

# Potencjał retencyjny miasta. Część 1: Metody

## City's retention potential. Part 1: Methods.

Paulina Rybka, Jakub Jurasz, Marcin Wdowikowski\*

**Słowa kluczowe:** *retencja, miasto, spływ powierzchniowy, hydrologia miejska, zmiany klimatyczne*

### Streszczenie

Rozwój terenów miejskich jest nieodłącznym elementem rozwoju cywilizacyjnego. W Polsce postępujące procesy urbanizacyjne wraz z silnym trendem zmiany struktury funkcjonalnej obszarów wiejskich w ostatnich trzydziestu latach, doprowadziły w konsekwencji do zwiększania powierzchni zabudowy terenu oraz jego uszczelnienia. Znaczącemu ograniczeniu uległ udział terenów zielonych oraz nieużytków, co spowodowało pogorszenie warunków retencyjnych w bilansie wodnym zarówno aglomeracji miejskich jak i mniejszych miejscowości. Jednocześnie skutki zmian klimatycznych przyczyniają się do coraz częstszego występowania ekstremalnych zdarzeń pogodowych, powodując nasilające się zagrożenia związane z takimi zjawiskami jak: miejska wyspa ciepła, powódź błyskawiczna i susza. Przestrzeń miejska jest szczególnie wrażliwa na dynamiczne zmiany warunków meteorologicznych głównie ze względu na powiększającą się liczbę ludności, która ją zamieszkuje. Antropogeniczne przekształcenia środowiska i zagrożenia klimatyczne znacząco przyczyniają się do potęgowania problemu odprowadzania wody opadowej i roztopowej w zlewniach miejskich jak również obniżenia komfortu życia. Niniejsza praca ma na celu przedstawienie metod oceny potencjału retencyjnego, który z jednej strony pozwala zobrazować skalę problemu, z którym mierzymy się adaptując przestrzeń miejską do warunków zmieniającego się środowiska, z drugiej zaś wskazuje możliwe kierunki rozwoju terenów zurbanizowanych aby nadawały się do życia w przewidywanej strukturze funkcjonalno-użytkowej.

**Keywords:** *retention, city, surface runoff, urban hydrology, climate change*

### Abstract

The development of urban areas is an inherent element of civilization development. In Poland, the progressive urbanization processes together with the strong trend of changing the functional structure of rural areas over the last thirty years have resulted in an increase in the area of development and its sealing. The share of green areas and wastelands was significantly reduced, which resulted in the deterioration of retention conditions in the water balance of both urban agglomerations and smaller towns. At the same time, the effects of climate change contribute to the increasing occurrence of extreme weather events, causing increasing threats related to phenomena such as urban heat island, flash floods and drought. Urban space is particularly sensitive to dynamic changes in meteorological conditions, mainly due to the growing number of people living there. Anthropogenic environmental changes and climatic threats significantly contribute to the problem of rainwater and meltwater drainage in urban catchments, as well as to a reduction in the quality of life. This work aims to present methods for assessing the retention potential, which, on the one hand, allows us to illustrate the scale of the problem we face when adapting urban space to the conditions of a changing environment, and on the other hand, indicates possible directions of urban areas development to make them suitable for living in the expected functional and utilitarian structure.

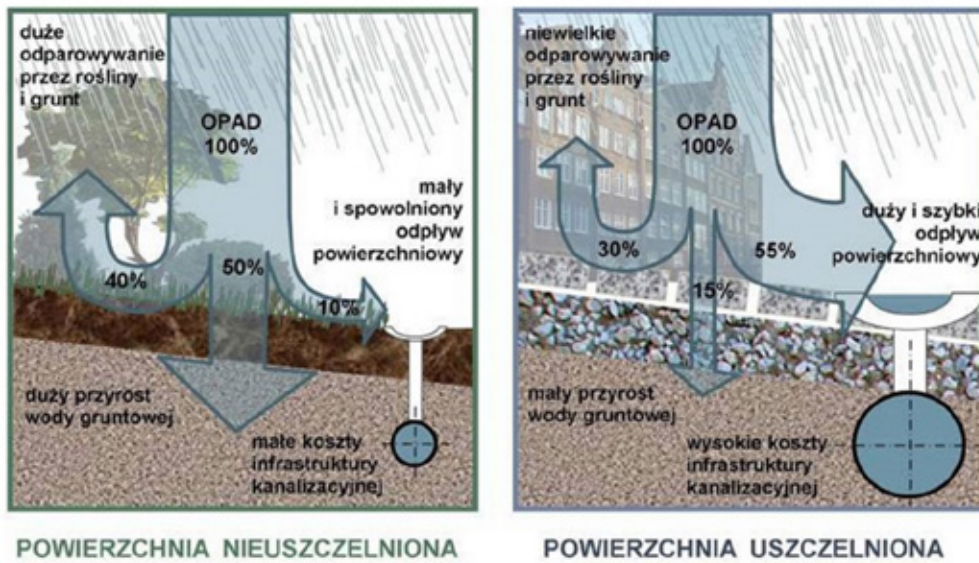
## 1. Wprowadzenie

Prognozy Organizacji Narodów Zjednoczonych oraz Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska przewidują, że do roku 2050 r. wskaźnik ludności zamieszkującej miasta na świecie wzrośnie do poziomu 68%. Aktualnie największy udział procentowy zagęszczenia ludności w obszarach miejskich odnotowywany jest w Europie 74%, a w Polsce populacja mieszkańców miast sięga 60% [17]. Zgodnie z przytoczonymi prognozami zwiększa się presja urbanizacyjna na obszary podmiejskie [17,19]. W polskich miastach obserwuje się proces „rozlewania się miast”, polegający na stopniowym przemieszczaniu się ludności z centrum do stref podmiejskich przy jednoczesnym napływie ludności z obszarów wiejskich. Tym samym, zmienia się dotychczasowe zagospodarowanie przestrzenne, na nowe, samowystarczalne ośrodki peryferyjne – dzielnice miejskie. Gwałtowny rozrost miast przyczynia się również do zacierania różnic pomiędzy obszarami wiejskimi, a miejskimi, niejednokrotnie powodując chaos przestrzenny na obszarach peryferyjnych, skutkującą tzw. urbanizacją rozproszoną [18].

Narastająca urbanizacja doprowadziła do znaczącego zwiększenia uszczelnienia powierzchni terenu, które posiadają minimalne zdolności retencyjne oddziałując niekorzystnie na naturalny obieg wody i zmieniając udział procentowy wybranych procesów w cyklu hydrologicznym [26]. Na rysunku 1 przedstawiono modelową sytuację, w której podczas występowania opadu atmosferycznego na powierzchni naturalnej, która pokryta jest roślinnością 40% spadającego opadu odparowuje bezpośrednio przez grunt i rośliny, 50% opadu infiltruje w grunt i 10% opadu odpływa po powierzchni. W porównaniu, na powierzchni zurbanizowanej, pokrytej materiałami umocnionymi parowanie i infiltracja wody dostarczonej z opadu atmosferycznego są niewielkie, za to dochodzi do gwałtownego spływu powierzchniowego o znacznym udziale ilościowym, sięgającym nawet 55% [19].

Ponadto antropogeniczne przekształcenia środowiska powodują znaczące zmiany warunków hydrologicznych, a w konsekwencji do lokalnych podtopień i powodzi miejskich. Co więcej, wzrastające uszczelnianie gruntów miejskich przyczynia się do powstawania

\*) Paulina Rybka, Jakub Jurasz, Marcin Wdowikowski – Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27 50-370 Wrocław, e-mail: marcin.wdowikowski@pw.edu.pl



Rys. 1. Obieg wody na powierzchniach nieuszczelnionych i uszczelnionych [18]

Fig. 2. Water circulation on unsealed and sealed surfaces [18]

wysokich objętości wody i szczytowych natężeń odpływu powierzchniowego podczas występowania deszczów nawalnych [4,26]. Następujące skutki zachodzących zmian klimatu, wywołanych rosnącą częstotliwością występowania ekstremalnych zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych potęgują problem gospodarowania wodą opadową i roztopową w zlewniach miejskich [18]. Dotychczasowe sposoby ich szybkiego odprowadzania do odbiornika skutkuje niewydolnością systemów kanalizacyjnych i degradacją środowiska naturalnego [19].

W związku z powyższym wymagana jest zmiana podejścia do gospodarowania wodą opadową i roztopową na terenach miejskich. Umożliwiająca odtworzenie obiegu wody, który jest podobny do powierzchni naturalnych pokrytych roślinnością [26]. Wymagana jest zmiana podejścia w obchodzeniu się z wodą opadową lub roztopową jako ściek, w surowiec, który można wykorzystać ponownie. Na rysunku 2 przedstawiono procesy wielopłaszczyznowych relacji jako efekt wdrażania błękitno-zielonej infrastruktury.

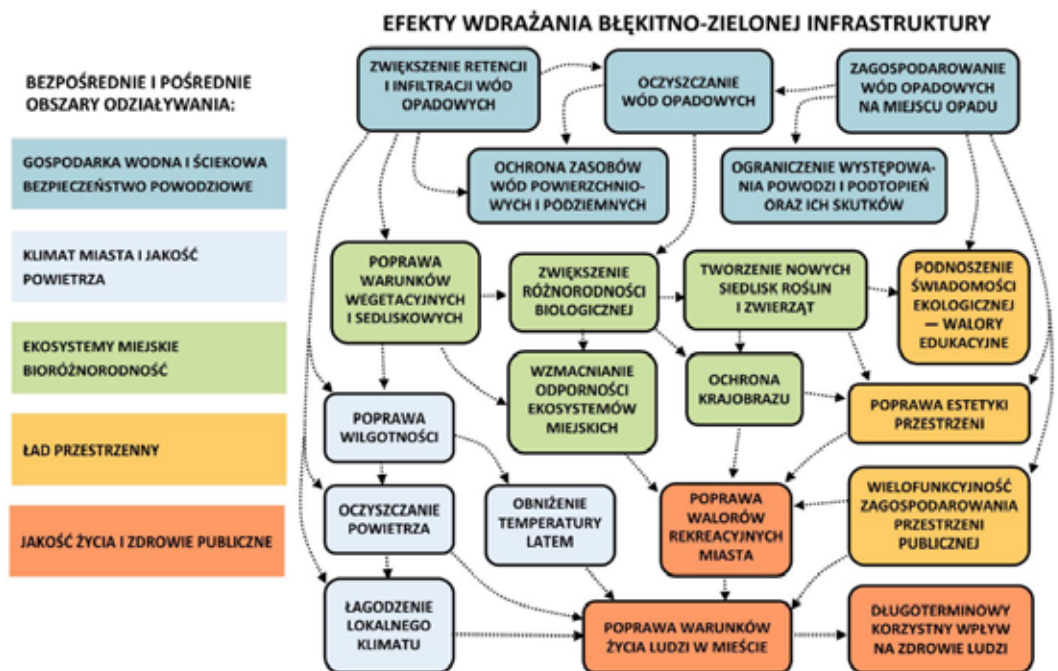
Podstawą koncepcji zrównoważonego drenażu miejskiego jest gromadzenie wody na miejscu ich powstania przy wykorzystaniu urządzeń do zamierzony retencji [15]. Nowe sposoby odprowadzania wody w obszarach zurbanizowanych wymagają wykorzystania rozwiązań systemowych opartych na zasobach przyrody, które powstają w odwołaniu się do wzorców wziętych z natury. Do tych rozwiązań należy niebieska i zielona infrastruktura. Jest to „strategicznie zaplanowana sieć obszarów naturalnych i półnaturalnych z innymi cechami środowiskowymi,

zaprojektowana i zarządzana w sposób mający zapewnić szeroką gamę usług ekosystemowych. Obejmuje ona obszary zielone (lub niebieskie w przypadku ekosystemów wodnych) oraz inne cechy fizyczne obszarów lądowych (w tym przybrzeżnych) oraz morskich. Na lądzie zielona infrastruktura jest obecna na obszarach wiejskich i w środowisku miejskim” [31]. Jej narzędzia umożliwiają czasowe zatrzymanie opadu na miejscu ich opadania, stwarzając warunki podobne do powierzchni nie przekształconych poprzez działania człowieka. Przyczyniając się do poprawy obiegu wody w zlewniach miejskich. Co więcej, gromadzenie wody przyczynia się do zmniejszenia objętości i redukcji spływu

z powierzchni, odciążając ich dopływ do systemów kanalizacyjnych. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metod oceny potencjału retencyjnego dowolnego obszaru, umożliwiających określenie możliwych kierunków rozwoju terenów zurbanizowanych aby w procesie adaptacji do zmian klimatycznych i w konsekwencji zmieniającego się środowiska, pozostały miejscami zdolnymi do życia w dającej się przewidzieć przyszłości.

## 2. Formalno-prawne uwarunkowania potencjału retencyjnego

W 2009 r. został przyjęty przez Komisję Europejską dokument strategiczny *Biała Księga – Adaptacja do zmian klimatu: europejskie ramy działania*, która stawia za cel zmniejszenie wrażliwości UE na skutki zmian klimatu. Stanowi podstawę do opracowania unijnej



Rys. 2. Schemat efektu synergii we wdrażaniu błękitno-zielonej infrastruktury [19]

Fig. 2. Diagram of the synergy effect in the implementation of blue-green infrastructure [19]

strategii adaptacyjnej dla państw członkowskich w celu ograniczenia wpływu zagrożeń klimatycznych [7]. Biała Księga poświęca uwagę czterem grupom działań na rzecz adaptacji [30]:

- 1) tworzenie trwałych podstaw wiedzy na temat oddziaływania i skutków zmian klimatu w UE;
- 2) włączenie adaptacji do kluczowych dziedzin politycznych UE;
- 3) stosowanie kombinacji instrumentów politycznych (instrumenty rynkowe, wytyczne, partnerstwa publiczno-prawne) oraz
- 4) nasilenie między narodowej współpracy w zakresie adaptacji.

Kolejnym dokumentem jest opracowany w 2014 r. *Plan ochrony zasobów wodnych Europy*, który kładzie nacisk na zwiększenie skuteczności polityki wodnej UE [33]. Osiągnięcie celu ma zostać zrealizowane przez uwzględnianie polityki wodnej w planowaniu innych obszarów polityki, przez to istotne jest odpowiednie zarządzanie i racjonalne gospodarowanie wodą z uwzględnieniem wszystkich użytkowników wody. W opracowaniu zaapelowano o wdrażanie działań wykorzystujących naturalną zieloną infrastrukturę oraz projektów w zakresie naturalnego potencjału retencyjnego [33].

Innym dokumentem jest przyjęta w 2020 r. *Nowa Karta Lipska*, która powstała w odpowiedzi na rozwój miast europejskich i związane w nimi wyzwania [14]. W Karcie wskazano na wdrażanie koncepcji zrównoważonego rozwoju obszarów miejskich, zapewniających mieszkańcom wysoką jakość życia. Transformacja miast ma odbywać się w trzech wymiarach: sprawiedliwe miasto, zielone miasto i produktywnie miasto. Transformacja w *zielone miasto* ma przyczynić się do stosowania zielonej i niebieskiej infrastruktury (inaczej błękitno-zielonej infrastruktury BZI), która stanowi warunek do „osiągnięcia czystego i zdrowego środowiska życia, adaptacji do zmian klimatu i zachowania i rozwoju bioróżnorodności w miastach” [33].

Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, określa że „woda nie jest produktem handlowym takim jak każdy inny, ale raczej dziedzictwem, które musi być chronione, bronię i traktowane jako takie” [1]. W ramach Dyrektywy państwa członkowskie zapewniają dla każdego obszaru dorzecza plany gospodarowania wodami w dorzeczu i utworzenie programów monitorowania stanu wód powierzchniowych, podziemnych i obszarów chronionych. Działania te mają przyczynić się do [1]:

- poprawy stanu ekosystemów wodnych,
- zwiększonej ochrony środowiska wodnego,
- stopniowej redukcji zanieczyszczeń wód,
- zmniejszenia skutków powodzi i suszy.

Innym dokumentem jest *Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim*, w której podkreślono, że „powodzie należą do naturalnych zjawisk, którym nie sposób zapobiec” [2]. Jej cele są odpowiedzią na zwiększające się prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi i zaostrzające się skutki ich wystąpienia. Osiągnięcie tych celów ma zostać zrealizowane poprzez stosowanie narzędzi ograniczających negatywne skutki powodzi. W ramach Dyrektywy państwa członkowskie na poziomie obszaru dorzecza lub jednostki zarządzającej [2]: dokonują wstępnej oceny ryzyka przeciwpowodziowego, przygotowują mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego, opracowują plany zarządzania ryzykiem powodziowym.

W ramach polityki krajowej w Polsce, w 2013 r. został opracowany przez Ministerstwo Środowiska *Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 w perspektywie do roku 2030*, który wskazuje działania adaptacyjne dla najbardziej wrażliwych sektorów i obszarów [39]:

- gospodarka wodna,
- różnorodność biologiczna i obszary prawnie chronione,
- leśnictwo,
- energetyka,

- strefa wybrzeża,
- obszary górskie,
- rolnictwo,
- transport,
- gospodarka przestrzenna i obszary zurbanizowane,
- budownictwo,
- zdrowie.

Strategia podkreśla podjęcie działań dotyczących polityki przestrzennej (cel 4, kierunek 4.2) ze względu na wrażliwość miast na zmiany klimatu. „*Ich wynikiem powinna być m.in. adaptacja instalacji sanitarnych i sieci kanalizacyjnych do zwiększonych opadów nawałnych, mała retencja miejska oraz zwiększenie obszarów terenów zieleni i wodnych w mieście*” [39]. Zidentyfikowano wskaźniki monitorowania, podmioty zaangażowane w realizację i finansowanie działań adaptacyjnych.

W 2019 r. uchwalono *Politykę ekologiczną państwa 2030*, która stanowi najważniejsze opracowanie w obszarze środowiska i gospodarki wodnej. Strategia stawia za cel rozwój potencjału środowiska na rzecz obywateli i przedsiębiorców. Skuteczność realizacji Strategii będzie realizowana za pomocą wskaźników, w ramach celu [29]: Środowisko i klimat, wskazano zwiększanie *pojemności obiektów małej retencji wodnej*, gdzie wartość bazowa to 826034,5 dam<sup>3</sup>, a wartość docelowa do 2030 r. 844836,0 dam<sup>3</sup> i *powierzchni parków, zieleńców i terenów zieleni osiedlowej w miastach w stosunku do powierzchni ogólnej*, gdzie wartość bazowa to 2,3 %, a wartość docelowa do 2030 r. powyżej 2,3 %.

W ramach polityki klimatycznej wskazano komponent *Adaptacja do zmian klimatu i zarządzania ryzykiem klęsk żywiołowych* (kierunek interwencji 7.11) w którym działania adaptacyjne ukierunkowane są na: „*opracowaniu i wdrożeniu dokumentów strategicznych/plani- stycznych z zakresie gospodarowania wodami, wsparciu opracowania i wdrażania planów adaptacji do zmian klimatu dla obszarów zurbanizowanych, budowie niezbędnej infrastruktury przeciwpowodziowej i obiektów małej retencji (...) renaturyzacji rzek i ich dolin, renaturyzacji mokradel (...) oraz rozwoju zielonej i błękitnej infrastruktury na terenach zurbanizowanych*” [29]. PEP2030 wskazuje na konieczność racjonalnego gospodarowania wodami opadowymi na obszarach miejskich przez ograniczanie uszczelniania terenu i zwiększanie powierzchni biologicznie czynnej. Działania zostały podzielone na zadania dla których zidentyfikowano horyzont czasowy, obszar i podmioty odpowiedzialne za ich realizację.

Kolejnym dokumentem uchwalonym w 2019 r. jest *Plan przeciwdziałania skutkom suszy* (PPSS). Jego cele obejmują odpowiedź na obserwowane zmiany poziomu zagrożenia wystąpienia suszy. PPSS wskazuje urbanizację za główną przyczynę przekształceń stosunków wodnych na obszarach miejskich (obniżanie potencjału retencyjnego zlewni i zaburzenie cyklu hydrologicznego) [38].

Dokument zawiera *Katalog działań służących przeciwdziałania skutkom suszy*, w którym wskazano na podejmowanie działań zatrzymywania wód opadowych (deszczowymi i roztopowymi) w miejscu opadu i wykorzystania ich w okresach suszy atmosferycznej. Działania te mają przyczynić się do opóźnienia odpływu wód w terenach zurbanizowanych oraz wzrostu ilości zasobów dyspozycyjnych w systemach rzecznych i poziomach wodonośnych. Zidentyfikowano jednostki samorządu terytorialnego jako organ odpowiedzialny za przygotowanie podstaw do realizacji działania i wdrożenie [38].

Inną strategią długoterminową jest *Program przeciwdziałania niedoborowi wody na lata 2021–2027 z perspektywą do roku 2030*. Jego cele obejmują odpowiedź na relatywnie niewielkie zasoby wodne w Polsce („*zgodnie z danymi GUS, w 2019 r. średnio na mieszkańca przypadało 1100 m<sup>3</sup>, a średnia europejska wynosi 2,5 raza więcej*” [35]) oraz występujące ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne. Osiągnięcie tych celów ma zostać zrealizowane poprzez wdrożenie kompleksowych działań, które zwiększą zdolność



do gromadzenia zasobów wodnych i przetrzymywania ich przez dłuższy czas w środowisku [15, 44]. Działania zostały podzielone na 14 typów powiązanych w innych dokumentami planistycznymi na szczeblu krajowym, regionalnym i lokalnym, należą do nich [35]:

- 1) renaturyzacji ekosystemów mokradłowych,
- 2) renaturyzacji rzek,
- 3) realizacja i odtwarzanie obiektów małej retencji i mikroretencji na terenach leśnych,
- 4) zalesianie, zadrzewianie oraz przebudowa drzewostanów,
- 5) realizacja i odtwarzanie obiektów małej retencji i mikroretencji na terenach rolniczych,
- 6) promowanie i wdrażanie zabiegów agrotechnicznych zwiększających retencję glebową,
- 7) realizacja i odtwarzanie stawów hodowlanych,
- 8) realizacja nowych oraz przebudowa istniejących systemów melioracyjnych w celu zapewnienia funkcji nawadniająco-odwadniającego,
- 9) tworzenie i odtwarzanie zadrzewień śródpolnych, przydrożnych i przywodnych,
- 10) realizacja obiektów retencjonujących wodę,
- 11) realizacja innych działań służących poprawie retencji wód,
- 12) przekształcanie wybranych suchych zbiorników przeciwpowodziowych w zbiorniki retencyjne wielofunkcyjne,
- 13) rekultywacja wyrobisk pogórnicznych w celu wykorzystania jako wielofunkcyjne zbiorniki retencyjne,
- 14) realizacja MPA oraz inne działania mające na celu zwiększenie retencji w miastach (m.in. m.in. błękitno-zielona infrastruktura, retencja wód opadowych i zwiększanie udziału powierzchni biologicznie czynnej).

Następnie wskazano obszar dorzecza, region wodny i priorytet realizacji działania w celu oszacowania uzyskanej retencji dla danego typu działania. Zidentyfikowano wielkość retencji możliwej do uzyskania, szacowany koszt i koszty jednostkowe w wyniku realizacji działań. W połowie 2022 r. uchwalono *Krajową Politykę Miejską 2030*, która ukierunkowana jest na zrównoważony rozwój miast i ich obszarów funkcjonalnych. Jej cele stanowią odpowiedź na aktualne wyzwania postawione przed miastami (demograficzne i klimatyczne) [16]. Osiągnięcie tych celów ma zostać zrealizowane przy pomocy narzędzi i rozwiązań, które pomogą samorządom miast i miejskim obszarom funkcjonalnym w zwiększeniu efektywności działań polityk zrównoważonego rozwoju [22]. W opracowaniu wskazano wyzwanie *Niwelowanie negatywnych skutków zmian klimatu w miastach* (wyzwanie IV). Wyzwanie te ma bardzo duże znaczenie dla kategorii wielkościowej miast – miasta duże. Proponowane kierunki rozwiązań do podjęcia to [22]:

- 1) wprowadzanie standardu ochrony i kształtowania zieleni w procesach inwestycyjnych,
- 2) upodmiotawianie prawne „*błękitno-zielonej infrastruktury*”,
- 3) gospodarowanie zasobami w układzie zlewniowym,
- 4) mechanizmy finansowe, legislacyjne i organizacyjne na rzecz zwiększania naturalnej retencji,
- 5) przeciwdziałanie powodziom miejskim oraz suszom i ich skutkom poprzez zmiany legislacyjne,

6) wprowadzanie planu zarządzania błękitno-zielonej infrastrukturą miasta (dalej plan zarządzania BZI) jako realizacji rekomendacji opracowania „*planu zazieleniania*”.

Dokumentem prawnym w zakresie określania retencyjnego miasta jest *ustawa w dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne*. W obowiązującej ustawie nastąpiła zmiana definiowania wód opadowych i roztopowych – „rozumie się przez to wody będące skutkiem opadów atmosferycznych” [40]. W związku w powyższym zostały wprowadzone nowe regulacje związane w gospodarowaniem wodami opadowymi w celu ochrony zasobów wodnych, należą do nich opłaty za odprowadzanie wód opadowych i roztopowych (tzw. *podatek od deszczu*):

„Art. 268. 1. Opłaty za usługi wodne uiszcza się za: 3) odprowadzanie do wód:

a) wód opadowych lub roztopowych ujętych w otwarte lub zamknięte systemy kanalizacji deszczowej służące do odprowadzania opadów atmosferycznych albo systemy kanalizacji zbiorczej w granicach administracyjnych miast, (...)

Art. 269. 1. Opłatę za usługi wodne uiszcza się także za:

1) zmniejszenie naturalnej retencji terenowej na skutek wykonywania na nieruchomości o powierzchni powyżej 3500 m<sup>2</sup> robót lub obiektów budowlanych trwale związanych z gruntem, mających wpływ na zmniejszenie tej retencji przez wyłączenie więcej niż 70% powierzchni nieruchomości z powierzchni biologicznie czynnej na obszarach nieujętych w systemy kanalizacji otwartej lub zamkniętej;” [40].

W ustawie zostały określone zasady prowadzenia ochrony przeciwpowodziowej, gdzie podkreślone są działania nietechniczne:

„Art. 165. 1. Ochronę przed powodzią realizuje się w szczególności przez:

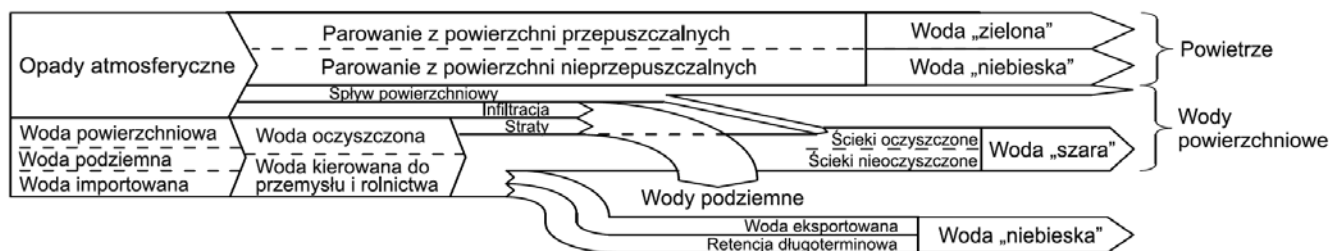
2) racjonalne retencjonowanie wód oraz użytkowanie budowli przeciwpowodziowych, a także sterowanie przepływami wód; (...)

4) zachowanie, tworzenie i odtwarzanie systemów retencji wód;” [40].

Kolejnym dokumentem prawnym jest *Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, w którym podkreślono, że „§28 1. Działka budowlana, na której sytuowane są budynki, powinna być wyposażona w kanalizację umożliwiającą odprowadzenie wód opadowych do sieci kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej. 2. w razie braku możliwości przyłączenia do sieci kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej, dopuszcza się odprowadzanie wód opadowych na własny teren nieutwardzony, do dołów chłonnych lub do zbiorników retencyjnych.” [37]. Rozporządzenie wskazuje na „dokonywanie zmiany naturalnego spływu wód opadowych w celu kierowania ich na teren sąsiedniej nieruchomości” [37].

### 3. Narzędzia i wskaźniki analityczne

*Water FootPrint (WFTP)* to bezwymiarowy wskaźnik pokazujący objętość wody zużytej (woda niebieska, woda zielona i woda szara) [3]. Na rysunku 3 przedstawiono strumienie wody w mieście na potrzeby obliczeń wartości wskaźnika WFTP. Niebieski WFTP to



Rys. 3. Strumienie wody w mieście na potrzeby obliczeń wartości wskaźnika WFTP [3]

Fig. 3. Water streams in the city for the purposes of calculating the WFTP index value [3]

ta objętość wód pochodzących z wód powierzchniowych lub podziemnych (jezior, rzek, terenów podmokłych i warstw wodonośnych), która została zużyta w określonym czasie wody (wyparowała, została włączona do produktu, pobrana z jednego zbiornika wodnego i zwrócona do innego, albo zwrócona w innym czasie) [3, 18]. Zielony WFTP odnosi się do wód pochodzących z wód opadowych, które nie spływają z powierzchni i nie zasilają wód podziemnych, ale są magazynowane w strefie korzeniowej, gdzie następnie jest tracona przez parowanie lub pobierana przez rośliny [3, 18]. Szary WFTP to objętość wody wymaganej do rozcieńczenia zanieczyszczeń zawartych w ściekach, która spełnia wymagania dotyczące jakości wody [3, 18].

W odniesieniu do miasta jest stosowany w celu zwiększenia efektywności działania systemu oczyszczania i dystrybucji wody oraz oczyszczania i odprowadzania ścieków. Wspomaga proces zarządzania i gospodarowania zasobami wodnymi. Wartość wskaźnika WFTP w miastach składa się na bilans wody rzeczywistej i wirtualnej w skali roku [3]. Woda rzeczywista składa się na strumień wody napływającej (pochodzącej z opadów atmosferycznych, ujęć wód do zaopatrzenia na cele konsumpcyjne, przemysłowe i rolnicze, oraz import wody i opuszczającej miasto) i odpływającej z miasta (podlegającej procesom: parowania, infiltracji, spływu powierzchniowego, działalności przemysłowej i rolniczej oraz eksportowi poza miasto) [3]. Woda wirtualna jest wykorzystywana do produkcji i dostarczenia produktów, usług i energii, wymaganych do wytworzenia jednostki wody rzeczywistej, która trafia do konsumenta [3]. Ogólny bilans wody rzeczywistej w mieście, można obliczyć z poniższego równania (1) [3]:

$$Q_r = Q_n - Q_w \quad (1)$$

gdzie:

$Q_r$  – retencja wody w mieście [ $m^3/a$ ],  
 $Q_n$  – woda napływająca do miasta [ $m^3/a$ ],  
 $Q_w$  – woda wypływająca z miasta [ $m^3/a$ ].

Aby obliczyć wartość wskaźnika WFTP<sub>r</sub> w mieście, uwzględniając wodę rzeczywistą, należy zastosować wzór [3]:

$$WFTP_r = WFTP_n + WFTP_z + WFTP_s \quad (2)$$

gdzie:

WFTP<sub>n</sub> – niebieski WFTP,  
WFTP<sub>z</sub> – zielony WFTP,  
WFTP<sub>s</sub> – szary WFTP.

W artykule *Urban Water Footprint – system monitorowania i oceny gospodarowania wodą w miastach* [3] wskaźnik WFTP został zastosowany dla Wrocławia (na podstawie danych z *Rocznika Statycznego Wrocławia 2012*). Wartość wskaźnika WFTP w przeliczeniu na jednego mieszkańca wyniosła  $1568,73 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{os}$ , na który składa się:

WFTP<sub>n</sub> =  $36,98 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{os}$ ,  
WFTP<sub>z</sub> =  $55,17 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{os}$ ,  
WFTP<sub>s</sub> =  $107,50 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{os}$ ,  
WFTP<sub>r</sub> =  $199,65 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{os}$ ,  
WFTP<sub>v</sub> =  $1369,10 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{os}$ .

Przy obliczaniu zielonego WFTP wskazano, że gdyby przy terenach przepuszczalnych uwzględnić [3]: lasy, tereny zadrzewione, tereny zieleni publicznej i wysypiska (suma ich powierzchni to 3629 ha), bez użytków rolnych o powierzchni 12500 ha, wskaźnik zmalałby z  $34,82 \text{ mln m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  do  $7,61 \text{ mln m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ . Z ogólnego bilansu wód rzeczywistych w mieście, retencja wody we Wrocławiu wyniosła  $6,6 \text{ mln m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  [3].

Soil Conservation Service (SCS) to metoda do wyznaczenia opadu efektywnego, który uzależniony jest od rodzaju gleby, struktury użytkowania ziemi, charakteru pokrywy roślinnej i stanu uwilgotnienia zlewni przed wystąpieniem opadu [20,28]. W pierwszym etapie nale-

ży przypisać rodzaj gleby występującej na analizowanym obszarze do odpowiedniej grupy glebowej w zależności od struktury użytkowania ziemi i charakteru pokrywy roślinnej (cztery rodzaje grup: A, B, C i D). Po przypisaniu do grup glebowych, wyznacza się parametr CN (Curve Number), który przyjmuje wartości od 0 do 100 (wartość CN = 0 to powierzchnia o dużej przepuszczalności, a CN = 100 to powierzchnia o małej przepuszczalności). Parametr CN należy dobrać dla stanu uwilgotnienia zlewni na podstawie sumy opadów z 5 dni ( $P_5$ ) poprzedzających wystąpienie opadu [mm] [20,28]. Poziom I oznacza niski stopień uwilgotnienia zlewni, natomiast poziom III oznacza wysokie uwilgotnienie (poprzedzające intensywne opady). Poziom II (przeciętny) w okresie poza wegetacyjnym oznacza sumę opadów w przedziale:  $13 \text{ mm} \leq P_5 < 28 \text{ mm}$ , a w okresie wegetacyjnym w przedziale:  $35 \text{ mm} \leq P_5 < 53 \text{ mm}$ . Następnie na podstawie wartości parametru CN określana jest maksymalna potencjalna retencja zlewni [mm], którą opisuje równanie [28]:

$$R = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

gdzie:

R – potencjalna retencja zlewni [mm],

CN – parametr CN po korekcie poziomu uwilgotnienia zlewni [mm].

Na kolejnym etapie określana jest wielkość strat początkowych  $S_p$ , czyli części opadu która nie dostała się do koryta przez intercepcje, infiltracje itp. [20,28]. Następnie wyznaczany jest skumulowany opad efektywny  $P_e(t)$  czyli część opadu całkowitego  $P(t)$  po odjęciu strat początkowych  $S_p$  i potencjalnej retencji zlewni R [20]. Wyznaczając skumulowaną infiltrację  $F(t)$  należy obliczyć różnicę pomiędzy opadem całkowitym  $P(t)$ , stratami początkowymi  $S_p$  i skumulowanym opadem efektywnym  $P_e(t)$  [28].

Metoda SCS została wykorzystana w *Programie Zwiększania Retencyjności Ziemi Dzierżoniowskiej na lata 2014-2020* [36] do określenia potencjalnych zdolności retencyjnych dla wydzielonych zlewni. Do obliczenia parametru CN zostały przeanalizowane czynniki: struktura użytkowania powierzchni zlewni, rodzaj gleb, sposób uprawy i warunki hydrologiczne. W Programie wartość parametru CN uległa korekcie przez duże zróżnicowanie rzeźby terenu (obszary o nachyleniu do 5%) przy pomocy zależności *Sharpley i Williams (1990)* i duże przestrzenne zróżnicowanie uwilgotnienia gleb przy wykorzystaniu *topograficznego indeksu wilgotności TIW*. Aby obliczyć parametr  $CN_{2ST}$ , należy zastosować wzór [36]:

$$CN_{2ST} = CN_{2s} + \left( \frac{CN_3 - CN_1}{5} \right) \left( 1 - 2 \exp \left( -8,66 \frac{TIW}{100} \right) \right) \quad (4)$$

gdzie:

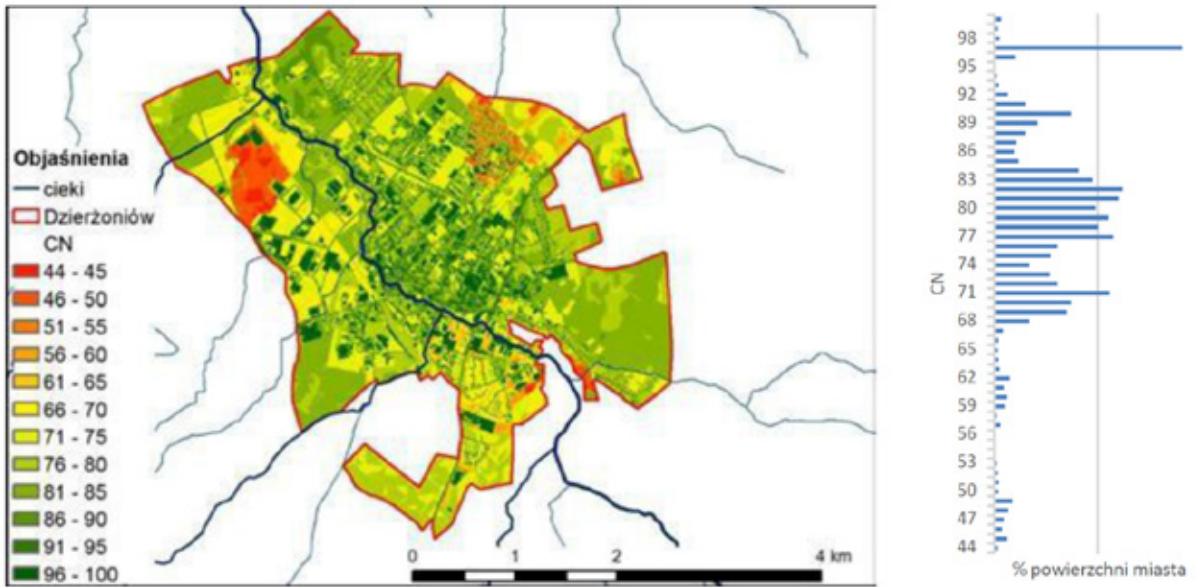
$CN_{2ST}$  – wartość parametru CN2 dla warunków hydrologicznych skorygowana o spadki terenu i wilgotność gleb,

CN3 i CN1 – wartość parametru CN według metody SCS dla warunków suchych i wilgotnych,

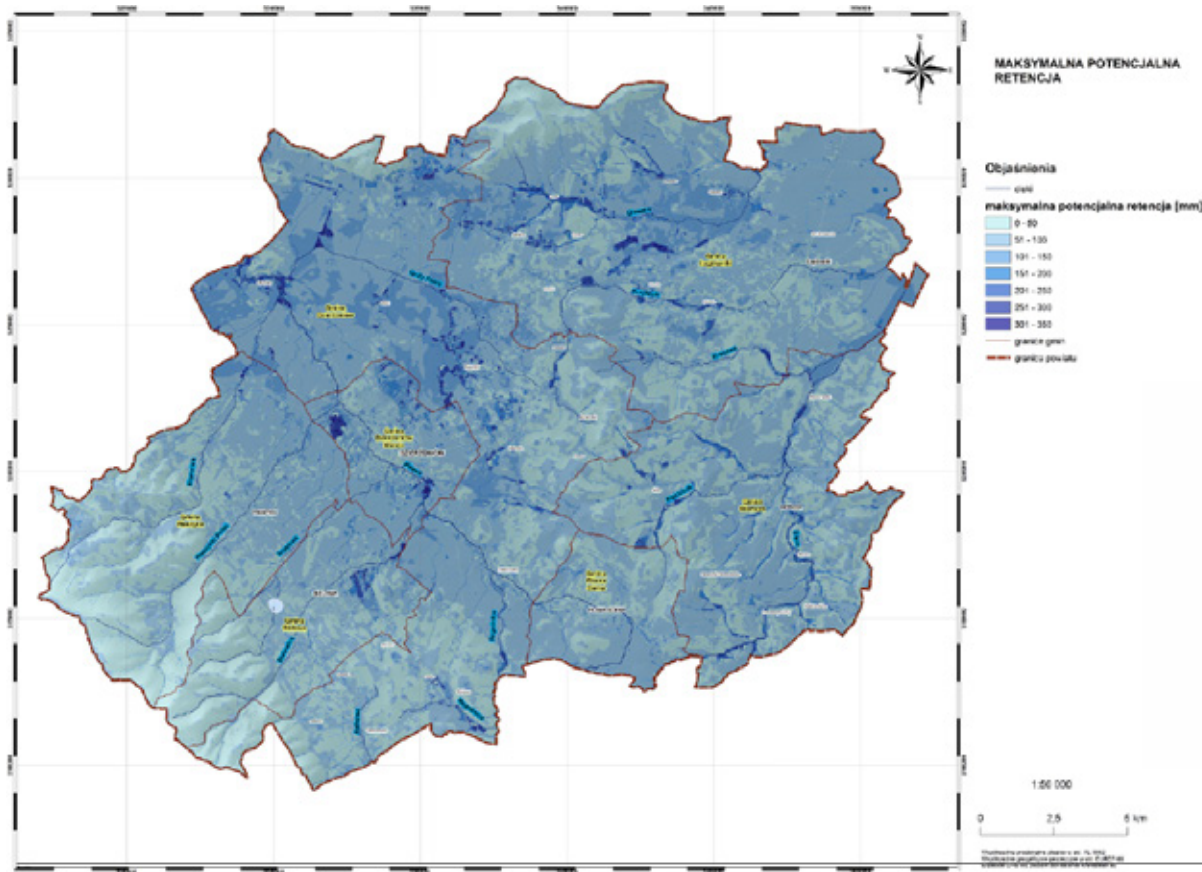
$CN_{2s}$  – wartość parametru CN2 dla warunków hydrologicznych przeciętnych skorygowana o spadki terenu,

TIW – wartość topograficznego indeksu wilgotności.

Przy obliczaniu opadu efektywnego wykonano wariantowo dla opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% dla czasu trwania: 1h, 12h i 72h. W Programie znalazł się rozdział *Potencjał retencyjny obszarów zurbanizowanych*, gdzie oceniono zdolności retencyjne miast i wsi powiatu Dzierżoniowskiego. W tym celu została przeprowadzona analiza warunków fizjograficznych i glebowych, sposób zagospodarowania terenu oraz głębokość zalegania wód gruntowych. Na potrzeby małej retencji oceniono stan techniczny istniejących urządzeń wodnych istotnych dla kształtowania zdolności retencyjnych [36]. W oparciu o wyznaczone czynniki, parametr CN dla miasta Dzierżoniów przyjmuje wartości w zakresie od 44 do 100 z średnią wartością 79,01 (średnie zdolności retencyjne) (rys. 4). Na podstawie obliczeń w Programie została przedstawiona



Rys. 4. Zmienność parametru CN i udział procentowy dla miasta Dzierżonów [36]  
 Fig. 4. Variability of the CN parameter and percentage share for the city of Dzierżonów [36]



Rys. 5. Maksymalna potencjalna retencja na Ziemi Dzierżonowskiej [36]  
 Fig. 5. Maximum potential retention in Dzierżonów Land [36]

maksymalna potencjalna retencja (w zakresie wartości od 0 do 350 mm) dla Ziemi Dzierżonowskiej (rys. 5). Maksymalna potencjalna retencja wyniosła 69 mm. Obszary o małych spadkach i gruntach o bardzo dobrym charakterze przepuszczalności posiadają największe zdolności retencyjne, a te o dużych spadkach i gruntach o słabym charakterze przepuszczalności mają najniższe zdolności retencyjne.

Zintegrowany wskaźnik potencjalnych zdolności retencyjnych ( $ZWR_{i,j}$ ) to metoda do określenia potencjalnych zdolności reten-

cyjnych zlewni rzecznych. Metoda polega na obliczaniu wpływu istotnych w danym regionie parametrów fizjograficznych (miara potencjalnych zdolności retencyjnych) dla każdej z wydzielonych elementarnych powierzchni. Opracowana oryginalna metoda została wykorzystana do oceny potencjalnych zdolności retencyjnych dla obszaru Regionu Wielkopolski [25]. W pierwszym etapie obliczono 6 parametrów fizjograficznych dla każdego jednorodnego kwadratowego płata powierzchni o bokach długości 4 km [25]: lesistość

[%], jeziorność [%], gęstość sieci cieków [km/km<sup>2</sup>], średni ważony współczynnik filtracji gleb [mm/s], średni spadek terenu [%] i średnia miąższość [m].

W kolejnym etapie podzielono zakresy zmian dla obliczonych 6 parametrów fizjograficznych na 10 klas dla których przypisano kody zdolności retencyjnych (wg autora są wielkościami niemianowanymi) w zakresie od 1 do 10 (1-3 to małe zdolności retencyjne, 4-7 to średnie zdolności retencyjne, a 8-10 to duże zdolności retencyjne). Kody „przypisywano wraz ze wzrostem zalesiania, jeziorności i miąższości oraz zmniejszeniem się gęstości sieci cieków, średniego współczynnika filtracji gleb i średniego spadku terenu” [25]. Jeśli kody będą przyjmowały wielkości w zakresie małych i dużych zdolności retencyjnych w ramach danego rastra to algorytm obliczeń jest następujący: gdy dla grupy małych zdolności retencyjnych kody zdolności retencyjnych wynoszą 2, 3 i 4 bądź więcej to wartość kodów jest pomniejszana o 1, 1,5 lub 2, analogicznie dla grupy dużych zdolności retencyjnych to wartości kodów powiększane są o 1, 1,5 lub 2. Dobór wag oddziaływania dla obliczonych 6 parametrów fizjograficznych na zdolności retencyjne prowadzono metodą Monte Carlo (losowanie zestawu wag i sprawdzanie kryterium optymalności doboru). Kryterium „tym będzie wartość współczynnika korelacji pomiędzy współczynnikami nieregularności odpływu  $\beta$  (przyjmowanymi jako miary retencyjności zlewni) a zintegrowanym wskaźnikami potencjalnych zdolności retencyjnych ZWR ( $W_{(i,j)}$ ) (zależnymi od przyjętego zestawu wag (...))” [25]. Wskaźnik potencjalnych zdolności retencyjnych (ZWR<sub>*i,j*</sub>) dla rastra o współrzędnych *i, j* opisuje równanie [25]:

$$ZWR(i,j) = M_{las(i,j)} \cdot W_{las} + M_{jez(i,j)} \cdot W_{jez} + M_{ciek(i,j)} \cdot W_{ciek} + M_{gleb(i,j)} \cdot W_{gleb} + M_{spad(i,j)} \cdot W_{spad} + M_{miaz(i,j)} \cdot W_{miaz} \quad (5)$$

gdzie:

$M_{las(i,j)}$ ,  $M_{jez(i,j)}$ ,  $M_{ciek(i,j)}$ ,  $M_{gleb(i,j)}$ ,  $M_{spad(i,j)}$  i  $M_{miaz(i,j)}$  – kody zdolności retencyjnych dla rastra o współrzędnych *i, j* związane odpowiednio z lesistością, jeziornością, siecią cieków, utworami glebowymi, spadkiem terenu i miąższości warstwy przepuszczalnej,  $W_{las}$ ,  $W_{jez}$ ,  $W_{ciek}$ ,  $W_{gleb}$ ,  $W_{spad}$  i  $W_{miaz}$  – wagi oddziaływania związane odpowiednio z lesistością, jeziornością, siecią cieków, utworami glebowymi, spadkiem terenu i miąższości warstwy przepuszczalnej w sumarycznej ocenie potencjalnych zdolności retencyjnych.

Aby obliczyć stosowane średnie wartości wskaźnika ZWR<sub>*i,j*</sub> dla analizowanych rastrów, należy zastosować wzór [25]:

$$ZWR = \frac{1}{L_{rastr}} \sum_{i,j} ZWR_{(i,j)} \quad (6)$$

gdzie:

ZWR<sub>*i,j*</sub> – zintegrowany wskaźnik potencjalnych zdolności retencyjnych,

$L_{rastr}$  – liczba rastrów pokrywających daną powierzchnię.

*Landscape Hydric Potential (LHP)* to bezwymiarowy wskaźnik warunków środowiskowych określający „zdolność obszaru do spowalniania i zatrzymywania odpływu oraz infiltracji opadów do gruntu” [23, 42]. LHP może być wykorzystywany do oceny użytkowania terenu i wpływu kluczowych parametrów zlewni na opóźnienie odpływu i retencję wody w zlewni [42]. Metoda umożliwia wykorzystanie atrybutów środowiskowych do efektywnego zarządzania zasobami wodnymi [23]. Wskaźnik przyjmuje wartości w zakresie od -10,1 do 20,1 (-10,1 to całkowicie niekorzystne warunki do retencji, a 20,1 to doskonałe warunki do retencji) [42]. Rozkład przestrzenny LHP to wynik algebry map (sumy wag atrybutów środowiskowych), którą opisuje równanie [42, 43]:

$$LHP = 1,5H + 2,5St + 3Ss + 4CWB + 3Si + 3,5F + 2N \quad (7)$$

gdzie:

H – atrybut warunków hydrogeologicznych (przewodność podłoża),  
St – atrybut warunków glebowych (typ gleb),

Ss – atrybut tekstury gleby (uziarnienie gleby),

CWB – atrybut warunków klimatycznych (klimatyczny bilans wodny),

Si – atrybut warunków geomorfologicznych (nachylenie terenu),

F – atrybut stanu zbiorowisk leśnych (stabilność drzewostanu),

N – atrybut pokrycia i użytkowania terenu.

Metoda została wykorzystana do oceny zmian pokrycia i użytkowania terenu *Land Use and Land Cover (LULC)* na parametr LHP a trendami przepływów rzek w zlewniach w dorzeczu górnej Wisły w okresie 1990–2018 (tab. 1). Analiza danych przestrzennych została zrealizowana przy użyciu oprogramowania GIS. Wyniki badań przedstawiają zmniejszenie wartości LHP w 21 zlewniach i zwiększenie w 12 zlewniach [43]. Obniżenie wskaźnika LHP nastąpiło przez intensywną antropopresję (obszary rolnicze, przemysłowe i miejskie), która negatywnie wpływa na środowisko naturalne i sieci hydrograficzne [42,43]. Działania te „wskazują, że w zlewniach zmniejsza się zdolność zatrzymania opadu poprzez zmniejszenie możliwości infiltracji co objawia się zmniejszaniem przepływów niskich i zwiększaniem wysokich” [42]. Zwiększenie wskaźnika było niewielkie i spowodowane przez wzrost lesistości (obszary naturalne w tym parki narodowe i inne prawnie chronione [42]), które pozytywnie wpływają na retencje wody w zlewni.

*Analytical Hierarchy Process (AHP)* to metoda wielokryterialna do hierarchicznego rozwiązywania problemów decyzyjnych. W pierwszym etapie należy wyznaczyć hierarchię elementów struktury procesu decyzyjnego, który składa się z kilku poziomów. Najwyższy poziom w hierarchii stanowi cel decyzyjny, który decydent chce osiągnąć. Na poziomie pośrednim wyznaczane są kryteria oceny decyzji. Najniższy poziom w hierarchii zajmują warianty decyzyjne (rozwiązania). W drugim etapie następuje ocena ważności poprzez porównanie parami elementów hierarchii (z wyjątkiem najwyższego poziomu), w oparciu o porównania tworzone są macierze kwadratowe. Do etapu drugiego jest wykorzystywana fundamentalna skala porównań Thomasa L. Saatiego, która zakłada wartości w zakresie od 1 do 9. W trzecim etapie należy ocenić spójność macierzy. W czwartym etapie jest wyznaczany ranking końcowy poszczególnych rozwiązań [21, 27]. Metoda została wykorzystana w zlewni rzeki Skórzynki (Poznański Obszar Metropolitalny) do wyznaczenia „najkorzystniejszego wariantu ochrony przed powodzią, suszą i deficytem wody poprzez poprawę zdolności retencyjnych zlewni” [27] przez zachodzący proces rozlewania się miasta, kosztem użytków rolnych. Obszar objęty badaniami „znajduje się w strefie priorytetowej rozwoju małej retencji” [27]. Cel decyzyjny w strukturze hierarchicznej w tym przypadku to „ochrona przed powodzią, suszą i deficytem wody poprzez poprawę zdolności retencyjnych zlewni” [27]. Kolejny poziom to kryteria decyzyjne, które wpływają na wybór optymalnego rozwiązania, należą do nich: *społeczno-ekonomiczne, retencyjne, środowiskowe i przestrzenne*. W pracy przyjęto różne warianty decyzyjne, które doprowadzą decydenta do osiągnięcia celu decyzyjnego: „budowa zbiornika małej retencji, zabiegi agrotechniczne i zdecentralizowane systemy zagospodarowania wody deszczowej” [27]. Ponadto, przyjęto współczynniki wag wg opinii ekspertów dla kryteriów i wariantów rozwiązań. Prace analityczne wskazują za najważniejsze rozwiązanie kryterium *retencyjne* i wariant *zabiegi agrotechniczne* w celu poprawy retencyjności zlewni [27].

*Water Retention Index (WRI)* to bezwymiarowy wskaźnik do ogólnej oceny zdolności retencyjnych zlewni, który uwzględnia zdolności parametrów fizjograficznych do przechwytywania/utrzymania wody przez [41]: wody podziemne ( $R_{gw}$ ), glebę ( $R_s$ ), wody powierzchniowe ( $R_{wb}$ ), roślinność ( $R_v$ ) oraz wpływ uszczelnienia i nachylenia terenu. Metoda przedstawia miejsca wystąpienia deficytu wody w zlewni do zatrzymania wody dlatego może być wykorzystana do intensyfikacji optymalnych rozwiązań retencyjnych do wspierania polityki w zmniejszaniu zasięgu i stopnia zmian klimatycznych [41]. Para-



Tab. 1. Zmiany wartości LHP w zlewniach dorzecza górnej Wisły w latach 1990–2018 [42]

Tab. 1. Changes in LHP values in the catchments of the upper Vistula river basin in the years 1990–2018 [42]

Kod zlewni	Rzeka – przekrój	Krajowy Potencjał Hydryczny (LHP)					Δ LHP 1990–2018
		1990	2000	2006	2012	2018	
C10	Wapienica – Podkępie	13,34	13,17	10,52	10,36	10,36	-2,98
C19	Skawa – Jordanów	6,91	6,2	5,83	5,88	5,85	-1,07
C17	Krzczonówka – Krzczonów	7,73	7,70	6,56	6,93	6,92	-0,81
C7	Prądnik – Ojców	7,37	7,20	6,77	6,61	6,59	-0,78
C22	Dunajec – Nowy Targ	10,33	10,33	8,54	9,56	9,69	-0,64
C14	Wieprzówka – Rudze	8,17	8,11	7,57	7,54	7,54	-0,62
C1	Bobrza – Słowik	11,40	10,96	10,93	10,79	10,79	-0,61
C8	Szreniawa – Biskupice	7,08	6,69	6,40	6,50	6,50	-0,58
C4	Mierzawa – Michałów	10,70	10,35	10,24	10,38	10,32	-0,38
C9	Uszwica – Borzęcin	6,48	6,32	6,09	6,13	6,11	-0,37
C28	Stobnica – Godowa	8,19	8,13	7,82	7,89	7,85	-0,34
C18	Lubieńka – Lubień	6,78	6,78	6,08	6,58	6,54	-0,25
C20	Raba – Rabka	8,02	7,95	6,94	7,84	7,85	-0,17
C33	San – Zatwarnica	13,50	13,42	13,30	13,34	13,35	-0,15
C3	Koprzywnica – Koprzywnica	9,22	9,16	9,09	9,09	9,08	-0,14
C24	Ochotnica – Tylmanowa	8,45	8,12	8,21	8,34	8,34	-0,12
C21	Mszanka – Mszana Dolna	6,91	6,56	6,37	6,80	6,82	-0,10
C32	Wetlina – Kalnica	13,40	13,39	13,32	13,32	13,34	-0,06
C2	Czarna – Raków	13,53	13,53	13,59	13,49	13,47	-0,06
C5	Biała Przemsa – Niwka	9,70	9,80	10,08	9,75	9,68	-0,03
C16	Skawica – Skawica Dolna	8,77	8,75	8,34	8,82	8,82	0,05
C29	Wisłok – Puławy	13,84	13,80	13,58	13,93	13,92	0,08
C30	Oslawa – Szczawne	12,47	12,41	12,38	12,54	12,55	0,08
C15	Stryżawka – Sucha	8,11	8,12	7,58	8,24	8,24	0,13
C25	Grajcarek – Szczawnica	7,76	7,76	7,93	7,90	7,90	0,14
C26	Kamienica – Nowy Sącz	7,24	7,22	7,17	7,43	7,43	0,19
C27	Biała – Grybów	6,24	6,40	6,45	6,49	6,49	0,25
C31	Czarny – Polana	12,98	13,08	13,23	13,25	13,25	0,28
C23	Białka – Łysa Polana	10,71	10,62	10,85	11,24	11,11	0,40
C13	Żabniczanka – Żabnica	14,97	15,19	15,44	15,46	15,46	0,49
C11	Wisła – Wisła	19,50	19,61	19,73	20,36	20,15	0,65
C12	Bystra – Kamesznica	16,23	16,29	15,97	16,87	16,93	0,70

metry przyjmują wartości w zakresie od 0 do 10 w oparciu o ich wpływ na ogólną zdolność retencyjną na podstawie literatury (z uwagą na uszczelnione tereny, które nie mają zdolności retencyjnych), w oparciu o wyniki analizy wrażliwości należy przypisać wagi do parametrów w celu połączenia ich i uzyskania równego wpływu na ostateczną postać wskaźnika [41]. Aby obliczyć WRI, należy zastosować wzór [41]:

$$WRI = (w_v R_v + w_{gw} R_{gw} + w_s R_s + w_{sl} R_{sl} + w_{wb} R_{wb}) \cdot \left(1 - \frac{R_{ss}}{100}\right) \quad (8)$$

gdzie:

$w_v, w_{gw}, w_s, w_{sl}, w_{wb}$  – waga parametru związana odpowiednio z roślinnością, wodą podziemną, glebą, nachyleniem terenu i wodą powierzchniową,

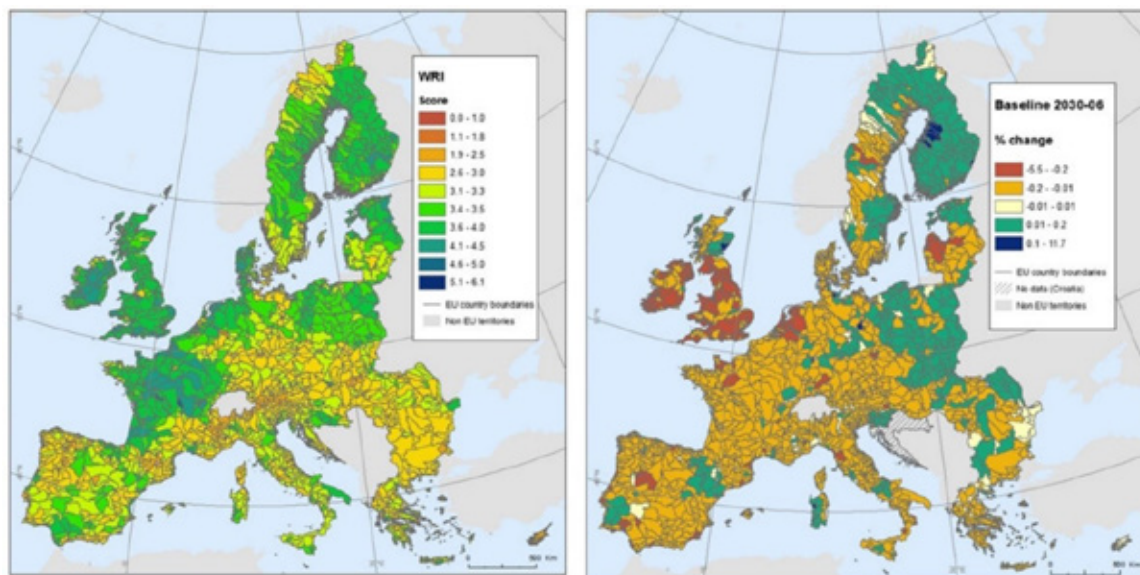
$R_v, R_{gw}, R_s, R_{sl}, R_{wb}, R_{ss}$  – ocena parametru związana odpowiednio z roślinnością, wodą podziemną, glebą, nachyleniem terenu, wodą powierzchniową i uszczelnieniem terenu.

Metoda została wykorzystana dla scenariuszy zagospodarowania terenu do 2030 w Europie (opracowanych w platformie LUISA) w których została zwiększona powierzchnia użytków zielonych

w górnym biegu rzeki oraz terenów zalesionych w górnym biegu rzeki i nadbrzeża. Wartość wskaźnika od 2006 do 2030 przedstawiła obszary w których mogą pojawić się problemy. Większą część stanowią obszary, w których wartość wskaźnika zmniejszyła się przez powiększające się obszary miejskie i związane z nimi procesy pogarszające zdolności krajobrazu do właściwej regulacji wody. Najwyższe wartości WRI dla roku bazowego wystąpiły w północnej części Europy ze względu na niskie uszczelnienie powierzchni, wysokie wartości wskaźnika pokrycia liściowego i gęstości wód powierzchniowych. Natomiast najniższe wartości wskaźnika występują w regionach górskich przez niską wartość wskaźnika pokrycia liściowego i retencje wody w glebie [41]. Po zmianie w czasie wartość WRI zmniejsza się w zachodniej części Europy z kolei zwiększa się w krajach skandynawskich i wschodniej części Europy (rys. 6).

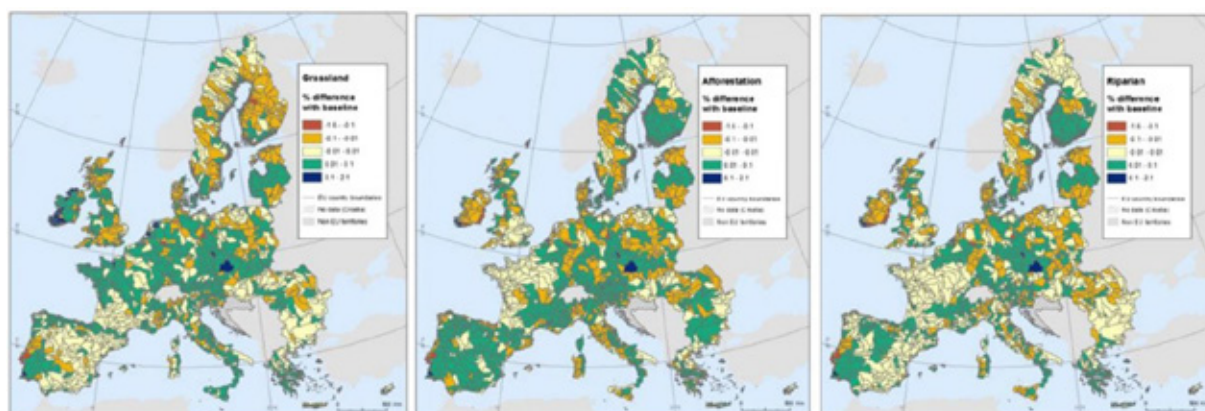
Scenariusz wdrażający działanie ze zwiększoną powierzchnią terenów zalesionych uzyskał najlepsze wyniki w czasie. Jednak wyniki wskazały duże zróżnicowanie przestrzenne, dowodzi to że najlepsza strategia zarządzania zależy wymagań obszaru w którym





Rys. 6. Indeks WRI dla scenariusza bazowego (po lewej) i zmian między 2006, a 2030 na poziomie dorzecza (po prawej) [41]

Fig. 6. WRI index for the baseline scenario (left) and changes between 2006 and 2030 at the river basin level (right) [41]



Rys. 7. Indeks WRI dla każdego scenariusza z wartością bazową na poziomie dorzecza [41]

Fig. 7. WRI index for each scenario with baseline at river basin level [41]

zostanie zaaplikowana. Wyniki wykazały, że proponowane działania poprawiły wartość wskaźnika w czasie [41] (rys. 7).

Powszechnie już dostępnymi narzędziami do oceny wskaźników przestrzennych w Polsce są takie rozwiązania jak Geoportał, Hydroportal, lokalne geoportale jednostek samorządu terytorialnego oraz rozwiązania komercyjne jak platforma Scalgo lub e-mapy. Portal internetowy Geoportał zapewnia dostęp do aktualnych i wiarygodnych danych geoprzestrzennych i związanych z nimi usług. Witryna umożliwia wyszukiwanie, przeglądanie, pobieranie i przekształcanie zbioru baz danych geoprzestrzennych [13]. Portal zawiera między innymi [5]:

- dane ewidencyjne,
- dane o charakterze katastralnym,
- numeryczne dane wysokościowe,
- bazy danych obiektów topograficznych,
- mapy tematyczne (hydrograficzna, sozologiczna).

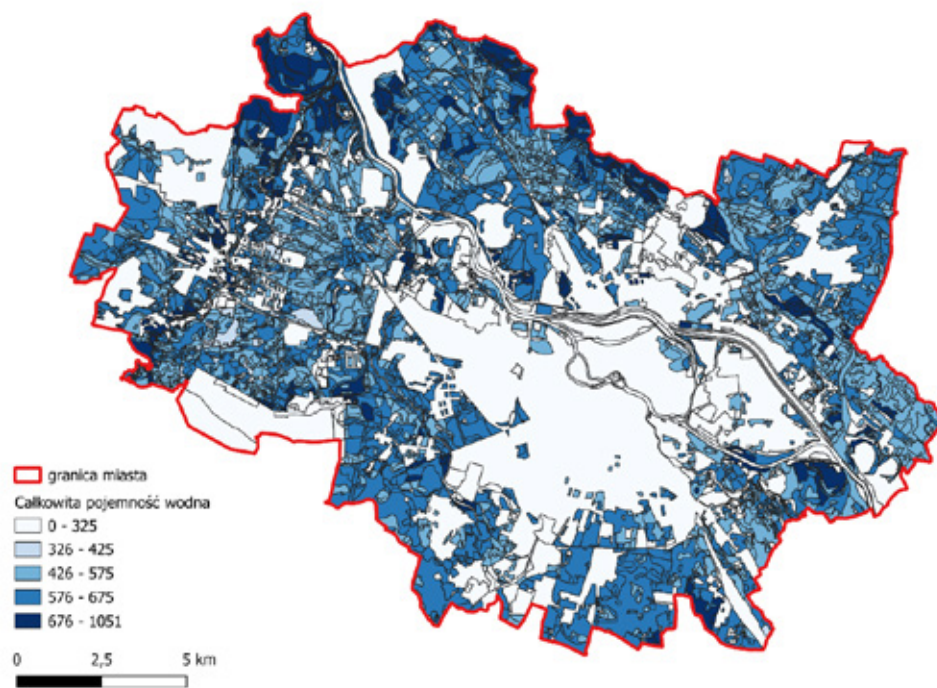
Dobrym przykładem rozwiązania lokalnego jest prowadzony przez Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego mapowy portal internetowy **Geoportał Dolny Śląsk**, zapewniający dostęp do własnych danych przestrzennych. W katalogu zasobów portalu udostępnione jest opracowanie dotyczące *Oceny wody w glebie i zagrożenia suszą w oparciu o bilans wodny dla obszaru*

*województwa dolnośląskiego*, które powstało na podstawie mapy glebowo-rolniczej w skali 1:5000 i danych z Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej w Polsce. Znaleźć w nim można mapy dotyczące [7]:

- całkowitej pojemności wodnej gleby (rys. 8),
- podatności gleb na suszę rolniczą uwzględniającą efektywną strefę korzeniową (rys. 9),
- opadu w okresie wiosennym,
- opadu w okresie wegetacyjnym,
- opadu rocznego,
- potencjalnego zagrożenia suszą,
- zasięgu występowania zagrożenia suszą rolną,
- typu genetycznego gleb,
- wody niedostępnej dla roślin.

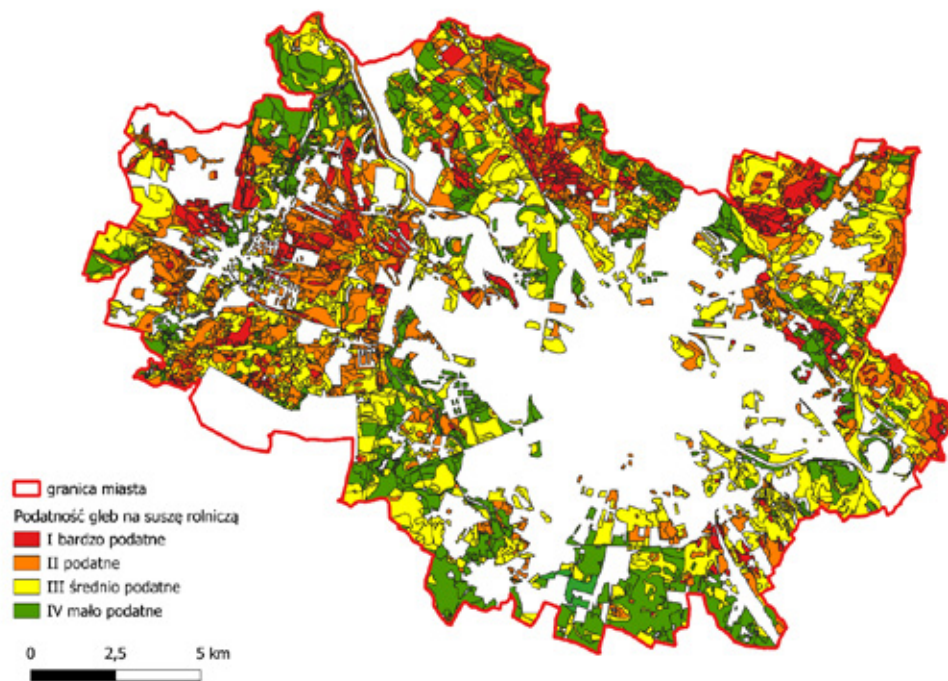
Na podstawie danych i materiałów udostępnionych przez Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej we Wrocławiu opracowano mapy dla Wrocławia, przedstawiające całkowitą pojemność wodną gleby oraz podatność gleb na suszę rolniczą uwzględniającą efektywną strefę korzeniową, odpowiednio na rysunkach 8 i 9.

**Hydroportal** to portal internetowy, który zapewnia bezpośredni dostęp do informacji z szeroko pojętej tematyki gospodarki wodnej



Rys. 8. Całkowita pojemność wodna gleby na przykładzie Wrocławia (opracowanie własne)

Fig. 8. Total water capacity of the soil on the example of Wrocław (own study)



Rys. 9. Podatność gleb na suszę rolniczą uwzględniającą efektywną strefę korzeniową na przykładzie Wrocławia (opracowanie własne)

Fig. 9. Soil susceptibility to agricultural drought taking into account the effective root zone on the example of Wrocław (own study)

i ochrony środowiska [8, 12]. Katalog zasobów zawiera mapy dotyczące [8, 12]:

1. Wstępna ocena ryzyka powodziowego.
2. Mapy zagrożenia powodziowego.
3. Mapy ryzyka powodziowego.
4. Plany gospodarowania wodami.
5. Plany zarządzaniem ryzykiem powodziowym.
6. Plany przeciwdziałania skutkom suszy.
7. Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych.

8. System informacyjny gospodarowania wodami.

Z kolei Urząd Miejski Wrocławia udostępnia zbiory danych o przestrzeni miejskiej poprzez **System Informacji Przestrzennej Wrocławia**, który umożliwia realizację zadań miasta dotyczących np. prowadzenia symulacji powodziowych. Dostępne mapy w Systemie to [6]:

- plany miejscowe,
- Studium 2018,
- Studium archiwalne,
- mapa własnościowa,
- decyzje architektoniczne,
- decyzje o środowiskowych uwarunkowaniach,
- mapa przyrodnicza,
- obszary zdegradowane i rewitalizowane, mapa i profile wysokościowe,
- gminna ewidencji zabytków,
- inwestycje miejskie,
- mapa branżowa MPWiK.

Podobne rozwiązania przestrzenne dostępne są w serwisach internetowych w wielu miastach w całym kraju.

Do zdecydowanie współczesnych rozwiązań służącym do analiz przestrzennych warunków hydrologicznych między innymi w zabudowie miejskiej, należy platforma internetowa **SCALGO Live Poland**. Jest to interaktywne narzędzie planistyczne służące do lepszego zarządzania gospodarką wodną i planowania przestrzennego [9]. Serwis zawiera przeliczone autorskie analizy w wysokiej rozdzielczości opierające się o Numeryczny Model Terenu (NMT) dla całego kraju o rozdzielczości 1 m. SCALGO umożliwia możliwość przeprowadzania analiz kierunków spływu powierzchniowego, analiz gromadzenia się wody dla dowolnego opadu, analiz podnoszenia się poziomu morza i identyfikacji obszarów bezodpływowych. W oparciu o identyfikację warunków istniejących można realizować scenariusze poprzez implementowanie rozwiązań retencyjnych [10,11]. Wykorzystując techniki WMS (web map service) oraz WMTS (web map tile service) możliwe do zastosowania są dane przestrzenne z innych serwisów, jak geoportalu czy hydroportal, co znacząco przyspiesza pracę i wzbogaca analizę.

## 5. Podsumowanie

Uwarunkowania terenowe miast sprzyjają urbanizacji. W strukturze użytkowania terenów miejskich, bardzo często dobrze opisanych w lokalnych studiach uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, tereny przyrodnicze powinny zajmować ponad połowę





Rys. 10. Obszar analizy przestrzeni miejskiej w platformie SCALGO Live

Fig. 10. Urban space analysis area in the SCALGO Live platform

wę udziału przestrzeni miasta. Natomiast tereny półprzepuszczalne i nieprzepuszczalne bardzo często sięgają ponad 40% powierzchni. Od kilku lat można zauważyć wzrost liczby mieszkańców zarówno w dużych jak i mniejszych miastach. Populacja wrażliwa na upały stanowi przeciętnie około 30% mieszkańców. Do zachodzących najważniejszych zagrożeń klimatycznych należą zjawiska związane z wysoką temperaturą powietrza, intensywnymi opadami deszczu i silnymi wiatrami, które istotnie oddziałują na obniżenie komfortu życia w przestrzeni miejskiej [24].

W ramach Planu adaptacji miast do zmian klimatu realizowane są działania adaptacyjne takie jak budowa systemów gospodarowania wodami opadowymi, które ukierunkowane jest „zagospodarowanie wód opadowych w miejscu powstawania opadu w celu redukcji odpływu powierzchniowego, wykorzystanie naturalnych właściwości gleby i materiału roślinnego do spowalniania i oczyszczania spływów wód opadowych (...)” [24]. W Programach Ochrony Środowiska miast czy powiatów co raz częściej znajdują się zapisy działań związanych z wprowadzaniem do przestrzeni zurbanizowanej elementów błękitno-zielonej infrastruktury [34]. Wydaje się, że tylko połączenie działań strategicznych z konsekwentną realizacją przyjętych programów doprowadzi do uzyskania, w przyszłości, przestrzeni miejskiej odpornej na ekstremalne zdarzenia pogodowe, przyjaznej dla stale zwiększającej się liczby ludności. Przedstawione narzędzia do określania potencjału retencyjnego dają szeroki wachlarz możliwości oceny planistycznej warunków początkowych oraz możliwych scenariuszy rozwoju przestrzeni miejskiej zależnie od potrzeb funkcjonalnych i użytkowych. Przeprowadzona ocena metod określania potencjału retencyjnego pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Literatura w zakresie określania potencjału retencji wody miasta wskazuje na konieczność wprowadzania i wzmacniania błękitno-zielonej infrastruktury, która umożliwi poprawę zdolności retencji i adaptację do zmian klimatu.
2. Jak dotąd powstały liczne narzędzia do poprawiania zdolności retencyjnych zlewni, które wymagają przeprowadzenia oceny warunków fizjograficznych i glebowych, sposobu zagospodarowania terenu czy głębokości zalegania wód gruntowych.
3. Zlewnie miejskie silnie pokryte przez materiały umocnione i uszczelnione, nawet do 61% jej powierzchni, są bardziej podatne na efekt miejskiej wyspy ciepła oraz możliwości wystąpienia fali upałów i suszy.
4. Potencjał retencyjny zmniejsza się wraz z intensywnością opadu, co oznacza, że nawet dające pozytywne efekty elementy BZI mają swoją górną granicę wydajności, przekroczenie której będzie prowadziło do występowania zalań i podtopień.
5. Zastosowanie błękitno-zielonej infrastruktury wraz z systemami odwodnienia terenu stanowią element synergicznej retencji rozproszonej, która oprócz gromadzenia wody umożliwia opóźnienie odpływu powodziowego.
6. Określenie górnej granicy wydajności rozproszonego systemu retencyjnego jest istotnym zadaniem badawczym do rozwiązania w przyszłości, możliwym do określenia podczas kontynuowania badań jak te, które przedstawiono w niniejszej pracy.

Autorzy składają podziękowania pracownikom Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej we Wrocławiu przy Urzędzie Marszałkowskim Województwa Dolnośląskiego za pomoc i udostępnienie materiałów przestrzennych. ■

## LITERATURA

- [1] Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej.
- [2] Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim.
- [3] Fiałkiewicz Wiesław, Burszta-Adamiak Ewa, Malinowski Paweł, Kolonko Anna. 2013. „Urban Water Footprint – system monitorowania i oceny gospodarowania wodą w miastach”. *Ochrona Środowiska* vol. 35, nr 3: 9–12.
- [4] Geiger Wolfgang., Dreiseitl Herbert. 1999. „Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych”. Oficyna Wydawnictwa Projprzem-EKO Bydgoszcz.
- [5] <http://www.coolstranky.cz/nieruchomosci/czym-jest-geoportal.php> [data dostępu: 09.07.2023 r.].
- [6] <https://bip.um.wroc.pl/artykuly/194/system-informacji-przestrzennej-wroclawia> [data dostępu: 09.07.2023 r.].
- [7] <https://geoportal.dolnyslask.pl/cat/usr/umwd-wodgik-wroclaw/mapa/retencja-wody-w-glebie-i-zagrozenie-susza-rolnicza-dolny-slask#> [data dostępu: 09.07.2023 r.].
- [8] <https://isok.gov.pl/hydroportal.html> [data dostępu: 24.07.2023 r.].
- [9] <https://scalgo.com/pl/campaign/poland> [data dostępu: 10.07.2023 r.].
- [10] <https://scalgo.com/pl/meet-us/event/planuj-miasta-i-otoczenie-odporne-na-wyzwania-klimatyczne> [data dostępu: 10.04.2023 r.].
- [11] <https://scalgo.com/pl/meet-us/event/surface-water-planning-in-poland> [data dostępu: 10.07.2023 r.].
- [12] <https://swiatrolnika.info/infor/maciej/hydroportal-informacje-o-wodach.html> [data dostępu: 24.07.2023 r.].
- [13] <https://www.gov.pl/web/archiwum-inwestycje-rozwoj/geoportal-informacja-przestrzenna-dla-kazdego> [data dostępu: 09.07.2023 r.].
- [14] <https://www.gov.pl/web/fundusze-regiony/nowa-karta-lipska-i-agenda-terytorialna-ue-2030-przyjete-przez-ministrow-krajow-wspolnoty-europejskiej> [data dostępu: 01.07.2023 r.].
- [15] <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/program-przeciwdzialania-niedoborowi-wody> [data dostępu: 27.08.2023 r.].
- [16] <https://www.miasta.pl/aktualnosci/poznalismy-projekt-krajowej-polityki-miejskiej-2030> [data dostępu: 26.08.2023 r.].
- [17] <https://www.miasta.pl/aktualnosci/zagrozenia-miast-w-kryzysie-klimatycznym> [data dostępu: 02.07.2023 r.].
- [18] Jadach-Sepioła Aleksandra, Legutko-Kobus Paulina. 2021. „Suburbanizacja – ujęcie teoretyczne i specyfika w krajach Europy Środkowo-Wschodniej”. *Suburbanizacja w Polsce jako wyzwanie dla polityki rozwoju* vol. 11, nr 203: 11–28.
- [19] Januchta-Szostak Anna. 2020. „Błękitno-zielona infrastruktura jako narzędzie do adaptacji miast do zmian klimatu i zagospodarowania wód opadowych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej* nr 3: 37–74.
- [20] Kołodziejczyk Katarzyna. 2016. „Analiza wpływu wielkości uszczelnienia terenu na hydrogram odpływu ze zlewni”. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus* vol. 15(4), nr 3: 103–114.
- [21] Kordana Sabina, Słyś Daniel. 2016. „Analiza kryteriów warunkujących wybór optymalnego rozwiązania systemu zagospodarowania wód opadowych”. *Proceedings of ECOpole* vol. 10, nr 1: 183–191.
- [22] Krajowa Polityka Miejska 2030 przyjęta uchwałą nr 136 Rady Ministrów z dnia 14 czerwca 2022 r.
- [23] Lepeška Tomáš. 2013. „Hydric potential of selected river baśni in Slovakia”. *Ecohydrology & Hydrobiology* 2013 vol. 13: 201–209.
- [24] Miejski plan adaptacji do zmian klimatu do 2030 przyjęty uchwałą nr XIII/342/19 Rady Miejskiej Wrocławia z dnia 5 września 2019 r.
- [25] Miller Antoni., 1998. „Modelowanie obszarów zmienności różnych miar retencji”. *Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu*, Poznań.
- [26] Mrowiec Maciej. 2020. „Retencja wód opadowych w obszarach zurbanizowanych”. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*.
- [27] Mrozik Karol., Ideczak Piotr. 2016. „Optymalizacja procesu decyzyjnego dotyczącego kształtowania zdolności retencyjnych zlewni przy zastosowaniu metody AHP”. *Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania* vol. 2, nr 46: 83–94.
- [28] Pociask-Karteczka Joanna (red.). 2003. „Zlewnia. Właściwości i procesy”. *Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego*, 296.
- [29] Polityka ekologiczna państwa 2030 – strategia rozwoju w obszarze środowiska i gospodarki wodnej przyjęta uchwałą nr 67 Rady Ministrów z dnia 16 lipca 2019 r.
- [30] Praca zbiorowa. 2009. „Biała Księga – Adaptacja do zmian klimatu: europejskie ramy działania”. Komisja Europejska, Bruksela.
- [31] Praca zbiorowa. 2013. „Zielona infrastruktura – zwiększanie kapitału naturalnego Europy”. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Bruksela.
- [32] Praca zbiorowa. 2014. „Plan ochrony zasobów wodnych Europy”. Komisja Europejska, Bruksela.
- [33] Praca zbiorowa. 2020. „Nowa Karta Lipska”. *Przyjęta na nieformalnym spotkaniu ministrów państw członkowskich UE ds. miejskich*.
- [34] Program Ochrony Środowiska dla miasta Wrocławia na lata 2021–2025 z perspektywą do roku 2030 przyjęty uchwałą nr XLVI/1194/21 Rady Miejskiej Wrocławia z dnia 25 listopada 2021 r.
- [35] Program przeciwdziałania niedoborowi wody na lata 2021–2027 z perspektywą do roku 2030 <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/projekt-programu-przeciwdzialania-niedoborowi-wody-ppnw--na-lata-2021-2027-z-perspektywa-do-roku-2030---raport-z-konsultacji-spoecznych> [data dostępu: 27.08.2023 r.].
- [36] Program Zwiększania Retencyjności Ziemi Dzierżoniowskiej na lata 2014–2020 przyjęty uchwałą nr 45/VI/2015 Rady Miejskiej w Piławie Górnej z dnia 24 czerwca 2015 r.
- [37] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690).
- [38] Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 15 lipca 2021 r. (Dz.U. 2021 poz. 1615). „Plan przeciwdziałania skutkom suszy przyjęty”.
- [39] Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 w perspektywę do roku 2030. Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2013 r.
- [40] Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1478).
- [41] Vandecasteele Ine, Rivero Inés Marí, Baranzelli Claudia, Becker William, Dreoni Ilda, Lavallo Carlo, Batelaan Okke. 2018. “The Water Retention Index: Using land use planning to manage water resources in Europe”. *Sustainable Development*, vol. 26 (2), s: 122–131.
- [42] Wojkowski Jakub., Wałęga Andrzej, Młyński Dariusz, Radecki-Pawlik Artur, Lepeška Tomáš. 2022. „Wpływ zmian pokrycia i użytkowania terenu na krajobrazowy potencjał hydyczny zlewni i trendy przepływów charakterystycznych”. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN* 2022, z. 45, s: 59–71.
- [43] Wojkowski Jakub., Wałęga Andrzej, Młyński Dariusz, Radecki-Pawlik Artur, Lepeška Tomáš. 2022. “The influence of land cover changes on landscape hydric potential and river flows: Upper Vistula, Western Carpathians”. *CATENA*. Elsevier, vol 210, march 105878