych opadów nawalnych o dużej intensywności, przedzielonych wydłużonymi okresami suszy [1]. Jak wskazuje raport Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej „Klimat Polski 2024", mimo że uśredniona roczna suma opadów dla Polski (608,4 mm) osiągnęła poziom 99,4% normy z wielolecia 1991–2010, skumulowana liczba dni z opadem uległa wyraźnemu zmniejszeniu [1]. Świadczy to o skondensowaniu opadów w krótszych przedziałach czasowych, co ogranicza infiltrację gruntową i stymuluje szybki spływ powierzchniowy [1]. Istniejąca infrastruktura odwadniająca, projektowana w oparciu o historyczne modele hydrologiczne, nie jest przystosowana do przyjmowania tak dużych objętości wody w krótkim czasie, co prowadzi do przeciążenia sieci kanalizacyjnych i wzrostu ryzyka powodzi miejskich [8]. W konsekwencji zwiększanie retencji w miastach staje się jednym z priorytetowych wyzwań inżynierii środowiska i gospodarki przestrzennej [2].

Odpowiedzią na rosnący deficyt retencyjny w obszarach zurbanizowanych jest rozwój błękitno-zielonej infrastruktury (BZI), obejmującej rozwiązania oparte na zasobach przyrody (ang. *Nature-Based Solutions* – NBS), takie jak niecki bioretencyjne, ogrody deszczowe, zielone dachy, nawierzchnie przepuszczalne czy miejskie zbiorniki retencyjne [2, 17]. W literaturze przedmiotu podkreśla się, że BZI nie tylko ogranicza odpływ bezpośredni i odciąża systemy kanalizacyjne, ale pełni również istotne funkcje ekosystemowe, mikroklimatyczne oraz

Artykuł / Article: Nadesłany / Received: 9.10.2026; Zrecenzowany / Revised: 13.10.2026; Zaakceptowany / Accepted: 17.10.2026; Opublikowany / Published: 26.10.2026

Prawa autorskie: © 2026 autorów. Licencjobiorca: PZITS. Artykuł w otwartym dostępie na licencji Creative Commons CC BY 4.0. / Copyright: © 2026 by the authors. Licensee PZITS. This article is an open access under the Creative Commons CC BY 4.0 license.

adaptacyjne [2, 5]. Mimo niezaprzeczalnych zalet, wdrażanie BZI w polskich realiach napotyka istotne bariery natury prawnej, finansowej, technicznej i społecznej [3–7]. Do fundamentalnych problemów należy brak jednoznacznej definicji obszarów retencyjnych w polskim prawodawstwie [3] oraz brak ujednoliconych standardów określających pojemność retencyjną krajobrazu [4]. W sferze planowania przestrzennego wyzwaniem pozostaje wymuszenie zlewniowego podejścia do gospodarowania wodą oraz ochrona naturalnych korytarzy retencyjnych przed presją inwestycyjną [4]. Barierą ekonomiczną jest wysoki koszt realizacji i utrzymania obiektów BZI, połączony z brakiem powszechnych metodyk wyceny świadczonych przez nie usług ekosystemowych (np. retencjonowania wody czy chłodzenia mikroklimatu) w rachunkach opłacalności inwestycyjnej [5]. Ponadto w gęsto zabudowanych centrach miast ograniczenie stanowią kolizje z podziemną infrastrukturą techniczną oraz podatność BZI na utratę sprawności eksploatacyjnej w wyniku zamulenia lub kolmatacji porów, co wymaga wprowadzenia nowych standardów serwisowania [6]. Zwraca się także uwagę na rozproszenie kompetencji decyzyjnych pomiędzy podmiotami takimi jak Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie a samorządami lokalnymi, co utrudnia spójne zarządzanie zasobami wodnymi w skali dorzecza [7].

Skuteczne zarządzanie ryzykiem pluwialnym wymaga zastosowania zaawansowanych narzędzi diagnostycznych i modelowych [8, 9]. Wskazuje się na konieczność stosowania zintegrowanego podejścia, łączącego analizy pokrycia terenu, stopnia uszczelnienia powierzchni oraz właściwości infiltracyjnych podłoża z wykorzystaniem Systemów Informacji Geograficznej (GIS) [9]. Nowoczesna hydrologia miejska coraz szerzej wykorzystuje wysokorozdzielcze dane przestrzenne, w tym Numeryczne Modele Terenu (NMT) [21] i dane z lotniczego skanowania laserowego (ALS/LiDAR) [22]. Specjalistyczne platformy, takie jak SCALGO Live, umożliwiają precyzyjne symulowanie korytarzy spływu powierzchniowego, bezodpływowych depresji terenowych oraz matematyczny rozdział opadu na infiltrację, retencję depresyjną i spływ bezpośredni [23]. W ocenie komponentu roślinnego istotną rolę odgrywa teledetekcja satelitarna (np. dane Sentinel-2), wykorzystująca znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (NDVI) do monitorowania kondycji zieleni i ewapotranspiracji [24–26]. W celu kompleksowej ewaluacji adaptacyjności miast formułowane są zintegrowane systemy wskaźnikowe, takie jak Water City Index (WCI) [27] czy Urban Climate Adaptation Index (UCAI) [28], a na poziomie regionalnym – wskaźnik krajobrazowego potencjału hydrycznego (ang. *Landscape Hydric Potential* – LHP), określający zdolność terenu do spowolnienia odpływu i zasilania wód podziemnych [19, 20].

Jedną z najczęściej stosowanych i uznanych w praktyce inżynierskiej metod szacowania odpływu bezpośredniego z opadów epizodycznych jest metoda SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number), opracowana przez Departament Rolnictwa USA i rozwinięta m.in. w systemach HEC-HMS [10]. Metoda ta opiera się na parametryzacji obszaru zlewni za pomocą bezwymiarowego wskaźnika retencji CN (przyjmującego wartości od 0 do 100), który uwzględnia właściwości hydrologiczne gleb, sposób użytkowania i pokrycia terenu oraz wstępne warunki wilgotnościowe podłoża [10, 16]. Wielkość bezpośredniego odpływu powierzchniowego [mm] wyznaczana jest z zależności [10, 16]:

$$Q = \frac{(P - 0{,}2S)^2}{P + 0{,}8S} \quad \text{dla } P > 0{,}2S \tag{1}$$

gdzie P oznacza wysokość opadu [mm], natomiast S jest maksymalną potencjalną retencją zlewni [mm], wyliczaną ze wzoru [4, 10, 16]:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2}$$

Wysokie wartości parametru CN (bliskie 100) charakteryzują powierzchnie nieprzepuszczalne o znikomej zdolności infiltracyjnej, generujące gwałtowny spływ, podczas gdy niskie wartości odpowiadają obszarom biologicznie czynnym o wysokiej chłonności [10]. Zastosowanie metody SCS-CN w środowisku GIS pozwala na przestrzenne mapowanie wskaźnika CN oraz potencjału S, tworząc empiryczną podstawę do oceny stanu istniejącego oraz symulacji wariantowych działań adaptacyjnych w miastach [9, 10].

W wymiarze operacyjnym narzędziem integrującym lokalne polityki adaptacyjne do zmian klimatu jest Miejski Plan Adaptacji (MPA) [7, 29, 30]. Dokument ten precyzuje cele strategiczne w zakresie zwiększania odporności na zagrożenia pluwialne i termiczne, stanowiąc podstawę do podejmowania inwestycji z zakresu retencji miejskiej [31, 32]. Pomimo bogatej literatury regionalnej [13, 14] i ogólnych wytycznych planistycznych, wciąż zauważalny jest brak szczegółowych, wysokorozdzielczych studiów przypadku analizujących rzeczywisty potencjał retencyjny średniej wielkości miast polskich z uwzględnieniem krytycznego porównania baz danych przestrzennych o różnej rozdzielczości.

Celem niniejszego artykułu jest określenie i ocena przestrzennego potencjału retencyjnego wybranego obszaru zurbanizowanego na przykładzie miasta Świdnica (województwo dolnośląskie) oraz ocena możliwości jego poprawy poprzez wdrożenie wariantowych rozwiązań z zakresu błękitno-zielonej infrastruktury.

2. Materiał badawczy i metody

Za obszar badań przyjęto miasto Świdnica, o statusie gminy miejskiej zlokalizowanej w południowej części województwa dolnośląskiego, w obrębie jednostki fizycznogeograficznej Przedgórza Sudeckiego [33]. Miasto zajmuje powierzchnię 21,75 km^2 i liczy około 52,1 tys. mieszkańców, co przekłada się na wysoką gęstość zaludnienia wynoszącą 2393,2 os./km^2. Wybór Świdnicy był wynikiem wielokryterialnej analizy przesiewowej (opisanej w rozdziale 3) przeprowadzonej dla miast województwa dolnośląskiego o populacji przekraczającej 20 tys. mieszkańców [12]. Analiza ta wykazała, że miasto charakteryzuje się znacznym udziałem powierzchni zabudowanych przy jednocześnie ograniczonym udziale strukturalnej infrastruktury niebiesko-zielonej, co wg danych regionalnych plasuje je w grupie jednostek szczególnie wrażliwych na występowanie miejskich powodzi pluwialnych [13, 14].

Pod względem hydrograficznym Świdnica leży w zlewni rzeki Bystrzycy, która przepływa przez teren miasta i stanowi główny odbiornik wód opadowych oraz spływów z miejskiego systemu kanalizacji deszczowej [31, 33]. Lokalny układ sieci rzecznej tworzą ponadto mniejsze cieki, takie jak Młynówka i Potok Witoszowski, a także sztuczny zbiornik wodny – Zalew Witoszówka, pełniący funkcje retencyjne i rekreacyjne. Rzeźba terenu miasta jest wyraźnie urozmaicona, rzędne wysokościowe wahają się

w przedziale od 200 do 265 m n.p.m. Ukształtowanie powierzchni bezpośrednio determinuje kierunki spływu powierzchniowego oraz sprzyja powstawaniu lokalnych depresji terenowych, w których podczas opadów o dużej intensywności dochodzi do czasowej akumulacji wody [33].

Struktura użytkowania terenu Świdnicy cechuje się silnym przekształceniem antropogenicznym. W granicach miasta występuje gęsta zabudowa mieszkaniowa (zarówno jedno-, jak i wielorodzinna), obiekty usługowe oraz rozległe tereny przemysłowe, związane m.in. z funkcjonowaniem Podstrefy Świdnica Wałbrzyskiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej „INVEST-PARK". Istotny udział w uszczelnieniu podłoża ma również infrastruktura transportowa, w tym układ dróg krajowych (DK35) i wojewódzkich oraz ciągi kolejowe [33].

Szczegółowa klasyfikacja pokrycia terenu wykonana w oparciu o wysokorozdzielcze dane teledetekcyjne (platforma Scalgo) wykazała następującą strukturę przestrzenną obszaru miasta:

Powierzchnie nieprzepuszczalne (uszczelnione): budynki stanowią 9,6% powierzchni miasta (2,10 km^2), drogi utwardzone 5,5% (1,20 km^2), a inne utwardzone tereny (place, parkingi, chodniki) 14,0% (3,04 km^2). Łącznie tereny bezpośrednio ograniczające infiltrację zajmują 29,1% obszaru gminy (uzupełnione o tory kolejowe stanowiące 0,6%).

Powierzchnie biologicznie czynne i zielone: niska roślinność (trawy, murawy, ogrody działkowe) obejmuje 28,3% powierzchni (6,15 km^2), wysoka roślinność (drzewostany, parki, lasy) 25,6% (5,56 km^2), grunty rolne 12,9% (2,81 km^2), a wody powierzchniowe 1,0% (0,22 km^2). Pozostały udział mają grunty odsłonięte (2,1%) oraz drogi nieutwardzone (0,4%).

Mimo stosunkowo znacznego udziału terenów biologicznie czynnych na obrzeżach miasta, centralne i wschodnie strefy Świdnicy charakteryzują się zwartą zabudową oraz wysokim stopniem uszczelnienia, co w połączeniu z obecnością gleb o ograniczonej przepuszczalności stwarza niekorzystne warunki dla naturalnej infiltracji i wywołuje szybki spływ bezpośredni wód opadowych [13, 14, 32].

W pracy wykorzystano następujące metody i narzędzia badawcze skatalogowane w etapy tworzące jednocześnie procedurę obliczeniową:

1. W pierwszym etapie przeprowadzono wielokryterialną analizę przesiewową miast województwa dolnośląskiego w oparciu o kryteria demograficzne z uwzględnieniem wytycznych Krajowej Strategii Rozwoju Regionalnego 2030 [12], wskaźniki uszczelnienia terenu wyznaczone z europejskiej bazy danych CORINE Land Cover oraz udział infrastruktury niebiesko-zielonej, co pozwoliło na wytypowanie do badań szczegółowych miasta Świdnica.
2. Następnie do ilościowej i przestrzennej oceny warunków infiltracyjnych na poziomie lokalnym wykorzystano oprogramowanie QGIS oraz wysokorozdzielcze dane przestrzenne z platformy Scalgo Live, generowane z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji na bazie ortofotomapy [23].
3. Otrzymane dane połączono z Numerycznym Modelem Terenu pozyskanym z państwowego zasobu geodezyjnego w celu analizy ukształtowania powierzchni i kierunków spływu [21]. Charakterystykę podłoża gruntowego pod kątem infiltracji wykonano w oparciu o dane z Mapy Geologii Inżynierskiej pochodzące z Centralnej Bazy Danych Geologicznych, kwalifikując obszar miasta do odpowiednich hydrologicznych grup glebowych [10].
4. Przestrzenna integracja klas pokrycia terenu i właściwości gleb umożliwiła przypisanie wartości współczynnika oraz wyznaczenie maksymalnej potencjalnej retencji zlewni za pomocą relacji matematycznych zaimplementowanych w kalkulatorze pól środowiska GIS [4, 10, 16].
5. Ewaluację możliwości podniesienia zdolności retencyjnych Świdnicy opracowano w formie przestrzennego scenariusza adaptacyjnego, uwzględniającego wprowadzenie rozwiązań z zakresu błękitno-zielonej infrastruktury, takich jak nawierzchnie przepuszczalne, nowe zadrzewienia oraz zielone dachy na obiektach przemysłowych i użyteczności publicznej [2, 17], a następnie przeliczono bilans retencyjny dla zmodyfikowanych parametrów terenu.

3. Analiza przesiewowa miast

W celu obiektywnego wytypowania obszaru badawczego o podwyższonej wrażliwości na występowanie miejskich powodzi pluwialnych i ograniczonym potencjale retencyjnym przeprowadzono wielokryterialną analizę przestrzenną [13, 14]. Procedura kwalifikacyjna opierała się na sekwencyjnym zastosowaniu czterech kryteriów selekcyjnych w środowisku GIS, co pozwoliło na sukcesywne filtrowanie jednostek administracyjnych z poziomu krajowego do skali lokalnej [12–14].

Założenia metodyczne analizy przesiewowej obejmowały cztery kryteria selekcyjne [12–14], natomiast schemat przedstawiono w tabeli 1:

Kryterium przestrzenno-administracyjne (K1): ograniczenie obszaru poszukiwań do granic województwa dolnośląskiego w celu zapewnienia spójności regionalnej polityki wodnej oraz optymalizacji mocy obliczeniowych przy przetwarzaniu danych GIS [13, 14].

Kryterium demograficzne (K2): uwzględnienie miast średnich i dużych o liczbie mieszkańców równej lub przekraczającej 20 tys. Próg ten przyjęto zgodnie z definicją miast średnich zawartą w Krajowej Strategii Rozwoju Regionalnego 2030 (KSRR 2030) oraz stosowaną przez Główny Urząd Statystyczny [12].

Kryterium uszczelnienia terenu (K3): wyselekcjonowanie gmin, w których udział powierzchni zabudowanych i utwardzonych przekracza 50% całkowitej powierzchni jednostki. Stopień uszczelnienia wyznaczono na podstawie europejskiej bazy danych CORINE Land Cover (CLC), sumując powierzchnie klas odpowiadających zwartej i luźnej zabudowie miejskiej, terenom przemysłowym, handlowym oraz infrastrukturze komunikacyjnej.

Kryterium udziału błękitno-zielonej infrastruktury (K4): ograniczenie wyboru do miast, w których udział strukturalnej BZI nie przekracza 30% powierzchni gminy. Klasyfikacja BZI w bazie CLC obejmowała tereny zieleni miejskiej, lasy, uprawy rolne, łąki, pastwiska oraz wody powierzchniowe [15, 18].

W punkcie wyjścia analizą objęto pełny zbiór 2479 gmin Rzeczypospolitej Polskiej. Zastosowanie pierwszego kryterium terytorialnego ograniczyło zbiór do 169 gmin województwa dolnośląskiego [13, 14]. Spośród nich drugie kryterium demograficzne (populacja ≥ 20 tys. mieszkańców) spełniło 17 ośrodków miejskich [12]: Wrocław (672,9 tys. mieszkańców), Wałbrzych (98,7 tys.), Legnica (90,8 tys.), Jelenia Góra (74,2 tys.),

DOI: 10.65545/GWITS.2026.10.01

Lubin (66,9 tys.), Głogów (61,2 tys.), Świdnica (52,1 tys.), Bolesławiec (36,8 tys.), Oleśnica (34,9 tys.), Oława (33,1 tys.), Dzierżoniów (30,3 tys.), Zgorzelec (28,5 tys.), Bielawa (27,7 tys.), Kłodzko (24,5 tys.), Świebodzice (21,6 tys.), Polkowice (21,1 tys.) oraz Jawor (20,3 tys.).

Tabela 1. Schemat wielokryterialnej analizy przesiewowej wyboru obszaru badań (opracowanie własne)
Table 1. Multi-criteria screening analysis workflow for study area selection (authors' own study)

Liczba gmin na danym etapie	Kryteria wyboru
2479	Dane wejściowe – liczba gmin w całej Polsce
169	K1: Ograniczenie obszaru do granic woj. dolnośląskiego
17	K2: Ograniczenie obszaru do miast średnich i dużych
5	K3: Ograniczenie obszaru do gmin o udziale terenów zurbanizowanych powyżej 50% powierzchni gminy
1	K4: Ograniczenie obszaru do gmin o udziale BZI poniżej 30%

Dla wytypowanych 17 miast przeprowadzono bilans struktury użytkowania terenu na podstawie danych CLC. Trzecie kryterium (udział powierzchni zabudowanej > 50%) wyeliminowało 12 miast i pozwoliło na wyłonienie 5 jednostek o najwyższym stopniu uszczelnienia: Świdnica (64,5% powierzchni zabudowanej), Zgorzelec (57,2%), Legnica (51,1%), Bolesławiec (50,9%) oraz Wrocław (50,4%). Warto zauważyć, że najgęściej zaludnione miasto spośród analizowanych, Świdnica (2393,2 os./km^2), zajęło jednocześnie pierwsze miejsce pod względem wskaźnika udziału powierzchni zabudowanej (tabela 2).

Tabela 2. Udział powierzchni zabudowanej w powierzchni całkowitej gminy (opracowanie własne)
Table 2. Percentage of built-up area in the total area of the municipality (authors' own study)

Miasto	Powierzchnia zabudowy [km^2]	Powierzchnia gminy [km^2]	Stosunek zabudowy do powierzchni gminy [%]
Bielawa	7,6	36,2	21,1%
Bolesławiec	11,6	22,9	50,9%
Dzierżoniów	9,4	20,1	46,8%
Głogów	16,1	35,1	45,9%
Jawor	7,5	18,8	39,8%
Jelenia Góra	28,1	109,3	25,7%
Kłodzko	8,0	24,8	32,2%
Legnica	28,7	56,3	51,1%
Lubin	19,9	40,7	48,9%
Oława	11,0	27,3	40,2%
Oleśnica	9,9	20,9	47,3%
Polkowice	14,4	167,6	8,6%
Świdnica	14,0	21,7	64,5%
Świebodzice	7,8	30,4	25,6%
Wałbrzych	27,3	84,6	32,2%
Wrocław	147,3	292,5	50,4%
Zgorzelec	9,1	15,9	57,2%

W ostatnim etapie analizy przesiewowej dla 5 zakwalifikowanych miast obliczono udział infrastruktury niebiesko-zielonej. Wskaźnik ten wyniósł odpowiednio: Legnica – 48,9%, Wrocław – 45,7%, Bolesławiec – 42,2%, Zgorzelec – 38,7% oraz Świdnica – 29,5%. Tym samym gmina miejska Świdnica okazała się jedyną jednostką w województwie dolnośląskim, która spełniła pełny zestaw założonych kryteriów brzegowych (w tym udział BZI poniżej 30%), wyniki przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Udział powierzchni infrastruktury niebiesko-zielonej w powierzchni całkowitej gminy (opracowanie własne)
Table 3. Percentage of blue-green infrastructure in the total area of the municipality (authors' own study)

Miasto	Powierzchnia infrastruktury niebiesko-zielonej [km^2]	Powierzchnia gminy [km^2]	Stosunek terenów niebiesko-zielonych do powierzchni gminy
Bolesławiec	9,6	22,9	42,2%
Legnica	27,5	56,3	48,9%
Świdnica	6,4	21,7	29,5%
Wrocław	133,8	292,5	45,7%
Zgorzelec	6,1	15,9	38,7%

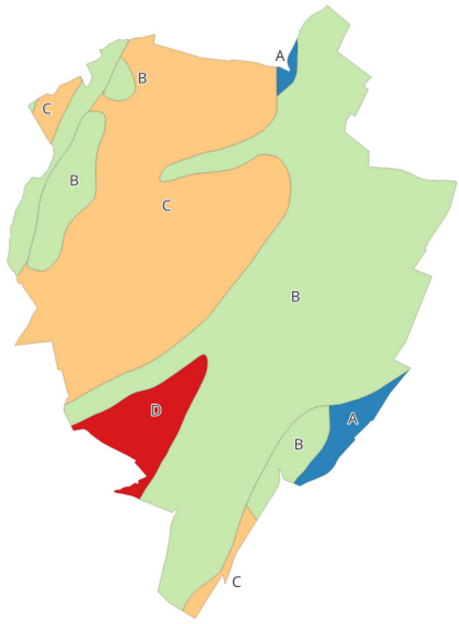
Wyniki przeprowadzonej procedury selekcyjnej oraz wybór Świdnicy jako reprezentatywnego obszaru badań potwierdzają ustalenia zawarte w dokumencie Instytutu Rozwoju Terytorialnego pt. *„Analiza potencjału retencyjnego na obszarze województwa dolnośląskiego"* [13, 14]. W raporcie tym Świdnica uzyskała niekorzystne wskaźniki w kategoriach retencji glebowej, leśnej oraz powierzchni małych zbiorników wodnych, przy jednoczesnym wysokim udziale obszarów zwartej zabudowy narażonych na zalewanie, co w pełni uzasadnia potrzebę podjęcia szczegółowych badań i działań adaptacyjnych na tym terenie [13, 14].

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Ocena potencjału retencyjnego dla stanu istniejącego

Wyznaczenie potencjału retencyjnego Świdnicy w stanie istniejącym wymagało w pierwszej kolejności parametryzacji podłoża gruntowego pod kątem chłonności hydrologicznej. Na podstawie danych z Mapy Geologii Inżynierskiej (CBDG) wydzielono cztery hydrologiczne grupy glebowe (*A, B, C, D*) [10]. Na obszarze miasta dominują gleby zaliczone do grupy *B* (umiarkowana infiltracja) oraz grupy *C* (słaba przepuszczalność, sprzyjająca generowaniu spływu bezpośredniego). Gleby grupy *D* o skrajnie niskiej infiltracji występują lokalnie w południowo-zachodniej części miasta, natomiast najbardziej przepuszczalne gleby grupy *A* obejmują niewielkie fragmenty w rejonie cieków wodnych [10].

Połączenie klas pokrycia terenu wyznaczonych z bazy SCALGO z mapą grup hydrologicznych gleb pozwoliło przypisać wartości współczynnika *CN* z tabel metodycznych HEC-HMS [10, 16]. Dla obszaru Świdnicy średnia ważona wartość współczynnika *CN* dla stanu istniejącego wyniosła 83,77, co świadczy o wysokim stopniu uszczelnienia terenu oraz ograniczonej zdolności naturalnej infiltracji [10]. Najwyższe wartości parametru (*CN* = 98) przypisano powierzchniom całkowicie nieprzepuszczalnym, czyli budynkom, drogom utwardzonym, parkingom oraz placom manewrowym [10, 16].



Rys. 1. Mapa klasyfikacji hydrologicznej miasta Świdnica (opracowanie własne)
Fig. 1. Świdnica city hydrological classification map (authors' own study)

Na podstawie wartości CN obliczono maksymalną potencjalną retencję zlewni [4, 10, 16]. Średnia wartość parametru S dla całego miasta wyniosła zaledwie 59,38 mm. Analiza przestrzenna wykazuje silne zróżnicowanie zdolności magazynowych:

Strefy priorytetowe o najniższym potencjale retencyjnym (S < 59 mm): obejmują ścisłe centrum miasta (zwarta zabudowa wielorodzinna i usługowa z rozbudowaną siecią drogową), wschodnią część Świdnicy (obszary przemysłowe i magazynowe ze znacznym udziałem dachów, parkingów i placów dojazdowych) oraz pas rozciągający się w kierunku zachodnim i południowo-zachodnim [13, 14].

Strefy o podwyższonym potencjale retencyjnym: zlokalizowane są głównie na obrzeżach północnych, południowych i południowo-wschodnich, gdzie dominuje roślinność wysoka, grunty rolne oraz tereny zieleni urządzonej [13, 14].

Warto zauważyć, że obszary południowo-zachodnie, mimo obecności Zalewu Witoszówka oraz kompleksów leśno-łąkowych, wykazują lokalnie niższy potencjał wskaźnikowy ze względu na występowanie niekorzystnych gleb grupy *D* oraz fakt, że powierzchniom wód przypisuje się wartości *CN* = 100 (brak możliwości dodatkowego magazynowania opadu w profilu gruntowym) [10].

4.2. Ocena efektu hydrologicznego po wdrożeniu strategii BZI

W celu podniesienia retencyjności miasta opracowano scenariusz adaptacyjny oparty na rozproszonych rozwiązaniach błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) [2, 17]. Strategia obejmowała trzy grupy działań:

Płyty ażurowe / ekologiczne parkingi: przekształcenie nieprzepuszczalnych placów i parkingów (stary *CN* = 98) w nawierzchnie ażurowe z udziałem zieleni (nowe wartości w przedziale 61–87 w zależności od grupy glebowej) [10].

Zielone dachy: wprowadzenie retencyjnych dachów zielonych na obiektach przemysłowych oraz budynkach użyteczności publicznej, obejmujące 1,33 km^2 (6,1% powierzchni miasta), dla których przyjęto wartość *CN* = 49 [10].

Zwiększenie struktury zadrzewienia: przekształcenie terenów roślinności niskiej w roślinność wysoką [10].

Tabela 4 przedstawia bilans struktury pokrycia terenu miasta Świdnica przed i po zastosowaniu proponowanych zmian adaptacyjnych.

Tabela 4. Zestawienie pokrycia terenu miasta Świdnica przed i po wdrożeniu scenariusza adaptacyjnego (opracowanie własne)
Table 4. Comparison of land cover in the city of Świdnica before and after the implementation of the adaptation scenario (authors' own study)

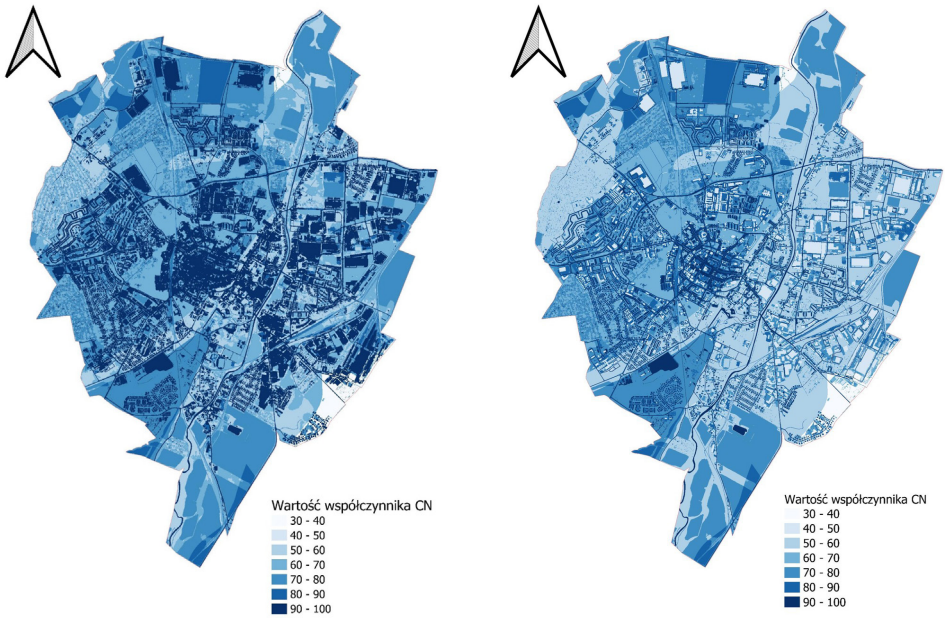
Rodzaj pokrycia terenu	Powierzchnia [km^2]	Udział w powierzchni gminy [%]	Powierzchnia [km^2]	Udział w powierzchni gminy [%]
	Powierzchnie przed zmianą		Powierzchnie po zmianie	
Grunt odsłonięty, niezabudowany	0,45	2,1%	0,45	2,1%
Wody powierzchniowe	0,22	1,0%	0,22	1,0%
Inne powierzchnie utwardzone	3,04	14,0%	3,04	14,0%
Niska roślinność (trawy, murawy itp.)	6,15	28,3%	5,90	27,1%
Wysoka lub gęsta roślinność (krzewy, lasy)	5,56	25,6%	5,81	26,8%
Pola uprawne	2,81	12,9%	2,81	12,9%
Drogi utwardzone	1,20	5,5%	1,20	5,5%
Drogi nieutwardzone	0,09	0,4%	0,09	0,4%
Linie kolejowe	0,13	0,6%	0,13	0,6%
Budynki	2,10	9,6%	0,77	3,5%
Zielone dachy	–	–	1,33	6,1%

Wdrożenie zaproponowanych rozwiązań przyniosło znaczącą poprawę parametrów hydrologicznych:

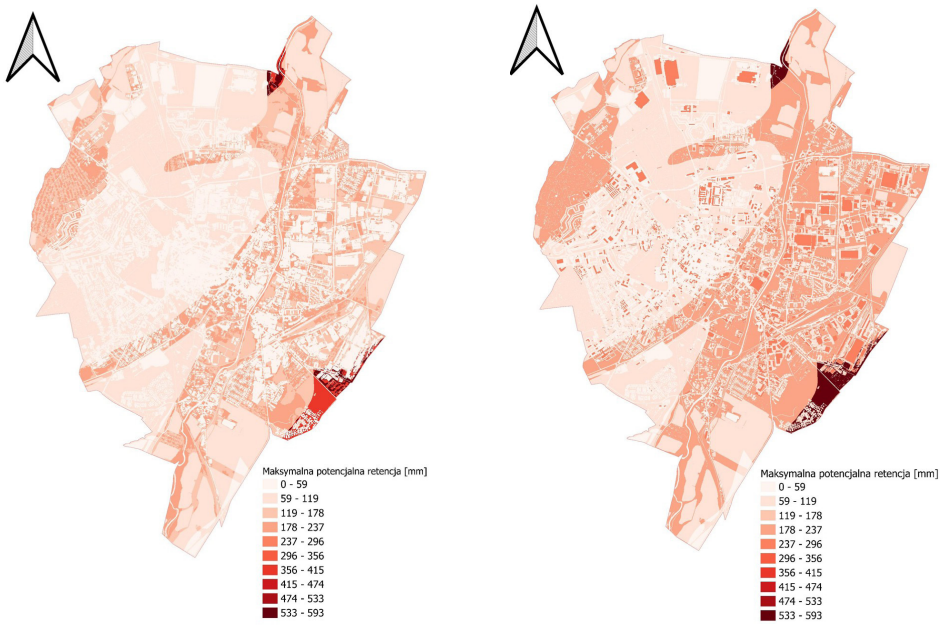
- Średnia wartość współczynnika dla miasta spadła z 83,77 do 76,43 [10].
- Średnia maksymalna potencjalna retencja wzrosła z 59,38 mm do 109,89 mm, co oznacza prawie dwukrotny wzrost (o 85%) zdolności magazynowych zlewni miejskiej [4, 10].

Największy przyrost retencji zaobserwowano we wschodniej, przemysłowej strefie miasta, gdzie duża powierzchnia płaskich dachów horyzontalnych oraz rozległych parkingów pozwoliła na szerokie zastosowanie dachów zielonych i nawierzchni ażurowych. W centrum miasta poprawa miała charakter umiarkowany z uwagi na ograniczenia przestrzenne i gęstą zabudowę mieszkaniową, co wskazuje na konieczność uzupełnienia tam działań o mikrorozwiązania punktowe (np. ogrody deszczowe, skrzynki rozsączające) [13, 14, 32]. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki wartości współczynników CN oraz retencji przed i po zmianach.

DOI: 10.65545/GWITS.2026.10.01



Rys. 2. Zmienność współczynnika *CN* dla miasta Świdnica przed zmianami (lewy), po zmianach (prawy) (opracowanie własne)
Fig. 2. *CN* parameter variability for the Świdnica city before (left) and after (right) implementation (authors' own study)



Rys. 3. Zmienność maksymalnej potencjalnej retencji dla miasta Świdnica przed zmianami (lewy), po zmianach (prawy) (opracowanie własne)
Fig. 3. Maximum potential retention for the Świdnica city before (left) and after (right) implementation (authors' own study)

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza potencjału retencyjnego miasta Świdnica, oparta na integracji wysokorozdzielczych danych przestrzennych w środowisku GIS z metodą hydrologiczną SCS-CN, pozwoliła na ilościową i przestrzenną ocenę zdolności magazynowych terenu zurbanizowanego. Wyznaczona dla stanu istniejącego średnia wartość współczynnika CN = 83,77 oraz maksymalnej potencjalnej retencji S = 59,38 mm potwierdzają przewagę spływu bezpośredniego nad naturalną infiltracją, co plasuje Świdnicę w grupie obszarów o podwyższonym ryzyku występowania powodzi miejskich [10, 13, 14]. Najniższy potencjał retencyjny zidentyfikowano w centrum miasta (zwarta zabudowa) oraz we wschodniej strefie przemysłowej [13, 14].

Ilościowa ocena zaproponowanego scenariusza adaptacyjnego wykazała, że wdrożenie rozproszonej błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) – obejmującej montaż retencyjnych zielonych dachów na obiektach przemysłowych i publicznych (1,33 km^2; powierzchni miasta), zamianę nieprzepuszczalnych parkingów na nawierzchnie ażurowe (3,04 km^2; 14,0%) oraz nowe zadrzewienia (0,25 km^2) – prowadzi do obniżenia średniego wskaźnika CN do 76,43 oraz niemal dwukrotnego wzrostu retencji maksymalnej do 109,89 mm [2, 10, 17]. Uzyskane wyniki wpisują się w cele strategiczne Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu dla Świdnicy (MPA) oraz rekomendacje raportu Instytutu Rozwoju Terytorialnego (IRT) dotyczące konieczności redukcji odpływu powierzchniowego [13, 14, 31, 32].

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski końcowe:

Świdnica charakteryzuje się ograniczoną naturalną zdolnością zatrzymywania wód opadowych [13, 14]. Głównym czynnikiem generującym gwałtowny spływ powierzchniowy jest wysoki stopień uszczelnienia terenu w strefach zwartej zabudowy i rejonach przemysłowych, połączony z obecnością gleb o ograniczonej przepuszczalności (grupy hydrologiczne *B* i *C*) [10].

Wykazano znaczące rozbieżności w ocenie struktury pokrycia terenu między ogólnodostępną bazą CORINE Land Cover (udział zabudowy 64,5%) a wysokorozdzielczymi danymi teledetekcyjnymi SCALGO (30,1%) [23]. Stosowanie danych regionalnych (CLC) w analizach mikroskalowych prowadzi do nadmiernej generalizacji, dlatego rzetelna diagnostyka miejska wymaga stosowania danych o wysokiej szczegółowości przestrzennej [13, 14, 23].

Wariantowa symulacja potencjału retencyjnego udowodniła, że nawet częściowe przekształcenie istniejących powierzchni utwardzonych i dachowych (łącznie 22,3% obszaru miasta) pozwala na niemal dwukrotne zwiększenie zdolności retencyjnych zlewni miejskiej [2, 10, 17]. Największy efekt hydrologiczny uzyskano w wielkopowierzchniowych strefach przemysłowych poprzez połączenie dachów zielonych i nawierzchni przepuszczalnych [10].

Opracowane mapy przestrzennego rozkładu parametrów retencyjnych stanowią praktyczne narzędzie diagnostyczne dla samorządu terytorialnego. Pozwalają na precyzyjne wyznaczanie stref priorytetowych dla inwestycji proretencyjnych oraz wspierają wdrażanie Miejskiego Planu Adaptacji [31, 32].

Poprawa odporności miasta na ekstremalne zjawiska opadowe wymaga łączenia rozwiązań technicznych (modernizacja kanalizacji) z działaniami opartymi na przyrodzie (NBS/BZI) oraz odpowiednimi zapisami w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego [2, 4, 7].

Przedstawiona metodyka SCS-CN ma charakter wskaźnikowy i nie uwzględnia pełnej dynamiki odpływu w sieci kanalizacyjnej [10]. Dalsze prace powinny koncentrować się na powiązaniu map potencjału retencyjnego z hydrodynamicznym modelowaniem sieci kanalizacji deszczowej dla opadów miarodajnych oraz na analizie wydajności wpustów ulicznych i mikrodepresji terenowych [8, 21, 23].

6. Literatura

[1] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. (2025). *Klimat Polski 2024*. IMGW-PIB.

[2] Januchta-Szostak, A. (2020). Błękitno-zielona infrastruktura jako narzędzie adaptacji miast do zmian klimatu i zagospodarowania wód opadowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, 2020.

[3] Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069–2094. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w

[4] Mika, A., Bełcik, M., & Wdowikowski, M. (2026). Zgoda wodnoprawna jako element systemu gospodarowania wodami / Water law consent as an element of the water management system. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna,* 100(6). https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.06.05

[5] Almaaitah, T., Appleby, M., Rosenblat, H., Drake, J., & Joksimovic, D. (2021). The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: A systematic literature review. *Blue-Green Systems*, 3(1), 223–248. https://doi.org/10.2166/bgs.2021.016

[6] Iwaszuk, E., Rudik, G., Duin, L., Tokarz, A., Sochacka, A., & van der Heijden, R. (2019). *Błękitno-zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu w miastach – katalog techniczny.* Ecologic Institute & Fundacja Sendzimira.

[7] Hajto, M. (Red.), Bidłasik, M., Kuśmierz, A., Marcinkowski, M., Potapowicz, I., Rajkowska, B., Romańczak, A., & Siwiec, E. (2023). *Podręcznik adaptacji dla miast. Wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu. Aktualizacja 2023.* Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy.

[8] Barszcz, M. (2015). Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej. Przegląd Naukowy. *Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 24(2), 166–177.

[9] Rybka, P, Jurasz, J., & Wdowikowski, M. (2023). Potencjał retencyjny miasta. Część 1: Metody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 97(10), 18–29. https://doi.org/10.15199/17.2023.10.3

[10] U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical reference manual* (CPD-74B). U.S. Army Corps of Engineers.

[11] Krężałek, K. (2012). Mała retencja na terenach zurbanizowanych. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, 55(4), 166–169.

[12] Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej. (2019). *Krajowa Strategia Rozwoju Regionalnego 2030. Rozwój społecznie wrażliwy i terytorialnie zrównoważony*. MFiPR.

[13] Instytut Rozwoju Terytorialnego. (2025). *Analiza potencjału retencyjnego na obszarze województwa dolnośląskiego.* IRT.

[14] Instytut Rozwoju Terytorialnego. (2025). *Analiza potencjału retencyjnego na obszarze województwa dolnośląskiego. Rekomendacje. Moduł 8a*. IRT.

[15] Calliari, E., Staccione, A., & Mysiak, J. (2019). An assessment framework for climate-proof nature-based solutions. *Science of the Total Environmen*t, 656, 691–700. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.341

[16] Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190120. https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120

[17] Zwoździak J., Szałata Ł., Zwoździak A., Kwiecińska K., & Byelyayev M. (2020). Water retention in nature-based solutions—Assessment of potential economic effects for local social groups. *Water*, 12(12), 3347. https://doi.org/10.3390/w12123347

[18] Wang, Y., Cai, G., Yang, L., Zhang, N., & Du, M. (2022). Monitoring of urban ecological environment including air quality using satellite imagery. *PLoS ONE,* 17(8), e0266759. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266759

[19] Wałęga, A., Młyński, D., Wojkowski, J., Radecki-Pawlik, A., & Lepeška, T. (2020). New empirical model using landscape hydric potential method to estimate median peak discharges in mountain ungauged catchments. *Water*, 12(4), 983. https://doi.org/10.3390/w12040983

[20] Wojkowski, J., Wałęga, A., Radecki-Pawlik, A., Młyński, D., & Lepeška, T. (2022). The influence of land cover changes on landscape hydric potential and river flows: Upper Vistula, Western Carpathians. *CATENA*, 210, 105878. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105878

[21] Liang, Y., Liao, W., & Wang, H. (2025). A high-resolution DEM-based method for tracking urban pluvial–fluvial floods. *Remote Sensing*, 17(7), 1225. https://doi.org/10.3390/rs17071225

[22] Muhadi, N. A., Abdullah, A. F., Bejo, S. K., Mahadi, M. R., & Mijic, A. (2020). The use of LiDAR-derived DEM in flood applications: A review. R*emote Sensing*, 12(14), 2308. https://doi.org/10.3390/rs12142308

[23] Warzecha, B., & Dudek-Klimiuk, J. (2023). Stormwater runoff management in Sandomierz, as an example of medium-sized European city, using SCALGO Live. *Journal of Water and Land Development*, 59, 267–274. https://doi.org/10.24425/jwld.2023.148451

[24] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. W *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (Vol. 1, pp. 309–317). NASA.

[25] Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

[26] Moula, M. M., Shonom, I. J., Islam, A., & Hossain, M. M. (2025). *An interactive Google Earth Engine application for global multi-scale vegetation analysis using NDVI thresholding*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.01628

[27] Kakwani, N. S., & Kalbar, P. P. (2022). Measuring urban water circularity: Development and implementation of a Water Circularity Indicator. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 723–735. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.029

[28] Patel, N., Jänicke, B., Burghardt, R., Vulova, S., & Otto, F. (2025). Assessing progress in urban climate adaptation: A review of indicators for heat- and water-sensitive urban development. *Climate Resilience and Sustainability,* 4(1), e70009. https://doi.org/10.1002/cli2.70009

[29] Dubel, A., & Królikowska, K. (2025). *Rekomendacje dla miast, regionów i aglomeracji do przygotowania OPZ lub SIWZ dla opracowania planu adaptacji do zmiany klimatu oraz jego wdrażania i monitorowania*. MIP4Adapt. https://crs.org.pl/wp-content/uploads/2025/08/MIP4Adapt-kluczowe-elementy-planu-adaptacji_rekomendacje.pdf

[30] Dąbrowski, T. (2025). Miejskie plany adaptacji do zmian klimatu w świetle nowelizacji ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska. *Prawo i Więź*, 58(5). https://doi.org/10.36128/s7gw1e95

[31] BMT Polska Sp. z o.o. (2021). *Miejski Plan Adaptacji do zmian klimatu dla Gminy Miasto Świdnica do 2030 r. Gmina Miasto Świdnica*.

[32] Gmina Miasto Świdnica. (2025). *Raport z realizacji Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu dla Gminy Miasto Świdnica do 2030 r. za lata 2022–2024*. Urząd Miejski w Świdnicy.

[33] Urząd Miejski w Świdnicy. (2024). *Dane statystyczne i środowiskowe dla miasta Świdnica*. Urząd Miejski w Świdnicy.