



Politechnika Wrocławska

DZIEDZINA: Nauki inżynieryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Wykorzystanie niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI)
w celu zmniejszenia obciążenia hydraulicznego
obszarów odwadnianych**

Mgr inż. Kornelia Przestrzelska

Promotor:

prof. dr hab. inż. Bartosz Kaźmierczak

Promotor pomocniczy:

dr inż. Katarzyna Wartalska

Słowa kluczowe: niebiesko-zielona infrastruktura, modelowanie hydrodynamiczne, SWMM

WROCŁAW 2026

Streszczenie

Postępująca urbanizacja wraz z obserwowanymi zmianami klimatu prowadzi do wzrostu powierzchni uszczelnionych w miastach oraz zwiększenia częstotliwości występowania opadów o dużej intensywności. W konsekwencji wzrasta spływ powierzchniowy, systemy kanalizacyjne stają się przeciążone, a co za tym idzie, wzrasta występowanie lokalnych podtopień i intensyfikacja pracy przelewów burzowych. W odpowiedzi na te problemy coraz większe znaczenie mają rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI), których zadaniem jest zatrzymywanie, retencjonowanie oraz infiltracja wód opadowych w miejscu ich powstawania, przy jednoczesnym odciążeniu systemów kanalizacyjnych i poprawie funkcjonowania całego miejskiego systemu wodnego.

Teza pracy opierała się na założeniu, iż wdrożenie rozproszonych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI) w zlewniach miejskich umożliwia istotne zmniejszenie obciążenia hydraulicznego systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej poprzez redukcję odpływu powierzchniowego, opóźnienie przepływów szczytowych oraz zwiększenie lokalnej retencji wód opadowych, co zwiększa odporność miast na skutki urbanizacji i zmian klimatu. Celem głównym pracy była ocena wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury na funkcjonowanie systemu odwodnienia miasta Bolesławiec oraz określenie ich skuteczności w ograniczaniu przeciążeń hydraulicznych sieci kanalizacyjnej w warunkach obecnych i prognozowanych zmian klimatu.

Badania przeprowadzono za pomocą hydrodynamicznego modelu kanalizacji ogólnospławnej w programie EPA SWMM. Model wykonano na rzeczywistej sieci kanalizacyjnej znajdującej się w mieście Bolesławiec. Wykorzystano dane eksploatacyjne przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego oraz dane przestrzenne opracowane w środowisku GIS. W modelu odwzorowano zlewnie, przewody, studzienki kanalizacyjne, przepompownię, przelew burzowy oraz pozostałe elementy infrastruktury wpływające na pracę systemu. Na podstawie przygotowanego i odpowiednio skalibrowanego modelu przeprowadzono analizę scenariusza bazowego oraz scenariuszy wariantowych obejmujących wdrożenie BGI. Do badań wykorzystano sześć podstawowych rozwiązań: zielone dachy, niecki bioretencyjne, ogrody deszczowe, nawierzchnie przepuszczalne, skrzynki rozsączające oraz beczki przydomowe. Każde z nich oceniono dla czterech poziomów implementacji wynoszących odpowiednio 25%, 50%, 75% oraz 100% powierzchni przewidzianej do zagospodarowania. Dodatkowo przeprowadzono symulacje wariantów mieszanych uwzględniających zastosowanie łączne zielonych dachów oraz wybranych rozwiązań infiltracyjno-retencyjnych. Ocena efektywności każdego z rozwiązań została wykonana na podstawie jednolitego zestawu wskaźników hydraulicznych obejmujących całkowitą objętość ścieków przepływających przez przepompownię, objętość ścieków odprowadzanych przez przelew burzowy oraz liczbę węzłów, w których wystąpiły wylania z sieci kanalizacyjnej. Znaczącym elementem analizy była ocena hydrogramów przepływów w przekroju przepompowni oraz przelewu burzowego, dzięki którym określono zmiany przebiegu przepływu i dynamiki odpływu dla każdego z wariantów.

Przeprowadzone badania wykazały skuteczność rozwiązań BGI na terenie zlewni miejskiej. Potwierdzono, że odpowiednio dobrane rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury mogą stanowić skuteczne narzędzie wspomagające funkcjonowanie systemów kanalizacji ogólnospławnej oraz ograniczające negatywne skutki urbanizacji i zmian klimatu. Opracowana metodyka nie ogranicza się wyłącznie do analizy przypadku jednego miasta, ale stanowi uniwersalne podejście umożliwiające ocenę efektywności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury w innych systemach kanalizacji ogólnospławnej. Co za tym idzie, uzyskane wyniki mogą stanowić wsparcie w procesie planowania działań adaptacyjnych do zmian klimatu oraz wdrażania zrównoważonych metod zagospodarowania wód opadowych.

Summary

Progressive urbanisation, coupled with observed climate change, is leading to increased impervious surfaces in cities and a rise in the frequency of heavy rainfall events. Consequently, surface runoff is increasing, drainage systems are becoming overloaded, and the incidence of localised flooding is rising, with stormwater overflows becoming more frequent. In response to these problems, blue-green infrastructure (BGI) solutions are becoming increasingly important; their purpose is to intercept, retain and infiltrate rainwater at the point of origin, whilst relieving the burden on drainage systems and improving the functioning of the entire urban water system.

The thesis was based on the assumption that the implementation of decentralised blue-green infrastructure solutions (BGI) in urban catchment areas enables a significant reduction in the hydraulic load on stormwater and combined sewer systems by reducing surface runoff, delaying peak flows and increasing local rainwater retention, thereby enhancing cities' resilience to the effects of urbanisation and climate change. The main objective of this study was to assess the impact of blue-green infrastructure solutions on the drainage system's functioning in the town of Bolesławiec and to determine their effectiveness in mitigating hydraulic overloads in the sewerage network under current and projected climate change conditions.

The study was carried out using a hydrodynamic model of a combined sewer system in the EPA SWMM software. The model was based on the actual sewerage network in the town of Bolesławiec. Operational data from the water and sewerage company and spatial data processed in a GIS environment were utilised. The model replicated catchment areas, pipes, sewer manholes, a pumping station, a stormwater overflow, and other infrastructure elements that affect the system's operation. Based on the prepared and appropriately calibrated model, an analysis was carried out of the baseline scenario and alternative scenarios involving the implementation of BGI. Six basic solutions were used in the study: green roofs, bioretention basins, rain gardens, permeable pavements, infiltration boxes and domestic rainwater barrels. Each of these was assessed at four levels of implementation, corresponding to 25 per cent, 50 per cent, 75 per cent, and 100 per cent of the area earmarked for development, respectively. In addition, simulations were conducted for mixed variants, accounting for the combined use of green roofs and selected infiltration and retention solutions. The effectiveness of each solution was assessed using a uniform set of hydraulic indicators, including the total volume of wastewater flowing through the pumping station, the volume of wastewater discharged via the stormwater overflow, and the number of points where overflows from the sewerage network occurred. A key element of the analysis was the assessment of flow hydrographs at the pumping station and storm overflow cross-sections, which enabled determination of changes in flow patterns and runoff dynamics for each variant.

The research demonstrated the effectiveness of BGI solutions in the urban catchment area. It was confirmed that appropriately selected blue-green infrastructure solutions can serve as an effective tool to support the functioning of combined sewer systems and mitigate

the negative effects of urbanisation and climate change. The methodology developed is not limited to a single city case study but constitutes a universal approach for assessing the effectiveness of blue-green infrastructure solutions in other combined sewer systems. Consequently, the results obtained can support the planning of climate change adaptation measures and the implementation of sustainable stormwater management practices.

Spis treści

Streszczenie	3
Summary	5
1. Wprowadzenie	9
2. Przegląd literatury.....	11
2.1. Wady i zalety niebiesko-zielonej infrastruktury.....	12
2.2. Rozwój niebiesko-zielonej infrastruktury na świecie	15
2.3. Projektowanie niebiesko-zielonej infrastruktury	17
2.4. Wpływ niebiesko-zielonej infrastruktury na odpływ i retencję	18
2.5. Modelowanie hydrodynamiczne systemów kanalizacyjnych	20
2.6. Wpływ zmian klimatu na funkcjonowanie systemów kanalizacyjnych	21
2.7. Luki badawcze	22
3. Teza, cel i zakres pracy.....	25
4. Charakterystyka obszaru badań	27
4.1. Lokalizacja i charakterystyka miasta.....	27
4.2. Uwarunkowania fizjograficzne i hydrologiczne	27
4.3. Warunki klimatyczne i charakterystyka opadów	28
4.4. Charakterystyka zlewni objętej modelowaniem.....	30
4.5. Istniejący system kanalizacji.....	32
4.6. Identyfikacja problemów hydraulicznych	33
5. Metodyka badań.....	35
5.1. Ogólna koncepcja badań	35
5.2. Dane wejściowe i ich przygotowanie	36
5.3. Budowa modelu hydrodynamicznego (SWMM)	39
5.4. Kalibracja i walidacja modelu	42
5.5. Scenariusze opadowe	48
5.6. Wariant bazowy (stan istniejący)	50
5.7. Warianty z rozproszoną retencją (BGI)	51
5.8. Kryteria oceny efektywności	55

6.	Wyniki modelowania hydrodynamicznego.....	57
6.1.	Wyniki dla stanu istniejącego	57
6.2.	Wyniki dla rozproszonej retencji (BGI)	60
6.2.1.	Zielone dachy	60
6.2.2.	Niecki bioretencyjne	64
6.2.3.	Ogrody deszczowe	66
6.2.4.	Powierzchnie przepuszczalne	69
6.2.5.	Skrzynki rozsączające	71
6.2.6.	Beczki przydomowe	73
6.2.7.	Warianty mieszane	76
6.3.	Analiza porównawcza efektywności rozwiązań	78
7.	Dyskusja wyników	80
7.1.	Interpretacja wyników modelowania	80
7.2.	Wrażliwość wyników na założenia modelowe.....	80
7.3.	Ograniczenia metodyczne	81
7.4.	Odniesienie do wyników innych badań	82
8.	Wnioski końcowe.....	84
8.1.	Weryfikacja hipotez badawczych	84
8.2.	Najważniejsze wyniki pracy.....	84
8.3.	Kierunki dalszych badań	85
	Literatura	86

1. Wprowadzenie

Postępująca urbanizacja oraz zmiany klimatu należą do najważniejszych czynników kształtujących współczesne środowisko miejskie. Dynamiczny rozwój miast prowadzi do istotnych przekształceń sposobu użytkowania terenu, które wpływają na funkcjonowanie procesów hydrologicznych. Wraz ze wzrostem powierzchni zabudowanych zwiększa się udział terenów uszczelnionych, takich jak drogi, parkingi, place czy dachy budynków. Powierzchnie te ograniczają infiltrację wód opadowych do gruntu i przyczyniają się do wzrostu odpływu powierzchniowego (McGrane, 2016; Shuster et al., 2005). W efekcie większa objętość wody odprowadzana jest do systemów kanalizacji deszczowej w krótkim czasie po wystąpieniu opadu, co prowadzi do wzrostu obciążeń hydraulicznych sieci odwodnieniowych (Shuster et al., 2005). Zjawisko to stanowi jedną z głównych przyczyn lokalnych podtopień i powodzi miejskich obserwowanych na terenach zurbanizowanych (Dell’Aira & Meier, 2025; Jefferson et al., 2017).

Negatywne skutki urbanizacji są dodatkowo potęgowane przez obserwowane zmiany klimatu. Wzrost temperatury powietrza zwiększa zdolność atmosfery do magazynowania pary wodnej, co sprzyja występowaniu opadów o większej intensywności. Badania wskazują, że maksymalne dobowe sumy opadów mogą wzrastać średnio o 5,9–7,7% na każdy stopień wzrostu temperatury powietrza (Westra et al., 2014). Jednocześnie obserwuje się zwiększoną zmienność opadów, przejawiającą się występowaniem długotrwałych okresów bezdeszczowych przerywanych krótkotrwałymi, lecz bardzo intensywnymi opadami. Zjawiska te wpływają na właściwości fizyczne gleb i ograniczają ich zdolność do infiltracji wody (Ren et al., 2020). W konsekwencji nawet obszary biologicznie czynne mogą podczas intensywnych opadów generować znaczny odpływ powierzchniowy, zwiększając ryzyko przeciążenia systemów odwodnienia oraz występowania podtopień (Jefferson et al., 2017).

Systemy kanalizacji deszczowej projektowane są dla określonych warunków hydraulicznych, a przekroczenie ich przepustowości prowadzi do występowania przeciążeń. Objawiają się one pracą przewodów pod ciśnieniem, nadpiętrzeniami do poziomu terenu oraz wylaniami ze studzienek kanalizacyjnych (Muttill et al., 2023). Skutkami takich zdarzeń są między innymi utrudnienia komunikacyjne, uszkodzenia infrastruktury oraz straty ekonomiczne związane z zalewaniem budynków i obiektów technicznych.

Adaptację istniejących systemów kanalizacyjnych utrudnia fakt, że znaczna część infrastruktury podziemnej była projektowana na podstawie historycznych warunków klimatycznych i urbanizacyjnych. Parametry hydrauliczne sieci, takie jak średnice przewodów czy pojemność retencyjna, dostosowywano do niższego stopnia uszczelnienia zlewni oraz innych charakterystyk opadowych niż obserwowane współcześnie (Arnbjerg-Nielsen et al., 2013). W rezultacie wiele systemów odwodnieniowych nie spełnia obecnych wymagań eksploatacyjnych, a starzejąca się infrastruktura coraz częściej staje się niewystarczająca do przejęcia rosnących objętości odpływu (Miller & Hutchins, 2017). Jednocześnie rozbudowa lub przebudowa istniejących sieci kanalizacyjnych wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi

oraz licznymi ograniczeniami technicznymi wynikającymi z zagospodarowania przestrzeni miejskiej.

Szczególnie widoczne jest to w przypadku systemów ogólnospławnych, które odprowadzają zarówno ścieki bytowe, jak i wody opadowe. Systemy te, często zlokalizowane w historycznych centrach miast, powstawały w warunkach znacząco odbiegających od współczesnych realiów klimatycznych i urbanizacyjnych. Ich ograniczona przepustowość sprawia, że podczas intensywnych opadów osiągają stan przeciążenia hydraulicznego (Muttill et al., 2023). W takich sytuacjach nadmiar mieszaniny ścieków i wód opadowych odprowadzany jest przez przelewy burzowe bezpośrednio do odbiorników wodnych. Choć rozwiązanie to chroni sieć przed całkowitym przeciążeniem, jednocześnie prowadzi do okresowego zrzutu ścieków nieoczyszczonych, wywierając negatywny wpływ na jakość wód i funkcjonowanie ekosystemów wodnych (Salvadore et al., 2015). Dodatkowym problemem jest ograniczona możliwość modernizacji tych systemów, wynikająca z gęstej zabudowy, istniejącej infrastruktury podziemnej oraz historycznego charakteru wielu obszarów miejskich.

Jednym z najczęściej stosowanych sposobów ograniczania przeciążeń hydraulicznych jest budowa zbiorników retencyjnych umożliwiających czasowe magazynowanie nadmiaru ścieków i wód opadowych oraz redukcję przepływów szczytowych. Ich zastosowanie w silnie zurbanizowanych obszarach jest jednak ograniczone dostępnością przestrzeni (Fletcher et al., 2008; Martín Muñoz et al., 2024). W wielu miastach konkurencja pomiędzy funkcjami mieszkaniowymi, usługowymi i transportowymi utrudnia przeznaczanie terenów wyłącznie na cele retencyjne. Ponadto zbiorniki te pełnią zazwyczaj funkcję detencyjną, polegającą na czasowym magazynowaniu wody bez jej dalszego wykorzystania (Rodak et al., 2020).

W odpowiedzi na ograniczenia tradycyjnych metod gospodarowania wodami opadowymi coraz większe znaczenie zyskują rozwiązania oparte na niebiesko-zielonej infrastrukturze (BGI, ang. *Blue-Green Infrastructure*) oraz rozproszonej retencji. Podejścia te wykorzystują naturalne procesy hydrologiczne, takie jak infiltracja, retencja, ewapotranspiracja oraz opóźnianie odpływu powierzchniowego, umożliwiając zagospodarowanie wód opadowych możliwie blisko miejsca ich powstawania. Dzięki temu ograniczane jest obciążenie systemów kanalizacyjnych oraz zmniejszane ryzyko występowania przeciążeń hydraulicznych (Eckart et al., 2017; Fletcher et al., 2015). Niebiesko-zielona infrastruktura definiowana jest jako sieć obszarów naturalnych i półnaturalnych, celowo projektowanych oraz zarządzanych w celu świadczenia usług ekosystemowych, poprawy jakości środowiska oraz zwiększania jakości życia mieszkańców. Możliwość integracji rozwiązań BGI z istniejącą strukturą urbanistyczną sprawia, że stanowią one istotny element adaptacji miast do zmian klimatu oraz budowy bardziej zrównoważonych i odpornych systemów miejskich (Kimić & Ostrowski, 2021).

Mimo rosnącej popularności rozwiązań BGI nadal nie jest jednoznacznie określony ich wpływ na funkcjonowanie istniejących systemów kanalizacyjnych w rzeczywistych warunkach miejskich. Problem ten stanowi punkt wyjścia niniejszej rozprawy.

2. Przegląd literatury

Woda opadowa od wieków stanowiła jeden z kluczowych czynników determinujących rozwój cywilizacji oraz kształtowanie przestrzeni osadniczych (Londra et al., 2021). W literaturze naukowej początki koncepcji łączących elementy infrastruktury niebieskiej i zielonej sięgają XIX wieku, kiedy w Wielkiej Brytanii zaczęto zwracać uwagę na znaczenie pasów zieleni w strukturze miejskiej (Chatzimentor et al., 2020; Szruba, 2020). Współcześnie zagadnienia związane ze zrównoważonym gospodarowaniem wodami opadowymi obejmują szeroką grupę koncepcji, metod i rozwiązań technicznych. W ostatnich latach podjęto próbę ich systematyzacji oraz wprowadzenia spójnej terminologii (Fletcher et al., 2015).

Najczęściej spotykane koncepcje to Low Impact Development (LID) oraz jej rozwinięcie Low Impact Urban Design and Development (LIUDD) – stosowane głównie w Ameryce Północnej i Nowej Zelandii. Ich podstawowym założeniem jest minimalizacja negatywnych skutków urbanizacji dla naturalnego obiegu wody poprzez wdrażanie rozproszonych urządzeń retencyjnych i infiltracyjnych możliwie najbliżej źródła spływu powierzchniowego. W przeciwieństwie do tradycyjnych systemów kanalizacyjnych (zbierających wody opadowe do kolektorów), rozwiązania LID wykorzystują rozproszoną infrastrukturę, taką jak ogrody deszczowe, pasy filtracyjne czy nawierzchnie przepuszczalne. Dzięki temu możliwe jest częściowe odtworzenie warunków hydrologicznych sprzed urbanizacji oraz zwiększenie odporności systemów miejskich na skutki intensywnych opadów (Fletcher et al., 2015).

Pokrewną koncepcją jest Water Sensitive Urban Design (WSUD), rozwijana przede wszystkim w Australii, a następnie wdrażana również w Wielkiej Brytanii i Nowej Zelandii. Koncepcja ta opiera się na zintegrowanym zarządzaniu wodami opadowymi w środowisku miejskim poprzez integrację infrastruktury technicznej z rozwiązaniami opartymi na naturze, co umożliwia bardziej efektywne gospodarowanie zasobami wodnymi oraz zwiększenie odporności miast na skutki zmian klimatu (Fletcher et al., 2015; Wong & Brown, 2009).

W Europie szerokie zastosowanie znalazła koncepcja Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS), szczególnie popularna w Wielkiej Brytanii. Rozwiązanie to opiera się na zarządzaniu spływem powierzchniowym w sposób odzwierciedlający naturalne procesy hydrologiczne, głównie poprzez redukcję objętości odpływu oraz jego opóźnienie. SuDS wykorzystują koncepcje, które umożliwiają zachodzenie infiltracji, retencji oraz oczyszczania wód opadowych w miejscu ich powstawania (Eckart et al., 2017). Wdrażanie tych systemów na terenach zurbanizowanych stanowi istotny element adaptacji do zmian klimatu oraz przyczynia się do przywracania naturalnych warunków hydraulicznych w zlewniach miejskich (Hamel & Fletcher, 2014).

Szerszą perspektywę prezentuje koncepcja zintegrowanego zarządzania wodami miejskimi tj. Integrated Urban Water Management (IUWM), która obejmuje wszystkie elementy miejskiego cyklu wodnego funkcjonujące w obrębie zlewni zurbanizowanej. Podejście to zakłada kompleksowe zarządzanie zasobami wodnymi z uwzględnieniem wzajemnych zależności pomiędzy wodami opadowymi, wodami powierzchniowymi, wodami podziemnymi oraz systemami kanalizacyjnymi. IUWM stanowi rozwinięcie koncepcji takich jak LID, SuDS czy

WSUD, przenosząc punkt ciężkości z pojedynczych rozwiązań technicznych na strategiczne planowanie i zarządzanie zasobami wodnymi w skali całego miasta.

W odpowiedzi na rosnące wyzwania związane z postępującą urbanizacją oraz zmianami klimatu rozwinięto koncepcję niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI), stanowiącą rozwinięcie wcześniejszych podejść do zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi. BGI definiowana jest jako sieć wzajemnie powiązanych obszarów naturalnych i półnaturalnych, projektowanych oraz zarządzanych w sposób umożliwiający świadczenie usług ekosystemowych oraz poprawę jakości życia mieszkańców (Chatzimentor et al., 2020; Grădinaru & Hersperger, 2019; Przestrzelska et al., 2024). Koncepcja ta obejmuje zarówno elementy zielone, takie jak zielone dachy, ogrody deszczowe i parki, jak również elementy wodne, w tym zbiorniki oraz niecki retencyjne (Shah et al., 2021).

Wszystkie przedstawione koncepcje wpisują się w szerszy paradygmat Nature-Based Solutions (NBS), który w ostatnich latach zyskał istotne znaczenie zarówno w badaniach naukowych, jak i praktyce projektowania systemów odwodnienia obszarów zurbanizowanych. Rozwiązania oparte na naturze definiowane są jako działania inspirowane procesami zachodzącymi w przyrodzie, służące rozwiązywaniu problemów środowiskowych, społecznych i gospodarczych przy jednoczesnym wspieraniu funkcjonowania ekosystemów (Osaka et al., 2021). W praktyce oznacza to odejście od podejścia opartego wyłącznie na infrastrukturze technicznej na rzecz rozwiązań integrujących elementy infrastruktury technicznej z procesami przyrodniczymi, co pozwala na równoczesne zwiększenie efektywności gospodarowania wodami opadowymi, poprawę jakości środowiska oraz wzmacnianie odporności miast na skutki zmian klimatu.

Analiza przedstawionych koncepcji wskazuje, że różnice pomiędzy nimi dotyczą przede wszystkim zakresu stosowania i skali zarządzania wodami opadowymi, natomiast wszystkie opierają się na wspólnym założeniu przywracania naturalnych procesów hydrologicznych. Współcześnie koncepcja BGI stanowi najbardziej kompleksowe ujęcie integrujące wcześniejsze podejścia.

2.1. Wady i zalety niebiesko-zielonej infrastruktury

Niebiesko-zielona infrastruktura jest uznawana za jedno z najważniejszych narzędzi wspierających adaptację miast do zmian klimatu oraz zrównoważone gospodarowanie wodami opadowymi. W przeciwieństwie do tradycyjnych systemów odwodnienia, których podstawowym celem jest szybkie odprowadzenie wód opadowych poza obszar zlewni, rozwiązania BGI wykorzystują naturalne procesy hydrologiczne, takie jak retencja, infiltracja, ewapotranspiracja oraz biologiczne oczyszczanie wód. Dzięki temu mogą jednocześnie realizować funkcje hydrologiczne, środowiskowe, ekonomiczne i społeczne. Wielofunkcyjność ta stanowi jedną z najważniejszych przewag niebiesko-zielonej infrastruktury nad konwencjonalną infrastrukturą techniczną (Chandwani et al., 2021; Green et al., 2021).

Korzyści hydrologiczne

Podstawową funkcją niebiesko-zielonej infrastruktury jest wspomaganie gospodarowania wodami opadowymi poprzez zwiększanie retencji, infiltracji oraz opóźnianie odpływu powierzchniowego. Elementy takie jak ogrody deszczowe czy niecki bioretencyjne umożliwiają czasowe magazynowanie wód opadowych i ich stopniowe uwalnianie do środowiska. W rezultacie ograniczana jest objętość odpływu kierowanego do systemów kanalizacyjnych, a także zmniejszane jest ryzyko lokalnych podtopień i przeciążenia infrastruktury odwodnieniowej podczas intensywnych opadów (Chandwani et al., 2021; Green et al., 2021). Istotną zaletą BGI jest również poprawa jakości wód. Procesy filtracji, sedymentacji oraz poboru zanieczyszczeń przez roślinność umożliwiają redukcję stężeń zawieszin, biogenów i innych substancji transportowanych wraz ze spływem powierzchniowym. Szczególną rolę odgrywają w tym zakresie systemy bioretencyjne, które łączą funkcje retencyjne i oczyszczające.

Korzyści klimatyczne i środowiskowe

Jednym z najczęściej analizowanych efektów wdrażania BGI jest ograniczanie zjawiska miejskiej wyspy ciepła. Roślinność oraz elementy wodne wpływają na lokalny mikroklimat poprzez zacienianie powierzchni, zwiększanie ewapotranspiracji oraz intensyfikację procesów wymiany ciepła. Wykazano, że obecność mokradeł miejskich może prowadzić do lokalnego obniżenia temperatury nawet o 2,74°C, co czyni je istotnym elementem strategii adaptacyjnych do zmian klimatu (Xue et al., 2019).

Poprawa warunków termicznych przekłada się również na ograniczenie zużycia energii w budynkach. Analizy porównawcze wskazują, że największy potencjał redukcji zapotrzebowania na energię wykorzystywaną do chłodzenia posiadają rozwiązania oparte na infrastrukturze niebieskiej, dla których średnie oszczędności wynoszą około 8,12%. W przypadku niebiesko-zielonej infrastruktury wartość ta osiąga około 6,73%, natomiast dla samej infrastruktury zielonej około 4,78% (Ayad et al., 2019). Wyniki te podkreślają znaczenie elementów wodnych w kształtowaniu mikroklimatu miejskiego.

Szczególną rolę odgrywają zielone dachy, które poprawiają izolacyjność termiczną budynków, ograniczają nagrzewanie powierzchni dachowych oraz stabilizują temperaturę niezależnie od warunków atmosferycznych (Almaaitah et al., 2021). Rozwiązania te mogą być dodatkowo integrowane z instalacjami fotowoltaicznymi, zwiększając sprawność modułów poprzez obniżenie ich temperatury pracy (Pochodyła et al., 2021; Shafique et al., 2020).

Niebiesko-zielona infrastruktura przyczynia się również do ograniczania emisji gazów cieplarnianych oraz poprawy jakości powietrza. Mechanizmy te obejmują zarówno bezpośrednie pochłanianie dwutlenku węgla i zanieczyszczeń przez roślinność, jak i pośrednie efekty wynikające z redukcji zużycia energii. Wykazano, że infrastruktura zielona może zmniejszać ślad węglowy poprzez regulację temperatury, poprawę bilansu wodnego oraz wspieranie naturalnych procesów hydrologicznych (Wang et al., 2020).

Istotnym aspektem środowiskowym jest także wzmacnianie bioróżnorodności oraz poprawa ciągłości ekologicznej. Tworzenie terenów zielonych, mokradeł i renaturyzowanych cieków wodnych sprzyja rozwojowi flory i fauny oraz umożliwia tworzenie korytarzy ekologicznych wspierających migrację organizmów. Działania te przeciwdziałają fragmentacji siedlisk oraz wspierają funkcjonowanie ekosystemów miejskich (Baron, 2020; Green et al., 2021; Mazur-Belzyt, 2021; Wilbers et al., 2022).

Dodatkową korzyścią środowiskową jest poprawa komfortu akustycznego poprzez tłumienie hałasu komunikacyjnego oraz ograniczanie oddziaływania wiatru, co ma szczególne znaczenie na terenach o wysokiej intensywności zabudowy (Baron, 2020; Puzdrakiewicz, 2017).

Korzyści ekonomiczne

Korzyści wynikające z wdrażania BGI obejmują również aspekty ekonomiczne. Rozwiązania oparte na naturze mogą ograniczać koszty związane ze skutkami ekstremalnych zjawisk hydrologicznych, takich jak powodzie i susze, poprzez zwiększanie zdolności retencyjnych zlewni oraz redukcję obciążeń systemów kanalizacyjnych (Puzdrakiewicz, 2017). W literaturze wskazuje się również na możliwość obniżenia kosztów eksploatacji infrastruktury odwodnieniowej oraz wydłużenia jej trwałości dzięki zmniejszeniu obciążeń hydraulicznych (Chandwani et al., 2021; Ghofrani et al., 2017; O'Donnell et al., 2017).

Poprawa jakości przestrzeni miejskiej, zwiększenie bezpieczeństwa przeciwpowodziowego oraz wzrost atrakcyjności krajobrazowej mogą dodatkowo przyczyniać się do wzrostu wartości nieruchomości oraz atrakcyjności inwestycyjnej poszczególnych obszarów (Gómez-Baggethun & Barton, 2013). W wielu krajach wdrażanie rozwiązań BGI wspierane jest również poprzez systemy dotacji i zachęt finansowych kierowanych do mieszkańców oraz inwestorów.

Korzyści społeczne

Poza korzyściami środowiskowymi i ekonomicznymi niebiesko-zielona infrastruktura odgrywa istotną rolę społeczną. Tereny zielone i wodne tworzą przestrzeń rekreacyjną oraz miejsca sprzyjające integracji mieszkańców. Liczne badania wskazują na pozytywny wpływ takich obszarów na zdrowie psychiczne i fizyczne, obejmujący m.in. redukcję stresu, poprawę samopoczucia oraz zwiększenie aktywności fizycznej (Chandwani et al., 2021; Ghofrani et al., 2017; Green et al., 2021).

Rozwiązania BGI mogą również pełnić funkcje edukacyjne. Obecność ogrodów deszczowych, mokradeł czy parków tematycznych zwiększa świadomość ekologiczną mieszkańców oraz wspiera edukację w zakresie gospodarowania wodami opadowymi i ochrony środowiska (Iwaszuk et al., 2019; Puzdrakiewicz, 2017).

Ograniczenia i wyzwania

Pomimo licznych korzyści wdrażanie niebiesko-zielonej infrastruktury wiąże się z szeregiem ograniczeń. Skuteczność poszczególnych rozwiązań jest silnie uzależniona od lokalnych warunków klimatycznych, hydrologicznych i przestrzennych. W obszarach silnie

zurbanizowanych istotną barierę może stanowić ograniczona dostępność przestrzeni, natomiast w przypadku niektórych rozwiązań konieczne jest prowadzenie regularnych prac eksploatacyjnych i pielęgnacyjnych.

Jedną ze zmian, która wiąże się z integracją niebiesko-zielonych rozwiązań, jest zielona gentryfikacja. Jest to mechanizm, w którym zazielenianie miast lub projekty zrównoważonego rozwoju poprawiają jakość dzielnic, ale jednocześnie podnoszą wartość nieruchomości, przyciągają zamożniejszych mieszkańców i mogą marginalizować lub wysiedlać stałych mieszkańców (Pearsall, 2018).

W literaturze zwraca się również uwagę na trudności związane z oceną efektywności ekonomicznej BGI. Chociaż rozwiązania te generują liczne korzyści środowiskowe i społeczne, część z nich ma charakter pośredni i długoterminowy, co utrudnia ich jednoznaczną wycenę. Wymaga to stosowania kompleksowych metod oceny uwzględniających zarówno koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, jak i wartość usług ekosystemowych świadczonych przez niebiesko-zieloną infrastrukturę.

2.2. Rozwój niebiesko-zielonej infrastruktury na świecie

Rozwój niebiesko-zielonej infrastruktury stanowi odpowiedź na rosnące problemy związane z urbanizacją, uszczelnianiem powierzchni oraz nasilającymi się skutkami zmian klimatu. Tradycyjne podejście do gospodarowania wodami opadowymi opierało się głównie na ich szybkim odprowadzaniu za pomocą systemów kanalizacyjnych poza obszar zlewni. Wraz ze wzrostem częstości występowania podtopień miejskich, pogarszaniem jakości wód powierzchniowych oraz ograniczaniem naturalnej retencji zaczęto poszukiwać rozwiązań umożliwiających bardziej zrównoważone gospodarowanie wodami opadowymi. Pierwsze działania ukierunkowane na ograniczanie negatywnych skutków urbanizacji pojawiły się w drugiej połowie XX wieku. Szczególnie istotną rolę odegrały Stany Zjednoczone, gdzie rozwijano koncepcję Best Management Practices (BMP), obejmującą rozwiązania służące ograniczaniu odpływu powierzchniowego oraz poprawie jakości wód opadowych. W kolejnych latach podejście to ewoluowało w kierunku Low Impact Development (LID), którego podstawowym założeniem było odtwarzanie naturalnych procesów hydrologicznych poprzez zwiększanie infiltracji, retencji oraz wykorzystania wód opadowych w miejscu ich występowania (Fletcher et al., 2015).

Podobne kierunki rozwoju obserwowano w innych częściach świata. W Australii rozwinięto koncepcję Water Sensitive Urban Design (WSUD), integrującą zagadnienia gospodarki wodnej z planowaniem urbanistycznym i ochroną środowiska. W Wielkiej Brytanii oraz wielu krajach europejskich wdrażano Sustainable Drainage Systems (SuDS), których celem było ograniczenie odpływu powierzchniowego, poprawa jakości wód oraz zwiększenie odporności miast na skutki ekstremalnych zjawisk hydrologicznych (Fletcher et al., 2015; Williams et al., 2019; Wong & Brown, 2009). Pomimo różnic terminologicznych wszystkie te podejścia opierały się na podobnych założeniach, obejmujących wykorzystanie procesów naturalnych do gospodarowania wodami opadowymi.

W kolejnych latach następowała stopniowa integracja poszczególnych koncepcji w ramach szerszego podejścia opartego na rozwiązaniach wykorzystujących potencjał środowiska przyrodniczego. Coraz większą uwagę zaczęto zwracać nie tylko na funkcje hydrologiczne, lecz również na korzyści środowiskowe, społeczne i ekonomiczne wynikające z wdrażania takich rozwiązań. W efekcie rozwijane wcześniej niezależnie koncepcje zaczęły być postrzegane jako elementy wspólnego paradygmatu zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi.

Istotny wpływ na popularyzację tego podejścia miała koncepcja Nature-Based Solutions (NBS), promowana między innymi przez Komisję Europejską oraz Międzynarodową Unię Ochrony Przyrody (IUCN). Rozwiązania oparte na naturze zakładają wykorzystanie procesów zachodzących w ekosystemach do rozwiązywania problemów środowiskowych, społecznych i gospodarczych przy jednoczesnym zachowaniu lub wzmacnianiu funkcji przyrodniczych. W tym ujęciu niebiesko-zielona infrastruktura stanowi jeden z najważniejszych instrumentów wdrażania NBS w środowisku miejskim (Osaka et al., 2021).

W Europie rozwój niebiesko-zielonej infrastruktury został dodatkowo wzmocniony przez działania legislacyjne i strategiczne realizowane na poziomie Unii Europejskiej, podkreślające rolę rozwiązań opartych na naturze w ochronie różnorodności biologicznej, adaptacji do zmian klimatu oraz poprawie jakości życia mieszkańców. Kolejne dokumenty strategiczne, w tym Europejski Zielony Ład oraz Strategia UE na rzecz Bioróżnorodności 2030, wskazały rozwój infrastruktury zielonej i niebiesko-zielonej jako jeden z kluczowych elementów transformacji środowiskowej europejskich miast.

Dynamiczny rozwój niebiesko-zielonej infrastruktury obserwowany jest również w krajach azjatyckich. Szczególnie szeroko wdrażana jest ona w Chinach w ramach programu Sponge City, którego celem jest zwiększenie zdolności retencyjnych miast poprzez wykorzystanie rozwiązań opartych na infiltracji, retencji oraz ponownym wykorzystaniu wód opadowych (Liao et al., 2017). Program ten stanowi jeden z największych na świecie przykładów systemowego wdrażania niebiesko-zielonej infrastruktury w skali miejskiej.

W Polsce zainteresowanie niebiesko-zieloną infrastrukturą znacząco wzrosło w ostatnich latach wraz z nasilaniem się problemów związanych z podtopieniami miejskimi, suszami oraz skutkami zmian klimatu. Rozwiązania BGI coraz częściej uwzględniane są w dokumentach strategicznych, takich jak Miejskie Plany Adaptacji do zmian klimatu, a także w programach wspierających rozwój retencji miejskiej (Antoszewski et al., 2024). Jednocześnie wdrażanie tych rozwiązań napotyka na szereg barier związanych z ograniczeniami prawnymi, planistycznymi i organizacyjnymi. Pomimo tych trudności obserwowany jest stopniowy wzrost liczby inwestycji wykorzystujących elementy niebiesko-zielonej infrastruktury, takie jak ogrody deszczowe, zielone dachy, niecki bioretencyjne czy zbiorniki retencyjno-infiltracyjne.

Analiza rozwoju niebiesko-zielonej infrastruktury na świecie wskazuje, że niezależnie od stosowanej terminologii i lokalnych uwarunkowań obserwowany jest wspólny kierunek zmian polegający na odejściu od konwencjonalnych metod szybkiego odprowadzania wód opadowych na rzecz rozwiązań wykorzystujących naturalne procesy retencji, infiltracji i ewapotranspiracji. Współcześnie niebiesko-zielona infrastruktura stanowi jeden

z podstawowych elementów strategii adaptacji miast do zmian klimatu oraz zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi.

2.3. Projektowanie niebiesko-zielonej infrastruktury

Projektowanie niebiesko-zielonej infrastruktury stanowi proces integrujący zagadnienia hydrologiczne, środowiskowe i urbanistyczne, którego celem jest możliwie wierne odtworzenie naturalnych procesów obiegu wody w warunkach zurbanizowanych. W środowisku naturalnym znaczna część opadu infiltruje do gruntu lub wraca do atmosfery w wyniku ewapotranspiracji. Proces urbanizacji prowadzi natomiast do uszczelniania powierzchni, ograniczenia infiltracji oraz przyspieszenia odpływu powierzchniowego, zaburzając naturalny bilans wodny zlewni (Kaur & Gupta, 2022). Z tego względu projektowanie systemów opartych na BGI wymaga uwzględnienia mechanizmów hydrologicznych zachodzących zarówno w środowisku naturalnym, jak i w przestrzeni miejskiej.

Podstawową zasadą projektowania BGI jest gospodarowanie wodą opadową możliwie najbliżej miejsca jej powstawania. Podejście to zakłada stopniowe spowalnianie odpływu, zwiększanie retencji oraz wspieranie infiltracji w celu naśladowania naturalnych procesów hydrologicznych (Mayor of London, 2016). W praktyce rozwiązania projektowe dobierane są zgodnie z hierarchią preferowanych działań, umożliwiającą wybór najbardziej efektywnych metod zagospodarowania wód opadowych dla danej lokalizacji. Dzięki temu możliwe jest łączenie różnych elementów BGI w spójny system wykorzystujący komplementarne mechanizmy retencji, infiltracji i oczyszczania wód. Istotnym elementem tego podejścia jest kontrola u źródła (Source Control – SC), polegająca na przechwytywaniu wód opadowych bezpośrednio w miejscu ich wystąpienia. W pierwszej kolejności zgromadzona woda powinna być wykorzystywana do celów niewymagających jakości wody pitnej, takich jak podlewanie terenów zielonych. Dopiero w dalszej kolejności pełni funkcję retencyjną lub infiltracyjną (The Flood Hub, 2018). Takie podejście ogranicza obciążenie systemów kanalizacyjnych oraz zwiększa lokalne wykorzystanie zasobów wodnych.

Projektowanie niebiesko-zielonej infrastruktury powinno uwzględniać jej wielofunkcyjny charakter. Poszczególne elementy systemu, oprócz ograniczania ryzyka podtopień i wspomagania gospodarowania wodami opadowymi, powinny jednocześnie wspierać bioróżnorodność, poprawiać jakość przestrzeni miejskiej oraz dostarczać innych usług ekosystemowych. Konieczne jest również uwzględnianie różnych skal przestrzennych – od pojedynczych obiektów po całe zlewnie miejskie. Integracja rozwiązań na wielu poziomach zwiększa efektywność systemu oraz jego odporność na opady o zróżnicowanej intensywności (Kapetas & Fenner, 2020). Jednocześnie każdy etap projektowania powinien zapewniać skuteczne funkcjonowanie systemu zarówno podczas częstych opadów o niewielkiej intensywności, jak i podczas zdarzeń ekstremalnych.

W Polsce podstawowym narzędziem wspierającym wdrażanie niebiesko-zielonej infrastruktury są Miejskie Plany Adaptacji do zmian klimatu (MPA), opracowywane dla największych miast (Departament Gospodarki Wodnej i Żeglugi Śródlądowej, 2023).

Dokumenty te identyfikują główne zagrożenia klimatyczne oraz wskazują działania służące zwiększaniu retencji, ochronie terenów biologicznie czynnych i rozwojowi powierzchni bioretencyjnych. Ze względu na swój strategiczny charakter MPA nie posiadają jednak mocy wiążącej, co ogranicza ich bezpośredni wpływ na proces inwestycyjny. Znacznie większe możliwości kształtowania przestrzeni zapewniają Miejscowe Plany Zagospodarowania Przestrzennego (MPZP), które stanowią prawnie obowiązujące narzędzie planistyczne. Pomimo rosnącego znaczenia rozwiązań opartych na naturze, polski system prawny nadal nie zawiera jednoznacznej definicji niebiesko-zielonej infrastruktury. Powoduje to trudności w jej systemowym uwzględnianiu podczas planowania przestrzennego oraz realizacji inwestycji (Antoszewski et al., 2024). Dodatkowym ograniczeniem jest sposób stosowania wskaźnika powierzchni biologicznie czynnej. Obecne regulacje umożliwiają jego spełnienie przy wykorzystaniu rozwiązań o ograniczonej wartości ekologicznej i retencyjnej, co nie zawsze przekłada się na rzeczywistą poprawę funkcjonowania ekosystemów miejskich (Michalik-Śnieżek et al., 2024). Problem ten pogłębia niewielki stopień pokrycia kraju miejscowymi planami zagospodarowania przestrzennego, skutkujący dominacją decyzji o warunkach zabudowy.

W konsekwencji rozwój zabudowy często odbywa się bez kompleksowego uwzględnienia uwarunkowań hydrologicznych i środowiskowych.

W odpowiedzi na te ograniczenia w literaturze proponowane jest stosowanie wskaźników uwzględniających nie tylko powierzchnię terenów zielonych, lecz również ich jakość ekologiczną i zdolności retencyjne. Przykładem jest Urban Ecosystem Quality Index (UEQI), którego celem jest ocena rozwiązań miejskich pod względem ich wpływu na retencję wód opadowych, bioróżnorodność oraz funkcjonowanie ekosystemów miejskich (Antoszewski et al., 2024).

2.4. Wpływ niebiesko-zielonej infrastruktury na odpływ i retencję

Jednym z podstawowych celów wdrażania niebiesko-zielonej infrastruktury jest ograniczenie negatywnych skutków urbanizacji dla obiegu wody w zlewniach miejskich. Wzrost udziału powierzchni uszczelnionych prowadzi do zmniejszenia infiltracji, ograniczenia retencji terenowej oraz zwiększenia objętości i intensywności odpływu powierzchniowego. W konsekwencji dochodzi do wzrostu przepływów szczytowych kierowanych do systemów kanalizacyjnych oraz zwiększenia ryzyka przeciążeń hydraulicznych i podtopień miejskich (Eckart et al., 2017; Fletcher et al., 2015). Rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury przeciwdziałają tym zjawiskom poprzez wykorzystanie naturalnych procesów hydrologicznych, takich jak retencja, infiltracja, ewapotranspiracja oraz opóźnianie odpływu.

Wpływ BGI na funkcjonowanie zlewni miejskiej realizowany jest poprzez zmianę bilansu wodnego. Część wód opadowych zostaje zatrzymana w elementach infrastruktury, część infiltruje do gruntu, a część powraca do atmosfery w wyniku ewapotranspiracji. Powoduje to zmniejszenie objętości odpływu kierowanego do kanalizacji oraz wydłużenie czasu koncentracji odpływu. Efektem jest obniżenie wartości przepływów szczytowych oraz

splaszczanie hydrogramów odpływu, co ogranicza ryzyko występowania przeciążeń hydraulicznych w sieciach odwodnieniowych (Eckart et al., 2017; Hamel & Fletcher, 2014).

W literaturze wykazano wysoką skuteczność systemów bioretencyjnych, takich jak ogrody deszczowe, niecki infiltracyjne czy zagłębienia retencyjne. Rozwiązania te umożliwiają czasowe magazynowanie wód opadowych, ich infiltrację do gruntu oraz częściowe usuwanie zanieczyszczeń. Bioretencja może prowadzić do redukcji objętości odpływu przekraczającej 50%, natomiast redukcja przepływów szczytowych często osiąga wartości powyżej 70% (Hoban & Gambirazio, 2021; Sabbagh et al., 2025).

Istotną rolę w ograniczaniu odpływu powierzchniowego odgrywają również zielone dachy. Mechanizm ich działania opiera się na magazynowaniu wody w warstwie wegetacyjnej i substracie oraz na zwiększaniu ewapotranspiracji. Badania prowadzone w różnych strefach klimatycznych wskazują, że zielone dachy mogą zatrzymywać od kilkudziesięciu do ponad 70% rocznej objętości opadu, przy czym skuteczność retencyjna zależy od grubości warstw konstrukcyjnych, rodzaju roślinności oraz warunków meteorologicznych (Hill et al., 2017; Howell et al., 2017).

Znaczący potencjał retencyjny wykazują również nawierzchnie przepuszczalne. Ich działanie polega na umożliwieniu infiltracji wód opadowych do warstw konstrukcyjnych nawierzchni oraz gruntu rodzimego. Badania wskazują, że rozwiązania te skutecznie redukują zarówno objętość odpływu, jak i przepływy szczytowe, szczególnie podczas opadów o małej i średniej intensywności (Y. Y. Cheng et al., 2019; Orsi et al., 2025). Efektywność nawierzchni przepuszczalnych jest jednak uzależniona od utrzymania odpowiedniej przepuszczalności warstw filtracyjnych, która może ulegać pogorszeniu wskutek kolmatacji.

Analiza wyników badań prowadzonych w różnych krajach wskazuje, że największą skuteczność osiągają systemy wykorzystujące jednocześnie kilka komplementarnych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury. Łączenie elementów retencyjnych, infiltracyjnych i bioretencyjnych umożliwia zwiększenie zdolności magazynowania wód opadowych oraz bardziej równomierne rozłożenie odpływu w czasie. Podejście to jest zgodne z zasadą rozproszonego gospodarowania wodami opadowymi, zakładającą przechwytywanie i zagospodarowanie opadu możliwie najbliżej miejsca jego wystąpienia (Fletcher et al., 2015).

Z punktu widzenia funkcjonowania systemów kanalizacyjnych szczególne znaczenie ma zdolność BGI do redukcji przepływów szczytowych oraz opóźniania odpływu. Parametry te bezpośrednio wpływają na stopień wykorzystania przepustowości przewodów kanalizacyjnych, częstotliwość występowania przeciążeń hydraulicznych oraz ryzyko wylewów z kanalizacji. Ocena skuteczności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury wymaga zatem analiz uwzględniających nie tylko bilans wodny zlewni, lecz również procesy zachodzące w systemie odwodnienia. Z tego względu w badaniach dotyczących wpływu BGI coraz częściej wykorzystuje się modelowanie hydrodynamiczne, umożliwiające ilościową ocenę zmian przepływów, retencji oraz obciążeń hydraulicznych sieci kanalizacyjnych.

2.5. Modelowanie hydrodynamiczne systemów kanalizacyjnych

Modelowanie hydrodynamiczne stanowi obecnie jedno z podstawowych narzędzi wykorzystywanych do analizy i projektowania systemów odwodnienia terenów zurbanizowanych. Rosnąca złożoność miejskich systemów kanalizacyjnych, postępująca urbanizacja oraz obserwowane zmiany klimatu powodują, że tradycyjne metody wymiarowania oparte wyłącznie na uproszczonych zależnościach empirycznych często okazują się niewystarczające. Współczesne podejście do gospodarowania wodami opadowymi wymaga uwzględnienia zmienności opadów w czasie i przestrzeni, wzajemnych zależności pomiędzy elementami systemu odwodnienia oraz możliwości występowania zjawisk ekstremalnych (Nowakowska et al., 2017; Sañudo et al., 2020).

Modele hydrodynamiczne umożliwiają matematyczny opis procesów zachodzących w zlewniach miejskich, obejmujących transformację opadu w odpływ oraz przepływ wody w systemach kanalizacyjnych. W przeciwieństwie do modeli hydrologicznych, koncentrujących się głównie na określeniu wielkości odpływu ze zlewni, modele hydrodynamiczne uwzględniają również procesy hydrauliczne zachodzące w kanałach, zbiornikach retencyjnych oraz innych obiektach infrastruktury odwodnieniowej. Dzięki temu możliwe jest odwzorowanie zmian przepływu i napełnienia sieci w czasie, identyfikacja przeciążeń hydraulicznych oraz ocena skutków różnych scenariuszy opadowych (Sañudo et al., 2020).

Szczególne znaczenie modelowanie hydrodynamiczne odgrywa w analizie funkcjonowania systemów kanalizacyjnych podczas opadów o dużej intensywności. Umożliwia ono identyfikację odcinków sieci pracujących pod ciśnieniem, lokalizację miejsc występowania nadpiętnień oraz ocenę ryzyka wylewów z kanalizacji. Informacje te są trudne lub niemożliwe do uzyskania przy wykorzystaniu metod statycznych, które nie uwzględniają dynamicznego charakteru przepływu w sieci kanalizacyjnej (Sołtys & Stec, 2014). Z tego względu modelowanie hydrodynamiczne jest obecnie rekomendowane jako narzędzie wspomagające projektowanie, modernizację i eksploatację systemów odwodnienia miejskiego. Do najczęściej wykorzystywanych narzędzi należą EPA Storm Water Management Model (SWMM), InfoWorks ICM oraz systemy z rodziny MIKE. Programy te umożliwiają analizę przepływu w sieciach kanalizacyjnych, modelowanie procesów retencji i infiltracji oraz ocenę skutków wdrażania różnych strategii gospodarowania wodami opadowymi (Ansarifard et al., 2024; Keller et al., 2023; Sidek et al., 2021).

Szczególne miejsce wśród narzędzi modelowania zajmuje EPA Storm Water Management Model (SWMM), opracowany przez United States Environmental Protection Agency. Program ten jest jednym z najczęściej wykorzystywanych modeli hydrodynamicznych w badaniach naukowych oraz praktyce inżynierskiej ze względu na otwarty charakter, szerokie możliwości analityczne oraz ciągły rozwój funkcjonalności (US EPA, 2015). SWMM umożliwia symulację procesów opad–odpływ w zlewniach miejskich oraz analizę przepływu w systemach kanalizacji deszczowej, ogólnospławnej i rozdzielczej. Model pozwala również uwzględniać działanie zbiorników retencyjnych, przelewów burzowych, pompowni oraz innych elementów infrastruktury odwodnieniowej.

Istotną zaletą programu SWMM jest możliwość modelowania rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury za pomocą modułów Low Impact Development (LID). Narzędzia te umożliwiają odwzorowanie funkcjonowania elementów takich jak zielone dachy, ogrody deszczowe, niecki bioretencyjne czy nawierzchnie przepuszczalne. W modelu uwzględniane są procesy retencji, infiltracji, ewapotranspiracji oraz odpływu, co pozwala na ocenę wpływu poszczególnych rozwiązań BGI na bilans wodny zlewni oraz funkcjonowanie systemu kanalizacyjnego (Bako & Kazezyilmaz-Alhan, 2023; US EPA, 2015). W ostatnich latach modelowanie hydrodynamiczne coraz częściej wykorzystywane jest również do analiz związanych z adaptacją miast do zmian klimatu. Modele umożliwiają ocenę funkcjonowania systemów odwodnienia dla różnych scenariuszy opadowych, obejmujących zarówno warunki obecne, jak i prognozowane zmiany intensywności opadów. Pozwala to na określenie stopnia odporności istniejącej infrastruktury oraz ocenę skuteczności działań adaptacyjnych, w tym wdrażania rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury (Silva et al., 2021; Sobota et al., 2022).

Z punktu widzenia niniejszej pracy modelowanie hydrodynamiczne stanowi podstawowe narzędzie umożliwiające ilościową ocenę wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury na funkcjonowanie systemu odwodnienia. Zastosowanie modelu SWMM pozwala na analizę zmian przepływów, retencji oraz stopnia wykorzystania przepustowości sieci kanalizacyjnej w wariancie istniejącym oraz w scenariuszach uwzględniających wdrożenie rozproszonej retencji i rozwiązań BGI.

2.6. Wpływ zmian klimatu na funkcjonowanie systemów kanalizacyjnych

Zmiany klimatu należą do najważniejszych czynników wpływających współcześnie na funkcjonowanie systemów odwodnienia terenów zurbanizowanych. Wzrost temperatury powietrza prowadzi do intensyfikacji globalnego cyklu hydrologicznego, czego konsekwencją są zmiany charakterystyk opadowych obserwowane w wielu regionach świata. Szczególne znaczenie z punktu widzenia funkcjonowania infrastruktury odwodnieniowej ma wzrost częstości występowania opadów o dużej intensywności (IPCC, 2023a; Willems et al., 2012).

Podstawowym mechanizmem odpowiedzialnym za wzrost intensywności opadów jest zależność opisana równaniem Clausiusa–Clapeyrona. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się zdolność atmosfery do magazynowania pary wodnej, co sprzyja powstawaniu bardziej intensywnych zjawisk opadowych. Przyjmuje się, że maksymalna zawartość pary wodnej w atmosferze wzrasta średnio o około 7% na każdy 1°C wzrostu temperatury powietrza (IPCC, 2023b). W konsekwencji obserwowany jest wzrost częstości występowania krótkotrwałych opadów o dużym natężeniu, które stanowią szczególne zagrożenie dla obszarów zurbanizowanych.

Badania prowadzone w różnych częściach świata wskazują, że zmiany opadów nie mają charakteru jednorodnego przestrzennie. W wielu regionach obserwowany jest wzrost intensywności opadów ekstremalnych przy jednoczesnym zwiększeniu długości okresów bezopadowych. Oznacza to nasilanie się zarówno zagrożenia powodziowego, jak i problemów związanych z niedoborem zasobów wodnych (Nazeri Tahroudi, 2025; Zhou, 2021). W Europie,

w tym również w Polsce, obserwowane są tendencje wskazujące na wzrost częstości występowania opadów nawałnych oraz zwiększenie udziału opadów ekstremalnych w rocznej sumie opadów.

Zmiany charakterystyk opadowych mają bezpośredni wpływ na funkcjonowanie systemów kanalizacyjnych. Znaczna część istniejącej infrastruktury odwodnieniowej została zaprojektowana na podstawie historycznych danych opadowych przy założeniu stacjonarności procesów hydrologicznych. Podejście to zakładało względną niezmienność parametrów opadowych w czasie, co obecnie jest coraz częściej kwestionowane (L. Cheng & AghaKouchak, 2014). W rezultacie wiele systemów kanalizacyjnych funkcjonujących współcześnie nie jest dostosowanych do przejmowania przepływów generowanych przez opady o intensywności przekraczającej wartości przyjmowane na etapie projektowania.

Szczególnym problemem jest zmiana relacji pomiędzy natężeniem opadu, czasem jego trwania oraz częstością występowania, opisywana za pomocą krzywych IDF (Intensity–Duration–Frequency). Liczne badania wskazują, że nieuwzględnianie wpływu zmian klimatu może prowadzić do istotnego niedoszacowania natężeń opadów projektowych, a tym samym do zaniżenia przepustowości projektowanych systemów odwodnienia (L. Cheng & AghaKouchak, 2014; Silva et al., 2021). W konsekwencji wzrasta ryzyko występowania przeciążeń hydraulicznych, wylewów z kanalizacji oraz lokalnych podtopień.

W odpowiedzi na te wyzwania coraz większe znaczenie zyskuje koncepcja odporności (resilience) systemów miejskich. W przeciwieństwie do tradycyjnego podejścia, zakładającego pełne przejęcie odpływu przez system kanalizacyjny, współczesne strategie adaptacyjne koncentrują się na zwiększaniu zdolności systemu do funkcjonowania również w warunkach przekraczających założenia projektowe (Andersson et al., 2022; Asghari et al., 2023). Obejmuje to zarówno modernizację istniejącej infrastruktury technicznej, jak i wdrażanie rozwiązań opartych na naturze.

W tym kontekście niebiesko-zielona infrastruktura jest postrzegana jako jedno z podstawowych narzędzi adaptacji miast do zmian klimatu. Rozwiązania BGI umożliwiają zwiększenie retencji, infiltracji oraz ewapotranspiracji, ograniczając objętość odpływu kierowanego do kanalizacji oraz redukując przepływy szczytowe podczas opadów ekstremalnych. Dzięki temu mogą wspierać funkcjonowanie istniejących systemów odwodnienia bez konieczności kosztownej rozbudowy infrastruktury podziemnej (Dong et al., 2017).

Rosnąca niepewność związana z przyszłymi zmianami klimatu powoduje, że ocena skuteczności systemów odwodnienia coraz częściej wymaga uwzględniania analiz prognostycznych. Podejście to pozwala na określenie stopnia odporności istniejących systemów oraz ocenę efektywności działań adaptacyjnych w długim horyzoncie czasowym.

2.7. Luki badawcze

Pomimo intensywnego rozwoju badań dotyczących niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI) oraz rosnącego znaczenia rozwiązań opartych na naturze w gospodarce wodami opadowymi,

w literaturze nadal występuje szereg istotnych luk badawczych. Dotyczą one zarówno aspektów hydrologicznych i hydraulicznych, jak również problematyki integracji rozwiązań BGI z istniejącą infrastrukturą kanalizacyjną w warunkach miejskich.

Znaczna część dotychczasowych badań koncentruje się na analizie pojedynczych elementów niebiesko-zielonej infrastruktury, takich jak zielone dachy, ogrody deszczowe czy nawierzchnie przepuszczalne, najczęściej w skali lokalnej lub eksperymentalnej. W literaturze brakuje natomiast kompleksowych analiz obejmujących funkcjonowanie całych systemów odwodnienia miejskiego zintegrowanych z rozproszoną retencją i rozwiązaniami BGI. Szczególnie ograniczona jest liczba badań dotyczących wpływu jednoczesnego zastosowania wielu typów BGI na pracę rzeczywistych systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej w warunkach miejskich.

Kolejnym problemem jest ograniczona liczba badań nad niebiesko-zieloną infrastrukturą, uwzględniających prognozowane zmiany intensywności i częstotliwości opadów nawałnych. Tymczasem obserwowany wzrost temperatury powietrza wpływa na zwiększenie zawartości pary wodnej w atmosferze, co prowadzi do częstszego występowania krótkotrwałych, lecz bardzo intensywnych opadów przekraczających założenia projektowe istniejących systemów kanalizacyjnych. Pomimo rosnącego znaczenia tego problemu nadal brakuje kompleksowych badań oceniających skuteczność rozwiązań BGI w warunkach przyszłych scenariuszy opadowych.

Istotną luką badawczą pozostaje również niewystarczająca liczba analiz dotyczących historycznych centrów miast, gdzie występują największe ograniczenia przestrzenne i techniczne związane z modernizacją infrastruktury kanalizacyjnej. W takich obszarach możliwości rozbudowy tradycyjnej infrastruktury są silnie ograniczone przez istniejącą zabudowę, infrastrukturę podziemną oraz wymagania konserwatorskie. Jednocześnie to właśnie tam systemy kanalizacyjne są szczególnie narażone na przeciążenia hydrauliczne i występowanie wylewów podczas opadów ekstremalnych. Literatura wskazuje na potrzebę opracowania strategii adaptacyjnych wykorzystujących rozwiązania rozproszone i możliwe do wdrożenia w silnie zurbanizowanej przestrzeni miejskiej.

W literaturze podkreśla się także potrzebę dalszego rozwoju metod modelowania hydrodynamicznego uwzględniającego rozwiązania BGI. Pomimo dostępności narzędzi takich jak SWMM, nadal istnieją trudności związane z poprawnym odwzorowaniem procesów infiltracji, retencji, ewapotranspiracji oraz zmienności parametrów hydraulicznych elementów BGI. Szczególnie ograniczona jest liczba badań opartych na rzeczywistych danych eksploatacyjnych oraz analizujących wpływ parametrów modelowych na wyniki symulacji hydraulicznych.

Niedostatecznie rozpoznanym zagadnieniem pozostaje również efektywność niebiesko-zielonej infrastruktury w systemach ogólnospławnych. Większość dostępnych badań dotyczy systemów kanalizacji deszczowej, podczas gdy problem przeciążeń hydraulicznych i przelewów burzowych w systemach ogólnospławnych ma szczególne znaczenie środowiskowe i eksploatacyjne. Brakuje analiz określających wpływ rozwiązań BGI na

ograniczenie częstotliwości pracy przelewów burzowych oraz redukcję ilości ścieków odprowadzanych do odbiorników podczas opadów nawaalnych.

Przedstawiona analiza literatury wskazuje, że nadal brak kompleksowych badań umożliwiających ocenę wpływu rozproszonych rozwiązań BGI na funkcjonowanie rzeczywistych systemów kanalizacyjnych z wykorzystaniem modeli hydrodynamicznych oraz scenariuszy zmian klimatu. Wypełnienie tej luki stanowi przedmiot niniejszej rozprawy.

3. Teza, cel i zakres pracy

Współczesne systemy odwodnienia terenów miejskich coraz częściej nie spełniają wymagań wynikających z postępującej urbanizacji oraz zmian klimatu. Wzrost udziału powierzchni uszczelnionych oraz zwiększająca się intensywność opadów powodują przeciążenia hydrauliczne sieci kanalizacyjnych, prowadząc do lokalnych podtopień i pogorszenia bezpieczeństwa funkcjonowania miast. W odpowiedzi na te problemy coraz większe znaczenie zyskują rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury, umożliwiające retencję, infiltrację oraz opóźnienie odpływu wód opadowych w miejscu ich powstawania. W związku z tym zasadne jest określenie wpływu rozwiązań BGI na funkcjonowanie systemów kanalizacyjnych oraz ocena ich skuteczności jako narzędzia adaptacji miast do zmian klimatu.

Teza pracy: wdrożenie rozproszonych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI) w zlewniach miejskich umożliwia istotne zmniejszenie obciążenia hydraulicznego systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej poprzez redukcję odpływu powierzchniowego, opóźnienie przepływów szczytowych oraz zwiększenie lokalnej retencji wód opadowych, co zwiększa odporność miast na skutki urbanizacji i zmian klimatu.

Cel główny pracy: ocena wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury na funkcjonowanie systemu odwodnienia miasta oraz określenie ich skuteczności w ograniczaniu przeciążeń hydraulicznych sieci kanalizacyjnej w warunkach obecnych i prognozowanych zmian klimatu.

W ramach realizacji celu głównego wyznaczono następujące cele szczegółowe:

- Identyfikacja problemów hydraulicznych występujących w wybranym systemie kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej.
- Opracowanie hydrodynamicznego modelu systemu kanalizacyjnego miasta z wykorzystaniem programu SWMM.
- Kalibracja i walidacja modelu hydrodynamicznego na podstawie danych eksploatacyjnych i opadowych.
- Opracowanie scenariuszy opadowych uwzględniających obecne oraz prognozowane warunki klimatyczne.
- Ocena wpływu zastosowania BGI na:
 - redukcję odpływu powierzchniowego,
 - zmniejszenie przepływów szczytowych,
 - ograniczenie przeciążeń hydraulicznych sieci,
 - zmniejszenie liczby i skali wylewów z kanalizacji.
- Porównanie efektywności funkcjonowania systemu kanalizacyjnego w wariantcie istniejącym oraz wariantach z zastosowaniem rozwiązań BGI.

Zakres pracy obejmuje:

- analizę literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej niebiesko-zielonej infrastruktury, modelowania hydrodynamicznego oraz wpływu zmian klimatu na systemy odwodnienia terenów miejskich;

- charakterystykę miasta pod względem warunków hydrologicznych, klimatycznych, urbanistycznych oraz funkcjonowania systemu kanalizacyjnego;
- identyfikację obszarów szczególnie narażonych na przeciążenia hydrauliczne i podtopienia;
- zebranie oraz przygotowanie danych wejściowych niezbędnych do budowy modelu hydrodynamicznego;
- budowę, kalibrację i walidację modelu hydrodynamicznego systemu kanalizacyjnego w środowisku SWMM;
- opracowanie scenariuszy opadowych obejmujących:
 - deszcze miarodajne,
 - opady ekstremalne,
 - scenariusze uwzględniające zmiany klimatu;
- opracowanie wariantów zagospodarowania wód opadowych z wykorzystaniem rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury, takich jak:
 - zielone dachy,
 - ogrody deszczowe,
 - niecki bioretencyjne,
 - nawierzchnie przepuszczalne,
 - skrzynki rozsączające;
 - beczki przydomowe;
- przeprowadzenie symulacji hydrodynamicznych dla wariantu istniejącego oraz wariantów z zastosowaniem BGI;
- analizę i ocenę skuteczności zastosowanych rozwiązań pod względem hydraulicznym i retencyjnym;
- sformułowanie wniosków dotyczących możliwości adaptacji systemów odwodnienia miejskiego do zmian klimatu z wykorzystaniem niebiesko-zielonej infrastruktury.

4. Charakterystyka obszaru badań

4.1. Lokalizacja i charakterystyka miasta

Część badawczą niniejszej pracy zrealizowano w formie studium przypadku, obejmującego lewobrzeżną część systemu odwodnienia miasta Bolesławiec. Wybór tego obiektu umożliwił przeprowadzenie szczegółowej analizy funkcjonowania rzeczywistej sieci kanalizacyjnej oraz ocenę wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury na obciążenie hydrauliczne systemu z wykorzystaniem modelowania hydrodynamicznego. Charakterystykę obszaru badań przedstawiono poniżej.

Miasto Bolesławiec położone jest w południowo-zachodniej Polsce, w województwie dolnośląskim, nad rzeką Bóbr, będącą lewobrzeżnym dopływem Odry. Powierzchnia administracyjna miasta wynosi około 23 km², natomiast liczba mieszkańców przekracza 36 tys. osób. Gęstość zaludnienia wynosi około 1600 mieszkańców na kilometr kwadratowy, co jest wartością znacząco wyższą od średniej krajowej. Struktura przestrzenna miasta obejmuje zarówno historyczne centrum o zwartej zabudowie, jak również nowsze osiedla mieszkaniowe, tereny przemysłowe oraz strefy usługowe. Zróżnicowany charakter zagospodarowania przestrzennego wpływa na występowanie obszarów o różnym stopniu uszczelnienia powierzchni oraz odmiennych warunkach odpływu wód opadowych.

Bolesławiec jest miastem o wielowiekowej historii, którego rozwój przestrzenny następował etapowo wraz z rozbudową infrastruktury technicznej. W rezultacie na jego obszarze funkcjonują systemy kanalizacyjne powstające w różnych okresach rozwoju miasta, przy czym przeważa system kanalizacji ogólnospławnej.

W ostatnich latach miasto, podobnie jak wiele innych ośrodków miejskich w Polsce, doświadcza skutków postępującej urbanizacji oraz zmian klimatu, przejawiających się między innymi wzrostem częstości występowania krótkotrwałych opadów o wysokiej intensywności. Powoduje to zwiększenie obciążenia istniejącego systemu odwodnienia oraz wzrost ryzyka lokalnych podtopień. Jednocześnie możliwości rozbudowy tradycyjnej infrastruktury kanalizacyjnej są ograniczone przez istniejącą zabudowę, uwarunkowania przestrzenne oraz wysokie koszty inwestycyjne.

Z punktu widzenia problematyki niniejszej pracy Bolesławiec stanowi interesujący obszar badawczy ze względu na występowanie zarówno kanalizacji ogólnospławnej, jak i rozdzielczej, obecność terenów o wysokim stopniu uszczelnienia oraz obserwowane problemy związane z przeciążeniami hydraulicznymi systemu odwodnienia. Cechy te sprawiają, że miasto stanowi reprezentatywny przykład średniej wielkości ośrodka miejskiego, w którym rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury mogą stanowić istotny element adaptacji do zmian klimatu oraz ograniczania obciążenia hydraulicznego sieci kanalizacyjnej.

4.2. Uwarunkowania fizjograficzne i hydrologiczne

Rzędne terenu na obszarze miasta mieszczą się w przybliżeniu w przedziale od 170 do 240 m n.p.m., przy czym najniżej położone obszary zlokalizowane są w sąsiedztwie doliny

rzecznej. Rzeźba terenu ma charakter stosunkowo łagodny, jednak występujące różnice wysokości są wystarczające do wykształcenia wyraźnych kierunków spływu powierzchniowego. Generalny kierunek odpływu wód opadowych przebiega w stronę doliny Bobru, która stanowi główną oś hydrograficzną miasta.

Na terenie miasta występują przede wszystkim osady piaszczyste, piaszczysto-żwirowe oraz mady rzeczne związane z doliną Bobru. Właściwości infiltracyjne gruntów są zróżnicowane przestrzennie, jednak na znacznej części obszaru występują warunki sprzyjające infiltracji wód opadowych. Stanowi to istotną przesłankę do stosowania rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury wykorzystujących procesy infiltracyjne, takich jak ogrody deszczowe, niecki bioretencyjne czy nawierzchnie przepuszczalne.

Miasto położone jest w zlewni rzeki Bóbr należącej do dorzecza Odry. Bóbr pełni funkcję głównego odbiornika wód powierzchniowych oraz odbiornika odpływu z systemów kanalizacyjnych funkcjonujących na terenie miasta. Ze względu na charakter rzeki oraz znaczny udział terenów górskich w górnej części zlewni przepływy w Bobrze cechują się stosunkowo dużą dynamiką zmian. W okresach intensywnych opadów oraz wezbrań mogą występować znaczne wzrosty stanów wody, wpływające na warunki hydrauliczne funkcjonowania miejskiego systemu odwodnienia.

Z punktu widzenia funkcjonowania systemu odwodnienia szczególne znaczenie ma rola rzeki Bóbr jako odbiornika końcowego odpływu. W warunkach podwyższonych stanów wody mogą występować zjawiska cofki hydraulicznej ograniczające możliwość grawitacyjnego odprowadzania wód opadowych z miasta. Prowadzi to do zwiększenia obciążenia sieci kanalizacyjnej oraz wzrostu ryzyka występowania lokalnych podtopień. Uwarunkowania te należy uwzględnić zarówno podczas analiz hydraulicznych, jak i przy projektowaniu działań adaptacyjnych opartych na niebiesko-zielonej infrastrukturze.

Przedstawione cechy fizjograficzne i hydrologiczne wskazują, że warunki naturalne Bolesławca stwarzają możliwości wdrażania wybranych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury analizowanych w dalszej części pracy.

4.3. Warunki klimatyczne i charakterystyka opadów

Bolesławiec położony jest w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego, charakterystycznego dla południowo-zachodniej części Polski. Klimat regionu kształtowany jest przez napływ mas powietrza oceanicznego i kontynentalnego, co powoduje znaczną zmienność warunków meteorologicznych w ciągu roku. Obszar ten należy do najcieplejszych regionów kraju, charakteryzując się stosunkowo łagodnymi zimami oraz umiarkowanie ciepłymi latami. Długi okres wegetacyjny oraz relatywnie wysoka średnia temperatura powietrza sprzyjają intensywnym procesom ewapotranspiracji, które wpływają na lokalny bilans wodny.

Średnia roczna suma opadów atmosferycznych na obszarze Bolesławca wynosi około 650–750 mm, przy czym największe opady występują w miesiącach letnich. Charakterystyczną cechą rozkładu opadów jest dominacja opadów konwekcyjnych w okresie od maja do sierpnia.

Opady te cechują się dużą intensywnością oraz krótkim czasem trwania, przez co stanowią główne źródło przeciążeń hydraulicznych systemów kanalizacyjnych. W przeciwieństwie do opadów długotrwałych generują one znaczne przepływy szczytowe w krótkim czasie, szczególnie na obszarach o wysokim stopniu uszczelnienia powierzchni.

Z punktu widzenia funkcjonowania systemu kanalizacyjnego Bolesławca największe znaczenie mają opady krótkotrwałe o wysokiej intensywności. To właśnie one odpowiadają za powstawanie przepływów szczytowych prowadzących do przeciążeń hydraulicznych przewodów, pracy przelewów burzowych oraz lokalnych podtopień. W warunkach postępujących zmian klimatu przewiduje się dalszy wzrost częstości występowania takich zdarzeń, co zwiększa znaczenie działań adaptacyjnych ukierunkowanych na zwiększanie retencji i ograniczanie odpływu powierzchniowego.

W tabeli 1 przedstawiono maksymalne wysokości opadów dla wybranych czasów trwania i prawdopodobieństw przewyższenia dla miasta Bolesławiec wg atlasu opadów PMAOTP.

Tabela 1. Maksymalne wysokości opadów (w mm) dla wybranych czasów trwania i prawdopodobieństw przewyższenia dla miasta Bolesławiec wg atlasu PMAOTP

Czas trwania opadu t , min	Prawdopodobieństwo przewyższenia p				
	2%	10%	20%	50%	99,9%
5	19,64	14,27	12,17	9,27	7,47
10	23,90	17,36	14,69	10,94	9,06
15	26,82	19,45	16,52	12,29	10,14
30	32,71	23,69	20,05	15,46	12,29
45	36,77	26,60	22,52	17,53	13,69
60	39,97	28,95	24,42	18,84	14,79
90	44,98	32,47	27,42	21,13	16,62
120	48,86	35,59	29,79	22,92	17,96
180	55,00	39,74	33,47	25,73	19,97
360	69,38	49,25	40,94	31,18	24,26
720	89,98	61,00	50,17	37,88	28,97
1080	103,87	69,10	56,51	42,47	32,62
1440	114,66	75,45	61,48	46,06	35,06
2160	131,33	85,33	69,21	51,65	39,60
2880	144,33	93,06	75,27	56,03	42,40
4320	163,84	105,12	84,70	62,78	47,79

W celu wyznaczenia maksymalnych wysokości opadów deszczowych dla czasu trwania innego niż wymieniony w tabeli 1 można dokonać interpolacji wyników przy wykorzystaniu funkcji potęgowej postaci:

$$h = at^b$$

gdzie:

h – maksymalna wysokość opadu (mm),

t – czas występowania opadu (min),

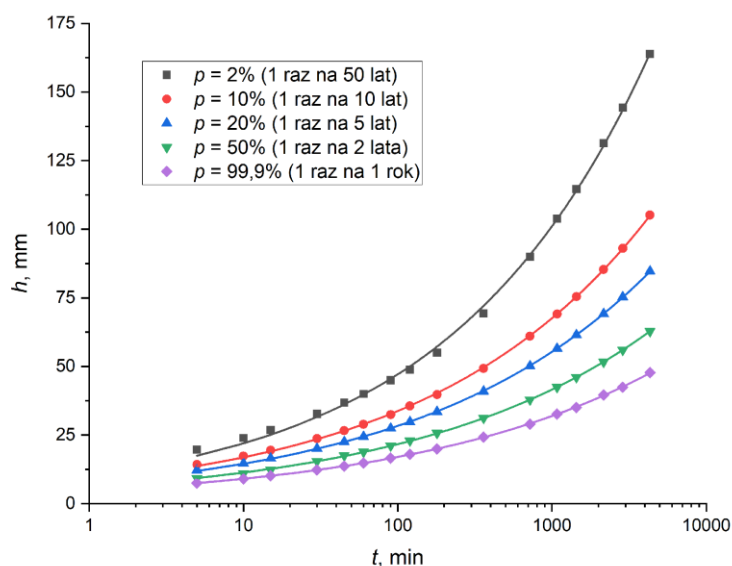
a, b – bezwymiarowe parametry równania potęgowego.

Na podstawie danych opadowych z atlasu PMAOTP wyznaczono parametry równania potęgowego opisującego zależność maksymalnej wysokości opadu od czasu jego trwania dla miasta Bolesławiec. Otrzymane wartości parametrów zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry równania potęgowego opisującego zależność maksymalnej wysokości opadu od czasu trwania dla miasta Bolesławiec

Parametry	Prawdopodobieństwo przewyższenia p				
	2%	10%	20%	50%	99,9%
a	10,24	8,432	7,443	5,899	4,836
b	0,331	0,301	0,290	0,283	0,273
R^2	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000

Na podstawie wyznaczonych parametrów równania potęgowego opracowano krzywe zależności maksymalnej wysokości opadu od czasu jego trwania dla poszczególnych prawdopodobieństw przewyższenia, których przebieg przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Krzywe wysokości opadów na podstawie danych z atlasu PMAOTP dla miasta Bolesławiec

Opracowane krzywe posłużą do wyznaczenia natężeń deszczów miarodajnych do modelowania pracy systemu, w tym w szczególności do oceny przepustowości sieci kanalizacyjnej oraz identyfikacji obszarów szczególnie narażonych na przeciążenia hydrauliczne i lokalne podtopienia. Ponadto będą one podstawą do oceny skuteczności planowanych rozwiązań retencyjnych oraz działań adaptacyjnych mających na celu zwiększenie odporności systemu kanalizacyjnego na skutki intensywnych opadów deszczu.

4.4. Charakterystyka zlewni objętej modelowaniem

Analizowana zlewnia zlokalizowana jest w lewobrzeżnej części miasta Bolesławiec, po zachodniej stronie rzeki Bóbr. Granice obszaru objętego modelowaniem wyznaczono na podstawie przebiegu istniejącego systemu kanalizacyjnego, kierunków spływu

powierzchniowego oraz granic administracyjnych miasta. Przyjęty obszar obejmuje zróżnicowane formy zagospodarowania terenu, charakterystyczne dla miejskich zlewni zurbanizowanych.

W centralnej części analizowanego obszaru dominują tereny zabudowy mieszkaniowej wraz z towarzyszącą infrastrukturą komunikacyjną. Istotnym elementem układu transportowego jest droga krajowa nr 94 przebiegająca przez zlewnię w kierunku wschód–zachód. Trasa ta pełni ważną funkcję komunikacyjną, łącząc obie części miasta rozdzielone doliną Bobru. Jednocześnie znaczny udział powierzchni utwardzonych związanych z infrastrukturą drogową wpływa na zwiększenie stopnia uszczelnienia zlewni oraz przyspieszenie odpływu wód opadowych do systemu kanalizacyjnego.

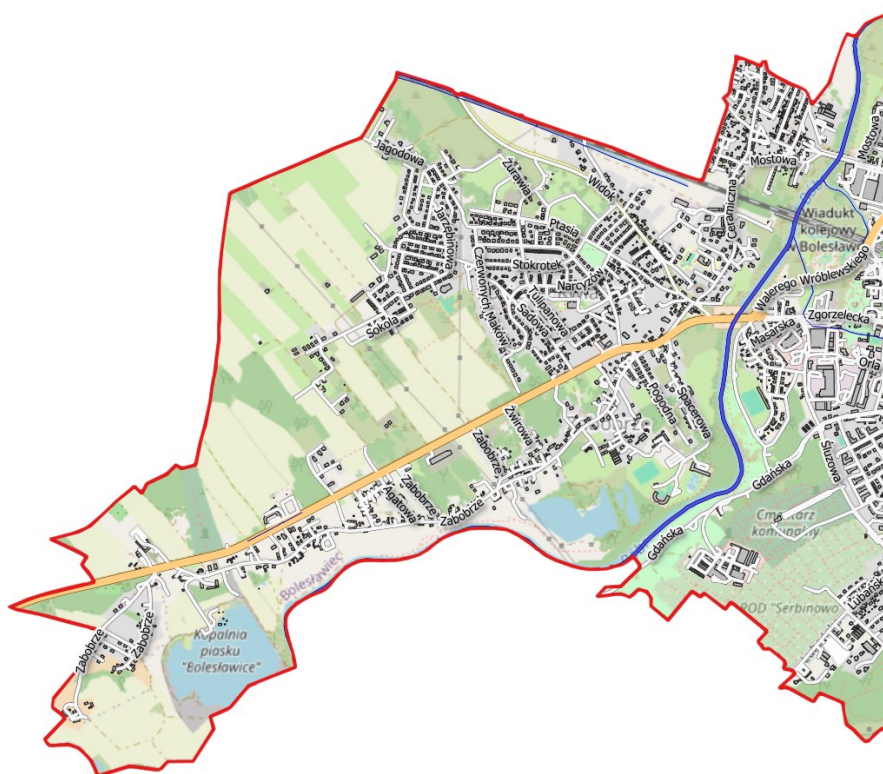
Zachodnia i południowo-zachodnia część zlewni charakteryzuje się niższym stopniem urbanizacji. W strukturze użytkowania terenu większy udział mają obszary biologicznie czynne, obejmujące między innymi kompleksy leśne, tereny trawiaste oraz nieużytki. Obecność powierzchni przepuszczalnych sprzyja procesom infiltracji i retencji, ograniczając wielkość odpływu powierzchniowego generowanego podczas opadów atmosferycznych.

Naturalną wschodnią granicę analizowanego obszaru stanowi rzeka Bóbr, będąca głównym elementem lokalnej sieci hydrograficznej oraz odbiornikiem części wód opadowych odprowadzanych z miejskiego systemu kanalizacyjnego.

Północna część zlewni obejmuje głównie obszary zabudowy jednorodzinnej o relatywnie niższym stopniu uszczelnienia niż tereny centralne. Występują tam liczne powierzchnie zielone, w tym ogrody przydomowe oraz działki niezabudowane, które pełnią istotną funkcję retencyjną i wpływają na kształtowanie lokalnego bilansu wodnego.

Na rysunku 2 przedstawiono granice analizowanej zlewni wraz z jej położeniem względem rzeki Bóbr oraz głównych elementów zagospodarowania terenu. Obszar ten stanowi podstawę dalszych analiz związanych z budową i kalibracją modelu hydrodynamicznego wykorzystanego w niniejszej pracy.

Zróżnicowana struktura zagospodarowania terenu, obejmująca zarówno obszary silnie uszczelnione, jak i tereny o wysokim udziale powierzchni biologicznie czynnych, powoduje znaczną zmienność warunków odpływu w obrębie analizowanej zlewni. Cechy te mają istotne znaczenie z punktu widzenia modelowania hydrodynamicznego oraz oceny skuteczności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury w ograniczaniu odpływu powierzchniowego i obciążenia hydraulicznego sieci kanalizacyjnej.



Rysunek 2. Mapa obszaru objętego modelowaniem

4.5. Istniejący system kanalizacji

Na terenie miasta dominuje system kanalizacji ogólnospławnej, obejmujący m.in. historyczne centrum oraz przyległe dzielnice. W systemie tym ścieki bytowo-gospodarcze oraz wody opadowe odprowadzane są wspólną siecią przewodów do oczyszczalni ścieków.

Istotnym elementem systemu ogólnospławnego są przelewy burzowe, których zadaniem jest ochrona systemu kanalizacyjnego oraz oczyszczalni ścieków przed przeciążeniem hydraulicznym podczas występowania opadów o dużej intensywności. W trakcie intensywnych opadów część mieszaniny ścieków i wód opadowych zrzucana jest bezpośrednio do odbiornika – rzeki Bóbr. Na terenie miasta eksploatowanych jest pięć przelewów burzowych.

Lewobrzeżna sieć kanalizacyjna miasta Bolesławiec obejmuje system kanałów, studni kanalizacyjnych, jeden przelew burzowy oraz przepompownię ścieków, która umożliwia transport ścieków do oczyszczalni zlokalizowanej przy ul. Granicznej na prawym brzegu rzeki Bóbr. Sieć ma charakter częściowo rozdzielczy – wody opadowe z wybranych obszarów są odprowadzane bezpośrednio do rzeki Bóbr za pomocą kanalizacji deszczowej.

Wieloletni rozwój miasta oraz etapowa rozbudowa infrastruktury doprowadziły do powstania sieci kanalizacyjnej zbudowanej z betonu, kamionki, GRP, PCV i PE. Średnice przewodów mieszczą się w zakresie od DN 150 do DN 1600, natomiast średnia głębokość posadowienia dna studzienek kanalizacyjnych wynosi 2,65 m. Szczegółową strukturę analizowanej sieci przedstawiono w dalszej części pracy.

4.6. Identyfikacja problemów hydraulicznych

Pomimo prowadzonej w ostatnich latach modernizacji infrastruktury odwodnieniowej system kanalizacyjny miasta Bolesławiec nadal narażony jest na występowanie problemów hydraulicznych typowych dla terenów silnie zurbanizowanych. Ich źródłem są zarówno historyczne uwarunkowania rozwoju sieci, jak również postępujące zmiany klimatu, zmiany sposobu zagospodarowania przestrzennego oraz wzrastający stopień uszczelnienia powierzchni zlewni miejskiej.

Jednym z kluczowych problemów eksploatacyjnych zidentyfikowanych przez Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji „Dolina Bobru” Sp. z o.o., eksploatujące miejski system kanalizacyjny w Bolesławcu, jest występowanie przeciążeń hydraulicznych podczas opadów o dużej intensywności. Znaczna część istniejącej infrastruktury została zaprojektowana dla warunków opadowych oraz stopnia urbanizacji odbiegających od obserwowanych współcześnie. Wraz z rozwojem miasta zwiększeniu uległa powierzchnia uszczelniona, co spowodowało wzrost objętości odpływu kierowanego do sieci kanalizacyjnej. W rezultacie podczas opadów nawalnych dochodzi do pracy przewodów pod ciśnieniem, lokalnych nadpiętrzeń i wylań oraz uruchamiania przelewów burzowych.

Istotnym ograniczeniem w zakresie poprawy funkcjonowania sieci są również uwarunkowania przestrzenne i techniczne. Możliwości rozbudowy infrastruktury kanalizacyjnej są ograniczone przez zwartą zabudowę, istniejące uzbrojenie podziemne oraz intensywne wykorzystanie przestrzeni miejskiej. Powoduje to, że tradycyjne działania polegające na budowie nowych kolektorów, zwiększaniu średnic przewodów czy realizacji dużych zbiorników retencyjnych są często trudne do przeprowadzenia lub wymagają znacznych nakładów inwestycyjnych.

Dodatkowym wyzwaniem jest konieczność dostosowania funkcjonowania systemu odwodnienia do obserwowanych zmian klimatu. W ostatnich latach coraz częściej występują opady krótkotrwałe o wysokiej intensywności, które generują znaczne przepływy w sieci kanalizacyjnej. Prognozy klimatyczne wskazują, że w przyszłości częstotliwość oraz intensywność tego typu zjawisk może wzrastać, prowadząc do dalszego zwiększania obciążeń hydraulicznych oraz wzrostu ryzyka występowania lokalnych podtopień.

Wobec ograniczonych możliwości rozbudowy tradycyjnej infrastruktury coraz większego znaczenia nabierają działania ukierunkowane na ograniczanie odpływu u źródła. Szczególną rolę mogą odgrywać rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury, umożliwiające zwiększenie retencji, infiltracji oraz czasowe magazynowanie wód opadowych w obrębie zlewni. Rozwiązania te pozwalają na redukcję przepływów szczytowych dopływających do kanalizacji, a tym samym na ograniczenie przeciążeń hydraulicznych występujących w sieci.

Przedstawione problemy hydrauliczne i eksploatacyjne uzasadniają potrzebę przeprowadzenia szczegółowych analiz umożliwiających ocenę funkcjonowania systemu odwodnienia miasta Bolesławiec. Szczególne znaczenie ma określenie wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury na wielkość odpływu, przebieg hydrogramów oraz stopień wykorzystania przepustowości przewodów kanalizacyjnych. W związku z powyższym dalszy

etap badań obejmował budowę, kalibrację i walidację modelu hydrodynamicznego systemu odwodnienia, stanowiącego podstawowe narzędzie oceny wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury na funkcjonowanie analizowanej zlewni.

5. Metodyka badań

5.1. Ogólna koncepcja badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury (BGI) na funkcjonowanie systemu odwodnienia miasta Bolesławiec oraz ocena możliwości ograniczenia obciążenia hydraulicznego sieci kanalizacyjnej w warunkach obecnych i prognozowanych zmian klimatu. Realizacja tego celu wymagała zastosowania metodyki badawczej opartej na modelowaniu hydrodynamicznym, umożliwiającym ilościową analizę procesów opad–odpływ zachodzących w zlewni miejskiej oraz ocenę pracy systemu kanalizacyjnego podczas zdarzeń opadowych o różnej charakterystyce. Przyjęta koncepcja badań obejmowała kilka następujących po sobie etapów, prowadzących od rozpoznania istniejącego systemu odwodnienia do oceny skuteczności wdrożenia rozproszonej retencji w postaci elementów niebiesko-zielonej infrastruktury.

Pierwszym etapem było pozyskanie oraz przygotowanie danych wejściowych niezbędnych do budowy modelu hydrodynamicznego. Obejmowało to zgromadzenie danych przestrzennych dotyczących sieci kanalizacyjnej, informacji o ukształtowaniu terenu, zagospodarowaniu przestrzennym, warunkach opadowych oraz parametrach eksploatacyjnych systemu odwodnienia. Szczególną uwagę poświęcono weryfikacji i uzupełnieniu danych pozyskanych z systemu GIS eksploatowanego przez Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji „Dolina Bobru”, ponieważ analiza wykazała występowanie braków i nieścisłości mogących wpływać na poprawność odwzorowania sieci w modelu.

Drugim etapem było opracowanie hydrodynamicznego modelu zlewni w środowisku EPA SWMM (Storm Water Management Model). W ramach tego etapu odtworzono geometrię sieci kanalizacyjnej, wyznaczono zlewnie cząstkowe oraz określono parametry opisujące procesy odpływu powierzchniowego i infiltracji. Model obejmował zarówno elementy kanalizacji ogólnospławnej, jak i deszczowej, a także obiekty mające istotny wpływ na funkcjonowanie systemu, takie jak przelewy burzowe, przepompownie oraz wyloty do odbiorników.

Następnie przeprowadzono proces kalibracji i walidacji modelu. Celem tego etapu było uzyskanie możliwie wiernego odwzorowania rzeczywistych warunków pracy systemu kanalizacyjnego. Kalibrację i walidację przeprowadzono na podstawie rzeczywistych zdarzeń opadowych zarejestrowanych przez sieć deszczomierzy eksploatowanych przez Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji „Dolina Bobru” Sp. z o.o. oraz danych eksploatacyjnych pochodzących z przepompowni ścieków transportującej ścieki z lewobrzeżnej części miasta do oczyszczalni zlokalizowanej na prawym brzegu rzeki Bóbr. Rejestrowane przepływy w przepompowni stanowiły podstawę do oceny zgodności wyników symulacji z rzeczywistym funkcjonowaniem systemu odwodnienia. Proces kalibracji i walidacji umożliwił ograniczenie niepewności modelu oraz zwiększenie wiarygodności dalszych analiz wariantowych.

Po uzyskaniu zweryfikowanego modelu opracowano zestaw scenariuszy obliczeniowych obejmujących zarówno warunki aktualne, jak i warianty uwzględniające wpływ zmian klimatu.

Scenariusze te oparto na deszczach miarodajnych do projektowania (z atlasu PMA XTP) oraz opadach o podwyższonej intensywności (spowodowanej zmianami klimatu) prognozowanych na przyszłość. Pozwoliło to na ocenę odporności systemu odwodnienia na zdarzenia ekstremalne.

Kolejnym etapem było opracowanie wariantów zagospodarowania wód opadowych wykorzystujących rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury. W modelu uwzględniono elementy rozproszonej retencji, których zadaniem było zwiększenie lokalnej retencji, infiltracji oraz opóźnienie odpływu powierzchniowego. Parametry techniczne poszczególnych rozwiązań określono na podstawie danych literaturowych oraz wytycznych projektowych dotyczących obiektów typu Low Impact Development (LID).

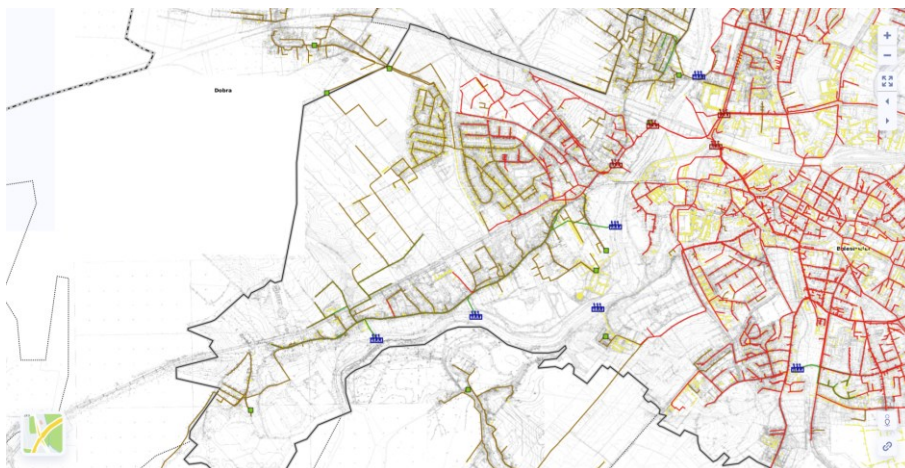
Dla wszystkich analizowanych wariantów wykonano symulacje hydrodynamiczne, których wyniki poddano ocenie pod względem hydraulicznym i retencyjnym. Analiza obejmowała między innymi wielkość odpływu powierzchniowego, przepływy szczytowe w sieci kanalizacyjnej, stopień wykorzystania przepustowości przewodów, liczbę przeciążeń hydraulicznych, częstotliwość pracy przelewów burzowych oraz wielkość retencji uzyskanej dzięki zastosowaniu rozwiązań BGI.

Ostatnim etapem badań było porównanie wyników uzyskanych dla stanu istniejącego oraz wariantów uwzględniających zastosowanie niebiesko-zielonej infrastruktury. Na tej podstawie dokonano oceny skuteczności analizowanych rozwiązań w ograniczaniu obciążenia hydraulicznego systemu kanalizacyjnego oraz określono ich potencjał jako narzędzia adaptacji miasta do skutków urbanizacji i zmian klimatu.

5.2. Dane wejściowe i ich przygotowanie

Przygotowanie modelu hydrodynamicznego lewobrzeżnego systemu odwodnienia miasta Bolesławiec wymagało zgromadzenia, weryfikacji oraz przetworzenia danych przestrzennych, technicznych, eksploatacyjnych i meteorologicznych. Ze względu na złożoność analizowanego systemu oraz konieczność zapewnienia wysokiej wiarygodności wyników modelowania, szczególny nacisk położono na ocenę jakości danych wejściowych przed rozpoczęciem budowy modelu w środowisku EPA SWMM.

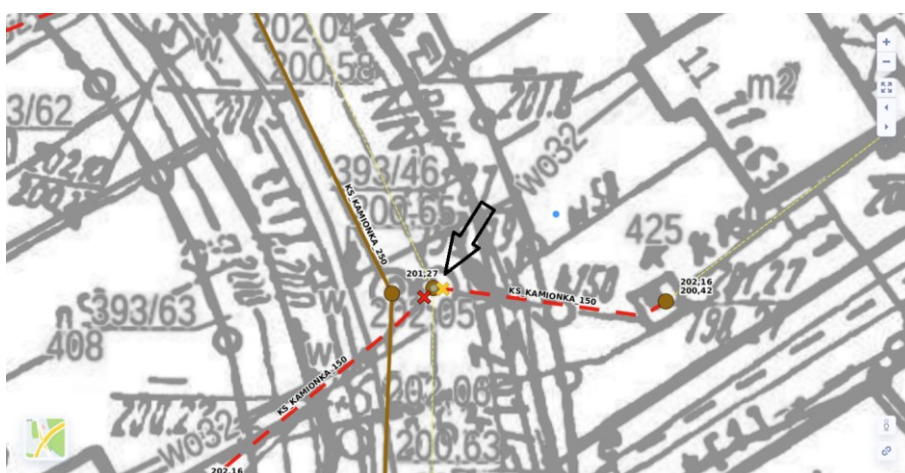
Podstawowym źródłem informacji o systemie kanalizacyjnym był System Informacji Przestrzennej (GIS) wykorzystywany przez Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji „Dolina Bobru” Sp. z o.o. System ten zawiera dane dotyczące przebiegu sieci kanalizacyjnej, lokalizacji studzienek, przelewów burzowych, przepompowni ścieków, wylotów kanalizacyjnych oraz parametrów technicznych przewodów, takich jak średnice, długości, materiały i rzędne wysokościowe. Na rysunku 3 przedstawiono obszar objęty opracowaniem.



Rysunek 3. Obszar objęty opracowaniem – GIS

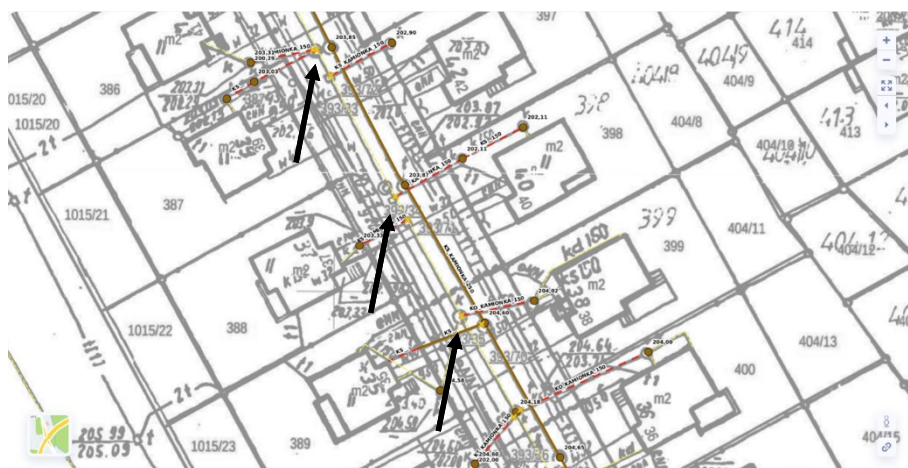
W celu oceny przydatności zgromadzonych danych do modelowania przeprowadzono szczegółową analizę jakości bazy GIS. Już na etapie wstępnej weryfikacji stwierdzono występowanie licznych niekompletności oraz niespójności, które mogły prowadzić do błędnej reprezentacji systemu kanalizacyjnego w modelu hydrodynamicznym.

Pierwszą grupę problemów stanowiły braki danych technicznych dotyczących studzienek i przewodów kanalizacyjnych. W wielu przypadkach brakowało informacji o rzędnych terenu, rzędnych dna kanałów, średnicach przewodów lub materiałach, z których zostały wykonane. Przykład studzienki pozbawionej podstawowych parametrów technicznych przedstawiono na rysunku 4. Brak danych wysokościowych uniemożliwia jednoznaczne określenie spadku przewodu oraz kierunku przepływu ścieków, co ma kluczowe znaczenie podczas modelowania hydraulicznego.



Rysunek 4. Przykładowa studzienka kanalizacyjna z brakującymi danymi w bazie GIS

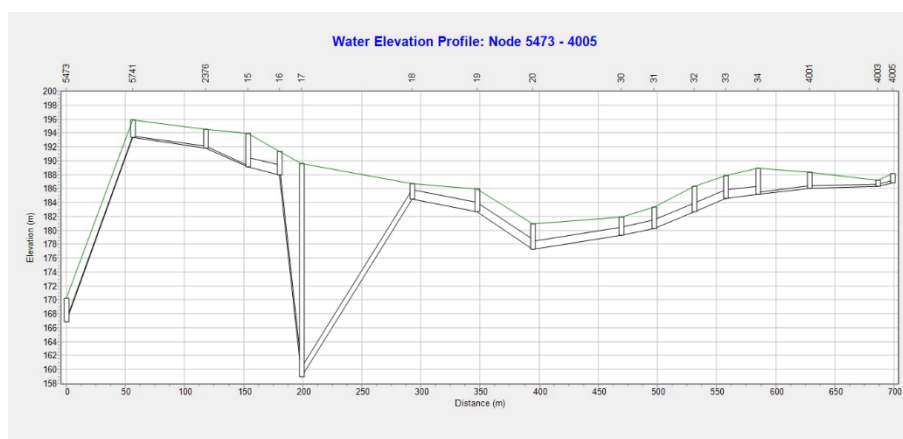
Drugą grupę problemów stanowiły rozbieżności pomiędzy bazą GIS a dokumentacją kartograficzną. Podczas analizy stwierdzono występowanie studzienek kanalizacyjnych widocznych na mapach sytuacyjno-wysokościowych, które nie zostały uwzględnione w bazie danych GIS. Przykład takich niezgodności przedstawiono na rysunku 5. Pominięcie obiektów pośrednich w modelu mogłoby prowadzić do nieprawidłowego odwzorowania geometrii sieci.



Rysunek 5. Brakujące studzienki kanalizacyjne w systemie GIS

Kolejnym zidentyfikowanym problemem były niejednoznaczności związane z oznaczeniami przewodów kanalizacyjnych. Analiza wykazała przypadki, w których ten sam odcinek sieci występował pod różnymi nazwami lub identyfikatorami. Niespójności te mogły prowadzić do dublowania elementów sieci lub błędnej interpretacji powiązań hydraulicznych pomiędzy poszczególnymi obiektami.

Szczególną uwagę zwrócono również na poprawność danych wysokościowych. Analiza profili podłużnych wykazała występowanie odcinków sieci charakteryzujących się przeciwpadkami lub gwałtownymi zmianami rzędnych nieuzasadnionymi warunkami terenowymi. Przykład takiej sytuacji przedstawiono na rysunku 6.



Rysunek 6. Profil podłużny kanalizacji z błędnymi rzędnymi

Tego rodzaju nieprawidłowości mogły wynikać zarówno z błędów podczas wprowadzania danych do systemu GIS, jak i z nieaktualnych danych inwentaryzacyjnych. Ponieważ wpływają one bezpośrednio na warunki przepływu w modelu hydraulicznym, wszystkie zidentyfikowane przypadki zostały zakwalifikowane do dalszej weryfikacji.

W celu usunięcia wykrytych niezgodności przeprowadzono wizje terenowe oraz dodatkową inwentaryzację wybranych elementów sieci kanalizacyjnej. Działania te obejmowały identyfikację brakujących obiektów, weryfikację lokalizacji studzienek, pomiary

wysokościowe oraz kontrolę ciągłości przewodów kanalizacyjnych. Szczególną uwagę poświęcono obiektom, dla których brak danych lub ich nieprawidłowość mogły mieć istotny wpływ na wyniki modelowania.

Równolegle przygotowano dane niezbędne do opisu zlewni odwadnianych przez system kanalizacyjny. W tym celu wykorzystano numeryczny model terenu o rozdzielczości 1 m, dane dotyczące użytkowania terenu oraz informacje o stopniu uszczelnienia powierzchni. Dodatkowo wykorzystano platformę SCALGO Live umożliwiającą analizę pokrycia terenu oraz określenie udziału powierzchni przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych w obrębie poszczególnych zlewni.

Do przygotowania danych opadowych wykorzystano dwa komplementarne źródła informacji. Pierwszym z nich były charakterystyki opadowe pochodzące z atlasu PMAOTP dla miasta Boleśławiec, które posłużyły do opracowania deszczów miarodajnych oraz scenariuszy projektowych wykorzystywanych podczas analiz hydraulicznych. Drugim źródłem były dane pomiarowe z sieci deszczomierzy eksploatowanych przez Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji „Dolina Bobru” Sp. z o.o. Dane te obejmowały rzeczywiste przebiegi zdarzeń opadowych zarejestrowanych na terenie miasta i zostały wykorzystane podczas procesu kalibracji i walidacji modelu hydrodynamicznego.

Budowa modelu hydrodynamicznego wymagała integracji danych pochodzących z różnych źródeł, obejmujących zarówno informacje przestrzenne i techniczne dotyczące infrastruktury kanalizacyjnej, jak również dane hydrologiczne, meteorologiczne oraz wyniki własnej inwentaryzacji terenowej. Poszczególne zbiory danych wykorzystano na różnych etapach przygotowania, budowy oraz kalibracji modelu SWMM. Zestawienie najważniejszych grup danych wraz z ich źródłem i przeznaczeniem przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie danych wykorzystanych w modelu

Grupa danych	Źródło danych	Zastosowanie danych
Sieć kanalizacyjna	GIS PWiK Dolina Bobru	Geometria modelu
Numeryczny model terenu	NMT 1 m	Wyznaczenie zlewni
Pokrycie terenu	SCALGO Live	Parametryzacja zlewni
Dane opadowe	PMAOTP, deszczomierze	Scenariusze opadowe, kalibracja i walidacja
Dane terenowe	Inwentaryzacja własna	Weryfikacja GIS

Efektem przeprowadzonych prac była kompletna i zweryfikowana baza danych obejmująca geometrię sieci kanalizacyjnej, parametry techniczne obiektów, charakterystyki zlewni oraz dane opadowe. Tak przygotowany zbiór danych stanowił podstawę do budowy, kalibracji i walidacji modelu hydrodynamicznego przedstawionego w dalszej części pracy.

5.3. Budowa modelu hydrodynamicznego (SWMM)

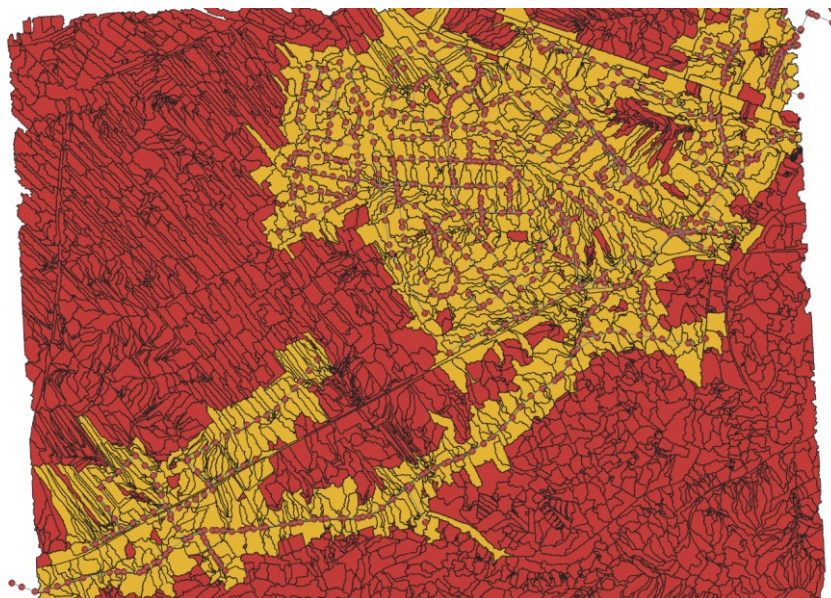
Model hydrodynamiczny analizowanego systemu odwodnienia opracowano w środowisku EPA Storm Water Management Model (SWMM), które jest jednym z najczęściej wykorzystywanych narzędzi do modelowania procesów opad–odpływ oraz przepływu w sieciach kanalizacyjnych. Model został przygotowany na podstawie zweryfikowanych

danych przestrzennych, technicznych i eksploatacyjnych opisanych w poprzednim podrozdziale.

Pierwszym etapem budowy modelu było odwzorowanie geometrii systemu kanalizacyjnego. Do modelu wprowadzono przebieg przewodów kanalizacyjnych, lokalizację studzienek, przelewów burzowych, przepompowni ścieków oraz wylotów do odbiorników. Dla każdego przewodu określono podstawowe parametry hydrauliczne, obejmujące długość, średnicę, materiał wykonania oraz rzędne wysokościowe. Pozwoliło to na utworzenie cyfrowego odpowiednika rzeczywistego systemu kanalizacyjnego funkcjonującego na terenie miasta Bolesławiec.

Kolejnym etapem było wyznaczenie zlewni cząstkowych przypisanych do poszczególnych węzłów modelu. W tym celu wykorzystano numeryczny model terenu o rozdzielczości 1 m oraz dane dotyczące przebiegu sieci kanalizacyjnej. Analizy wykonano w środowisku QGIS, wykorzystując narzędzia hydrologiczne umożliwiające określenie kierunków spływu powierzchniowego oraz granic naturalnych zlewni odpływu.

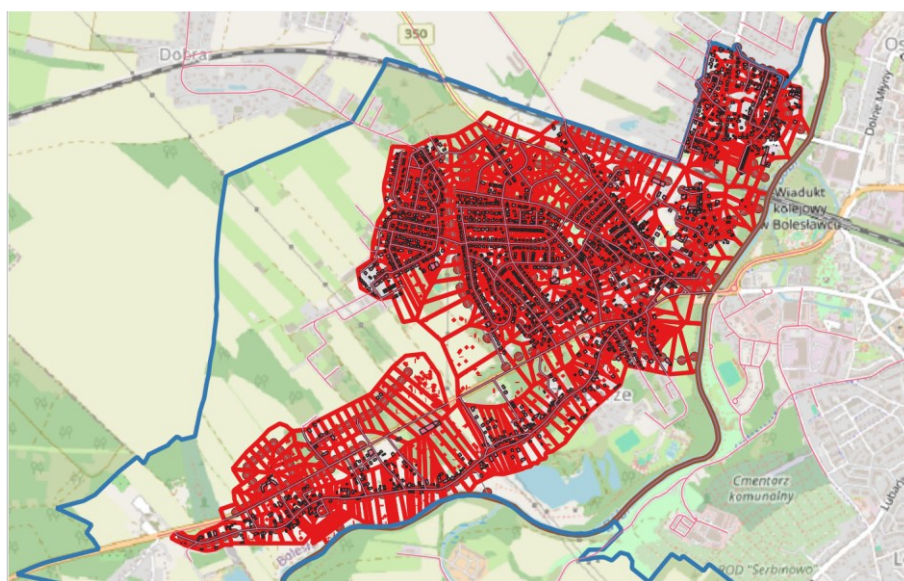
Na podstawie analizy topografii terenu wyznaczono obszary odprowadzające odpływ powierzchniowy do poszczególnych elementów systemu kanalizacyjnego. W pierwszym etapie określono naturalne kierunki spływu wynikające z ukształtowania terenu. Następnie przeprowadzono selekcję obszarów mających rzeczywisty wpływ na funkcjonowanie systemu odwodnienia poprzez uwzględnienie rozmieszczenia infrastruktury kanalizacyjnej oraz charakteru zagospodarowania terenu. Wyeliminowano obszary nieuczestniczące bezpośrednio w odpływie do analizowanej sieci, takie jak rozległe tereny leśne i obszary niezwiązane hydraulicznie z systemem kanalizacyjnym. Wyniki tego etapu przedstawiono na rysunku 7.



Rysunek 7. Naturalne zlewnie odpływu wyznaczone na podstawie numerycznego modelu terenu

W kolejnym kroku przeprowadzono proces przypisania obszarów zlewni do poszczególnych studzienek kanalizacyjnych stanowiących węzły modelu. W przeciwieństwie

do prostego podejścia opartego wyłącznie na kryterium odległości od najbliższego węzła uwzględniono zarówno rzeczywiste kierunki spływu powierzchniowego, jak i geometrię sieci kanalizacyjnej. Pozwoliło to na uzyskanie bardziej realistycznego odwzorowania procesów zachodzących w analizowanej zlewni miejskiej. Dodatkowo granice zlewni dostosowano do granic administracyjnych miasta oraz przebiegu infrastruktury kanalizacyjnej. W obszarach peryferyjnych zastosowano procedurę korekty geometrii z wykorzystaniem stref buforowych wyznaczonych wokół przewodów i studzienek kanalizacyjnych. Dzięki temu uzyskano podział zlewni odpowiadający rzeczywistym warunkom funkcjonowania systemu odwodnienia, przedstawiony na rysunku 8.

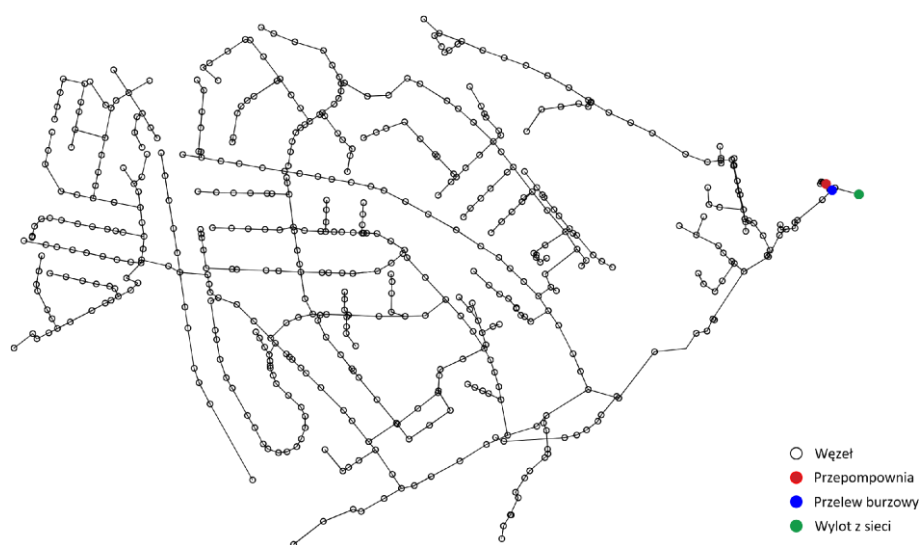


Rysunek 8. Zlewnie naturalne przypisane do odpowiednich węzłów

W wyniku przeprowadzonych analiz wyznaczono 825 zlewni cząstkowych przypisanych do odpowiednich węzłów modelu. Dla każdej z nich określono podstawowe parametry hydrologiczne wymagane przez model SWMM, obejmujące powierzchnię zlewni, średni spadek terenu, szerokość hydrauliczną oraz udział powierzchni uszczelnionych i przepuszczalnych. Parametry związane z użytkowaniem terenu określono na podstawie analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem platformy SCALGO Live. Pozwoliło to określić stopień uszczelnienia poszczególnych zlewni oraz wyznaczyć parametry odpływu powierzchniowego i infiltracji. Uzyskane wartości wykorzystano następnie podczas parametryzacji modelu SWMM.

Podczas budowy modelu hydraulicznego nie uwzględniono części lewobrzeżnej zlewni miasta obsługiwanej przez kanalizację deszczową, z której wody opadowe są odprowadzane bezpośrednio do odbiornika, tj. rzeki Bóbr. Wynikało to z braku opomiarowania wylotów kanalizacji deszczowej, co uniemożliwiało wiarygodne odwzorowanie odpływu oraz przeprowadzenie kalibracji modelu. W związku z tym model opracowano wyłącznie dla części systemu kanalizacyjnego, z której zarówno ścieki bytowe, jak i wody opadowe są odprowadzane do przepompowni ścieków (dane pomiarowe z przepompowni umożliwiły bowiem przeprowadzenie kalibracji i walidacji modelu hydraulicznego). W rezultacie

otrzymano model hydrauliczny obejmujący 527 zlewni, 529 studni kanalizacyjnych, 544 przewody, przelew burzowy oraz przepompownię ścieków, którego schemat przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Schemat przebiegu sieci kanalizacyjnej wraz ze studzienkami kanalizacyjnymi

W wyniku przeprowadzonych prac opracowano model hydrodynamiczny systemu odwodnienia miasta Bolesławiec. Podstawowe parametry charakteryzujące opracowany model zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Podstawowe parametry modelu SWMM

Parametr	Wartość
Liczba węzłów	529
Liczba przewodów	544
Liczba zlewni cząstkowych	527
Całkowita powierzchnia zlewni	146,10 ha
Długość sieci	18,28 km
Liczba przelewów burzowych	1
Liczba przepompowni	1
Odbiornik końcowy	1

Opracowany model obejmował zarówno proces transformacji opadu w odpływ powierzchniowy, jak i przepływ ścieków oraz wód opadowych w systemie kanalizacyjnym. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie szczegółowych analiz hydraulicznych obejmujących identyfikację przeciążeń sieci, ocenę pracy przelewów burzowych oraz analizę skuteczności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury w ograniczaniu obciążenia hydraulicznego systemu odwodnienia miasta Bolesławiec.

5.4. Kalibracja i walidacja modelu

Model hydrodynamiczny nie będzie stanowił wiarygodnego odwzorowania rzeczywistej sieci, jeśli nie zostanie odpowiednio skalibrowany i zwalidowany. Kalibracja modelu

w programie SWMM polega na iteracyjnym doborze parametrów tak, aby uzyskać jak największą zgodność pomiędzy wynikami pomiarowymi a wynikami symulacji. Celem kalibracji jest odwzorowanie całego przepływu w czasie, obejmując okresy suche oraz deszczowe, a nie wyłącznie uzyskanie zgodności dla pojedynczych przepływów. Dla modeli hydrodynamicznych ważne jest poprawne odwzorowanie zarówno całkowitej objętości odpływu, jak i przepływów maksymalnych. Dzięki tym wartościom możliwe są m.in. ocena przepustowości przewodów, ocena ryzyka przeciążeń hydraulicznych oraz ocena możliwości wystąpienia lokalnych wylań.

Podstawę procesu kalibracji i walidacji stanowiły dane pomiarowe pozyskane z przepływomierza znajdującego się na przepompowni Ceramiczna. Przepompowuje ona ścieki bytowo-gospodarcze oraz wody opadowe z lewobrzeża miasta i okolicznych miejscowości (przepompownie Mierzwin oraz Dobra). Dane pomiarowe obejmowały okres jednego roku, rozpoczynając pomiar od 1 lipca 2025 r. Pomiary były rejestrowane w kroku jednogodzinnym, przyjętym następnie w obliczeniach kalibracyjnych. Wszystkie przepływy wyrażono w dm^3/s . W trakcie przygotowywania danych kalibracyjnych zweryfikowano zgodność jednostek pomiarowych oraz w przypadku zapisania danej w m^3/h zastosowano przeliczenie.

Następnym etapem prac była analiza kompletności i jakości pomiarów. Sprawdzono ich ciągłość, wyszukując brakujące pomiary; zidentyfikowano zdublowane pomiary oraz wartości odbiegające od charakterystyk przepływów na danej pompowni. Analiza danych potwierdziła, że wymienione błędy spowodowane były chwilowym zakłóceniem rejestru danych, a nie rzeczywistym zanikiem bądź gwałtownym wzrostem przepływu. Aby zachować ciągłość godzinową, brakujące pomiary zostały uzupełnione metodą interpolacji eksperckiej. Wykonano ją poprzez analizę charakterystycznego dobowego rozkładu przepływów, analogicznego przepływu w pozostałych dniach tygodnia, występowania opadów oraz zachowania przepływu w kolejnych dobach. Dzięki temu uzyskano naturalny charakter przepływu na pompowni bez sztucznego wygładzania hydrogramów. Dodatkowo zidentyfikowano wartości odstające, których wartości odbiegały od pozostałych obserwowanych w godzinach sąsiednich. Każdą z nich przeanalizowano indywidualnie, uwzględniając nagłe zmiany dopływu, jak i wystąpienie opadów ekstremalnych. Korekta została wykonana wyłącznie w przypadkach, gdzie analiza wykazała błąd pomiarowy.

Na terenie Bolesławca znajdują się dwa deszczomierze. W celu przeprowadzenia kalibracji wybrano ten położony bliżej lewej strony miasta. Z bazy danych uzyskanej od PWiK pozyskano dane opadowe w kroku pięciominutowym, zgodnym z działaniem urządzeń pomiarowych. Ze względu na przyjęty krok godzinowy, uzależniony od pomiarów na przepompowni, przeprowadzono agregację danych. Polegała ona na zsumowaniu wysokości opadu z dwunastu następujących po sobie przedziałów czasowych. Otrzymany szereg godzinowy zachował całkowitą sumę opadów, jednocześnie dostosowując się do potrzeb modelu hydrodynamicznego.

Po przygotowaniu danych wykonano symulacje hydrodynamiczne w środowisku EPA SWMM. Ocena jakości modelu opierała się na analizie stopnia zgodności pomiędzy przepływami uzyskanymi z pomiarów terenowych a symulacji numerycznej. Uwzględniając

wzajemne uzupełnianie się wielu wskaźników, zdecydowano się na sprawdzenie korelacji pomiędzy przedziałami czasowymi, wielkością błędów, zgodnością bilansu objętości oraz poprawnością odwzorowania przepływów maksymalnych.

Do wskaźników zgodności przebiegu hydrogramów zalicza się współczynnik korelacji Pearsona (R) czy współczynnik determinacji R^2 . Wysokie wartości tych wskaźników świadczą o poprawnym odwzorowaniu dynamiki zmian przepływu (Gupta et al., 2009; Krause et al., 2005; Legates & McCabe Jr., 1999). Aby sprawdzić poprawność odwzorowania całkowitej objętości przepływów, zdecydowano się na wykorzystanie wskaźnika Volume Error (Błąd Objętości). Określa on różnicę między całkowitą objętością przepływu uzyskaną w wyniku symulacji a pomiarami rzeczywistymi. Do wskaźników oceniających poprawność odwzorowania przepływów charakterystycznych zalicza się $\Delta Q_{\max}$, tj. błąd względny przepływu maksymalnego, który informuje o zgodności wartości kulminacji przepływu. W przypadku modelowania systemów kanalizacyjnych ta wartość ma znaczenie praktyczne – jej poprawność odwzorowania wpływa na ocenę przepustowości przewodów, pracy przepompowni oraz ryzyka wystąpienia przeciążeń hydraulicznych (D. N. Moriasi et al., 2007).

Przedstawione i uwzględnione wskaźniki stanowią zestaw miar, który pozwala na kompleksową ocenę zgodności wyników symulacji z danymi pomiarowymi. Każdy z nich opiera się na innym aspekcie jakości modelu, z tego względu nie należy ograniczać się wyłącznie do jednego z nich, gdyż mogłoby prowadzić do błędnej interpretacji wyników. Z tego powodu w niniejszej pracy przyjęto podejście wielokryterialne, zgodne z zalecaniami literaturowymi dotyczącymi oceny jakości modeli hydrodynamicznych (tabela 5).

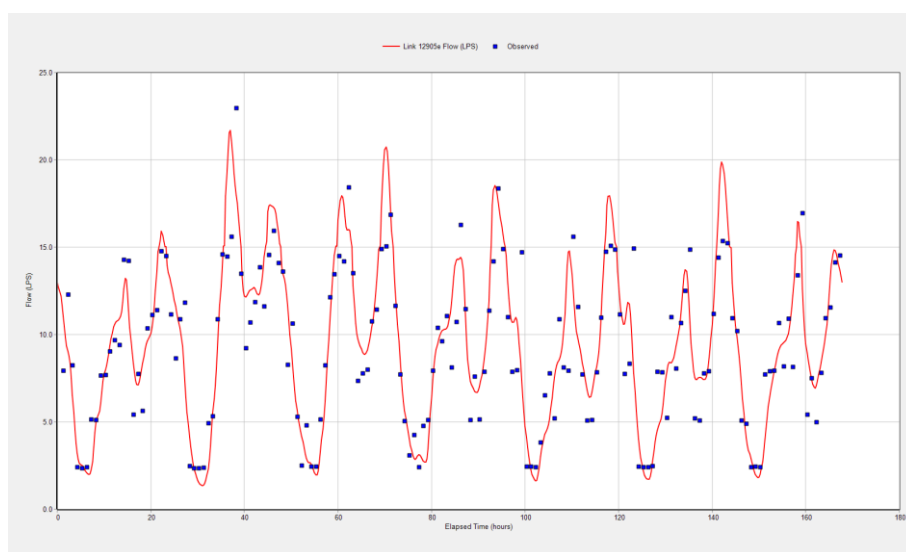
Tabela 5. Kryteria jakościowe kalibracji modelu

Wskaźnik	Jednostka	Bardzo dobry	Akceptowalny
Pearson R	-	$r \geq 0,90$ (bardzo dobry)	$0,50 \leq r < 0,90$
R^2	-	$0,75 < R^2 \leq 1,00$	$0,60 < R^2 \leq 0,75$
Volume Error	%	$VE < 15\%$	$\pm 15\%$ do $\pm 25\%$
$\Delta Q_{\max}$	%	$\Delta Q_{\max} < 10\%$	$\pm 10\%$ do $\pm 20\%$

Pierwszy etap kalibracji modelu hydrodynamicznego przeprowadzono dla okresu bezdeszczowego obejmującego dni od 24 do 30 kwietnia 2026 r. Wybór tego przedziału czasowego wynikał z braku opadów atmosferycznych, dzięki czemu możliwe było wyeliminowanie wpływu odpływu wód opadowych na funkcjonowanie systemu kanalizacyjnego. Pozwoliło to skoncentrować proces kalibracji na prawidłowym odwzorowaniu dopływu ścieków bytowo-gospodarczych oraz dobowej zmienności przepływów w analizowanej zlewni.

Symulację przeprowadzono dla siedmiodniowego okresu obejmującego pełne cykle dobowe. Uzyskane w modelu hydrogramy przepływu porównano z danymi zarejestrowanymi przez przepływomierz zlokalizowany na przepompowni Ceramiczna. Analizie poddano zarówno zgodność przebiegu hydrogramów, jak i wartości przepływów charakterystycznych, zwracając szczególną uwagę na poprawność odwzorowania godzin występowania przepływów maksymalnych i minimalnych oraz amplitudy dobowych zmian przepływu.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono iteracyjną kalibrację modelu polegającą na modyfikacji wartości współczynnika szorstkości Manninga dla przewodów kanalizacyjnych. W kolejnych iteracjach analizowano stopień zgodności pomiędzy hydrogramami uzyskanymi z modelu a danymi pomiarowymi z przepompowni, dążąc do możliwie najlepszego odwzorowania przebiegu przepływu w okresie bezdeszczowym. Proces kalibracji zakończono po uzyskaniu satysfakcjonującej zgodności zarówno pod względem kształtu hydrogramów, jak i wartości charakterystycznych przepływu (przy wartości n do wzoru Manninga na poziomie $n = 0,022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$). Przebieg przepływów uzyskanych z modelu oraz wartości zarejestrowane na przepompowni Ceramiczna przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10. Hydrogram przepływów uzyskanych z modelu oraz wartości zarejestrowane na przepompowni Ceramiczna w dniach 24–30 kwietnia 2026

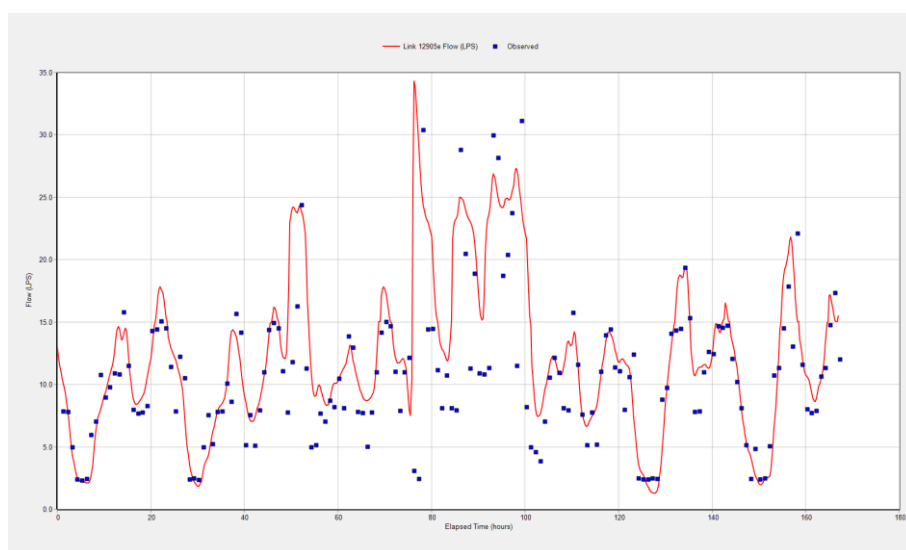
Wyniki oceny jakości kalibracji dla pogody bezdeszczowej zestawiono w tabeli 6. Uzyskane wartości poszczególnych wskaźników mieszczą się w przedziałach uznawanych w literaturze za bardzo dobre lub akceptowalne, co świadczy o wysokiej jakości opracowanego modelu hydrodynamicznego oraz jego przydatności do dalszych analiz symulacyjnych.

Tabela 6. Wyniki oceny jakości kalibracji modelu hydrodynamicznego dla okresu bezdeszczowego (24–30.04.2026)

Wskaźnik	Wynik	Jakość dopasowania
Pearson R	0,87	Akceptowalna ($0,50 \leq r < 0,90$)
R^2	0,76	Bardzo dobra ($0,75 < R^2 \leq 1,00$)
Volume Error	3,92 %	Bardzo dobra ($VE < 15\%$)
$\Delta Q_{\max}$	– 5,53%	Bardzo dobra ($\Delta Q_{\max} < 10\%$)

Po zakończeniu kalibracji modelu dla okresu bezdeszczowego przystąpiono do drugiego etapu obejmującego warunki opadowe. Do analizy wybrano okres od 4 do 10 maja 2026 r., w którym zarejestrowano kilka epizodów opadowych o niewielkiej intensywności. Okres ten umożliwił ocenę poprawności odwzorowania procesów transformacji opadu w odpływ oraz funkcjonowania systemu kanalizacyjnego podczas rzeczywistych zdarzeń opadowych. Do symulacji wykorzystano zarejestrowane przez deszczomierz rzeczywiste szeregi opadowe, natomiast wyniki modelowania porównano z pomiarami przepływu z przepompowni Ceramiczna. Ocenie poddano zgodność przebiegu hydrogramów, wartości przepływów maksymalnych, czasu wystąpienia kulminacji oraz całkowitej objętości odpływu.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono iteracyjną kalibrację parametrów modelu odpowiedzialnych za proces odpływu powierzchniowego. W kolejnych iteracjach analizowano zgodność wyników symulacji z pomiarami terenowymi. Proces kalibracji zakończono po uzyskaniu satysfakcjonującej zgodności zarówno pod względem kształtu hydrogramów, jak i wartości charakterystycznych przepływu (przy wartości n do wzoru Manninga na poziomie $n = 0,1 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ i retencji powierzchniowej $D = 4 \text{ mm}$ dla powierzchni nieprzepuszczalnych oraz $n = 0,7 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ i $D = 8 \text{ mm}$ dla powierzchni przepuszczalnych). Przebieg przepływów uzyskanych z modelu oraz wartości zarejestrowane na przepompowni Ceramiczna przedstawiono na rysunku 11.



Rysunek 11. Hydrogram przepływów uzyskanych z modelu oraz wartości zarejestrowane na przepompowni Ceramiczna w dniach 4–10 maja 2026

Wyniki oceny jakości kalibracji dla pogody deszczowej zestawiono w tabeli 7. Uzyskane wartości poszczególnych wskaźników mieszczą się w większości przypadków w przedziałach uznawanych w literaturze za akceptowalne (Pearson R, Volume Error i $\Delta Q_{\max}$).

Tabela 7. Wyniki oceny jakości kalibracji modelu hydrodynamicznego dla okresu deszczowego (4–10.05.2026)

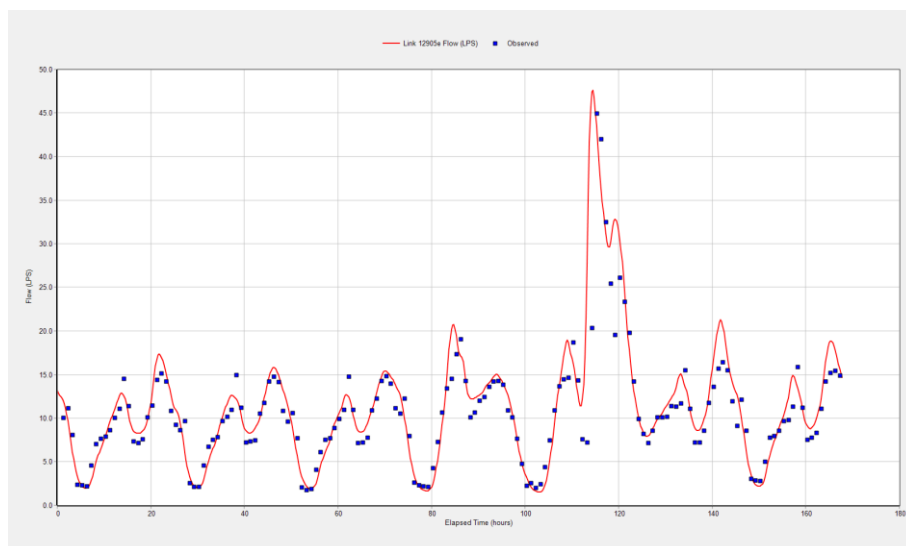
Wskaźnik	Wynik	Jakość dopasowania
Pearson R	0,70	Akceptowalna ($0,50 \leq r < 0,90$)
R^2	0,49	Poniżej akceptowalnej
Volume Error	16,73%	Akceptowalna ($\pm 15\%$ do $\pm 25\%$)
$\Delta Q_{\max}$	10,28%	Akceptowalna ($\pm 10\%$ do $\pm 20\%$)

Należy podkreślić, że deszczomierz wykorzystany w procesie kalibracji zlokalizowany jest poza granicami analizowanej zlewni. W związku z tym zarejestrowane wysokości i przebieg opadów mogły różnić się od rzeczywistych warunków występujących na obszarze objętym modelem. Różnice te mogły wpływać na rozbieżności między wynikami symulacji a wartościami przepływów zarejestrowanymi na przepompowni. Dodatkowym ograniczeniem procesu kalibracji był stosunkowo krótki okres dostępnych danych pomiarowych, obejmujący niewielką liczbę zdarzeń opadowych (w dodatku o niewielkiej intensywności). Niska wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 0,49$) wynika bezpośrednio z braku reprezentatywnych opadów o wysokiej intensywności w okresie kalibracji. O przydatności modelu świadczy jednak jego bardzo wysoka dokładność uzyskana na etapie walidacji z wykorzystaniem rzeczywistych zdarzeń nawalnych. Pomimo wskazanych ograniczeń uzyskane wartości wskaźników jakości kalibracji potwierdzają, że opracowany model w sposób zadowalający odwzorowuje funkcjonowanie analizowanego systemu kanalizacyjnego i może stanowić wiarygodne narzędzie do dalszych analiz.

Po zakończeniu procesu kalibracji przeprowadzono walidację modelu hydrodynamicznego z wykorzystaniem niezależnego zbioru danych pomiarowych obejmującego okres od 17 do 23 czerwca 2026 r., kiedy to wystąpiły na terenie Bolesławca opady nawalne o intensywności, jaka nie wystąpiła podczas kalibracji. Wybór odrębnego okresu pomiarowego pozwolił na ocenę zdolności modelu do poprawnego odwzorowania pracy systemu kanalizacyjnego bez konieczności dalszej modyfikacji jego parametrów.

Analogicznie jak w procesie kalibracji porównano przebieg hydrogramów, wartości przepływów maksymalnych oraz całkowitą objętość odpływu. Ocenę jakości odwzorowania przeprowadzono z wykorzystaniem tego samego zestawu wskaźników statystycznych, co zapewniło możliwość bezpośredniego porównania wyników obu etapów.

Przebieg hydrogramów uzyskanych z modelu oraz odpowiadających im pomiarów terenowych przedstawiono na rysunku 12.



Rysunek 12. Hydrogram przepływów uzyskanych z modelu oraz wartości zarejestrowane na przepompowni Ceramiczna w dniach 17–23 czerwca 2026

W tabeli 8 zestawiono wartości wskaźników jakości walidacji modelu. Większość analizowanych wskaźników osiągnęła wartości odpowiadające klasie bardzo dobrej, potwierdzając wysoką jakość opracowanego modelu hydrodynamicznego. Wyniki wskazują na bardzo wysoką zgodność pomiędzy wartościami modelowanymi i obserwowanymi zarówno pod względem przebiegu hydrogramu, jak i wielkości przepływów charakterystycznych. Model poprawnie odwzorował moment wystąpienia kulminacji przepływu oraz dynamikę zmian przepływu w analizowanym okresie.

Tabela 8. Wyniki oceny jakości walidacji modelu hydrodynamicznego dla okresu opadów nawaalnych (17–23.06.2026)

Wskaźnik	Wynik	Jakość dopasowania
Pearson R	0,87	Akceptowalna ($0,50 \leq r < 0,90$)
R^2	0,76	Bardzo dobra ($0,75 < R^2 \leq 1,00$)
Volume Error	7,03%	Bardzo dobra ($VE < 15\%$)
$\Delta Q_{\max}$	5,92%	Bardzo dobra ($\Delta Q_{\max} < 10\%$)

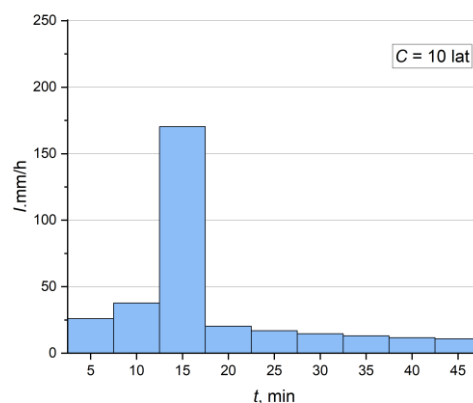
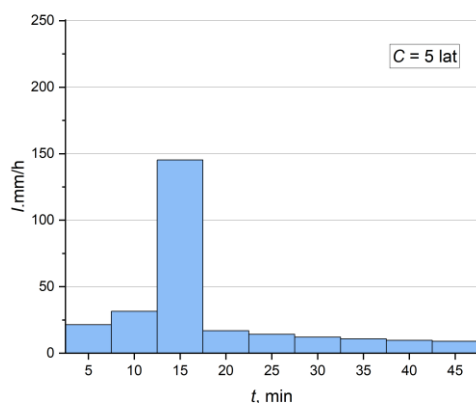
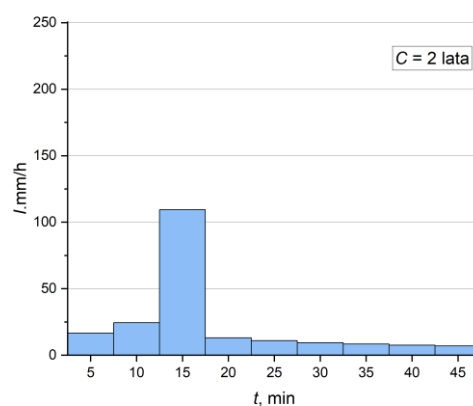
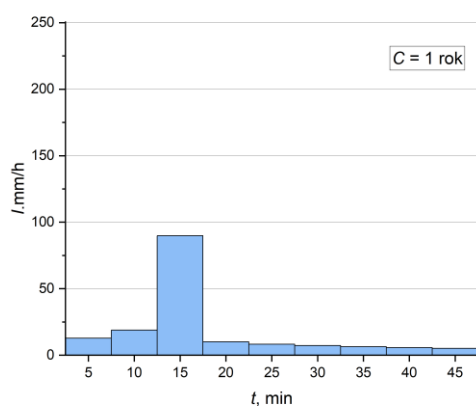
Uzyskane wyniki świadczą o prawidłowym odwzorowaniu procesów hydraulicznych zachodzących w analizowanym systemie kanalizacyjnym oraz potwierdzają możliwość wykorzystania modelu do dalszych analiz scenariuszowych obejmujących ocenę wpływu rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury.

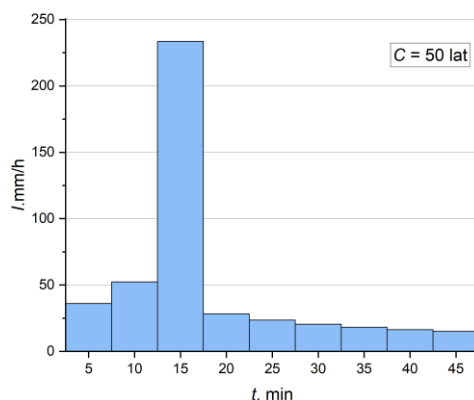
5.5. Scenariusze opadowe

Ocena odporności analizowanego systemu kanalizacyjnego została przeprowadzona dla opadów o czasie trwania $t = 45$ minut oraz częstościach występowania $C = 1, 2, 5, 10$ i 50 lat,

stosowanych powszechnie w praktyce inżynierskiej. Czas trwania opadu (45 minut) przyjęto na podstawie analizy funkcjonowania badanego systemu kanalizacyjnego. Wartość ta odpowiada w przybliżeniu czasowi przepływu ścieków i wód opadowych przez analizowaną sieć kanalizacyjną, dzięki czemu umożliwia ocenę pracy systemu w warunkach jego największego obciążenia hydraulicznego. Parametry opadów wyznaczono na podstawie charakterystyk opadowych dla miasta Bolesławiec opracowanych z wykorzystaniem danych atlasu PMASTP, przedstawionych w rozdziale 4. Do budowy scenariuszy wykorzystano opad modelowy Eulera, który jest powszechnie stosowany w analizach hydraulicznych systemów kanalizacyjnych. Charakterystyczną cechą tego modelu jest nierównomierny rozkład intensywności opadu w czasie z wyraźnym pikiem. Taki przebieg opadu prowadzi do szybkiego wzrostu odpływu powierzchniowego oraz generuje niekorzystne warunki pracy systemu odwodnienia, stanowiąc wymagający test jego przepustowości hydraulicznej.

Zastosowanie opadów Eulera pozwoliło również na wiarygodną ocenę skuteczności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury. Weryfikacja ich działania podczas zdarzeń o wysokiej intensywności opadu umożliwia ocenę rzeczywistego potencjału ograniczania odpływu powierzchniowego, redukcji przepływów szczytowych oraz zmniejszania przeciążeń hydraulicznych sieci kanalizacyjnej. Dzięki temu możliwe było określenie efektywności rozwiązań BGI w najbardziej wymagających warunkach eksploatacyjnych, a nie jedynie podczas opadów o niewielkiej intensywności.





Rysunek 13. Opady modelowe Eulera o czasie trwania $t = 45$ min i częstości występowania $C = 1, 2, 5, 10$ i 50 lat dla miasta Bolesławiec wg atlasu PMASTP

Zgodnie z wynikami badań przedstawianymi szeroko w literaturze (IPCC, 2023a; Willems et al., 2012), obserwowany wzrost częstości występowania opadów nawalnych powoduje, że opady uznawane obecnie za rzadkie będą występowały znacznie częściej. W praktyce oznacza to, że opad projektowy o częstości występowania $C = 2$ lata może w przyszłości występować z częstością $C = 1$ rok, natomiast opady o obecnych okresach powtarzalności $C = 5, 10$ i 50 lat będą pojawiały się odpowiednio częściej. W niniejszej pracy przyjęto takie podejście jako scenariusz zmian klimatu, umożliwiający ocenę odporności istniejącego systemu odwodnienia oraz skuteczności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury w warunkach prognozowanego wzrostu intensywności opadów.

5.6. Wariant bazowy (stan istniejący)

Podstawowy wariant modelu, określany jako wariant bazowy, odzwierciedla aktualny sposób funkcjonowania systemu kanalizacyjnego na lewobrzeżnym obszarze miasta Bolesławiec. Stanowi on scenariusz referencyjny, względem, którego oceniano wpływ zastosowania rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury oraz prognozowanych zmian klimatu na funkcjonowanie systemu odwodnienia.

Wariant bazowy opracowano na podstawie zweryfikowanego i skalibrowanego modelu hydrodynamicznego przedstawionego w poprzednich podrozdziałach. Uwzględniono rzeczywistą geometrię sieci kanalizacyjnej, parametry hydrauliczne przewodów oraz obiektów sieciowych, takich jak przepompownia i przelew burzowy. Wszystkie parametry modelu odpowiadają aktualnemu stanowi eksploatowanego systemu kanalizacyjnego i nie obejmują żadnych planowanych zmian infrastrukturalnych.

W modelu zachowano rzeczywisty sposób zagospodarowania zlewni oraz aktualny stopień uszczelnienia powierzchni. Zlewnie cząstkowe odwzorowano zgodnie z ich rzeczywistym podziałem hydrologicznym, uwzględniając powierzchnię, szerokość hydrauliczną, średni spadek terenu oraz udział powierzchni przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych.

Model uwzględnia również funkcjonowanie przelewu burzowego, którego parametry hydrauliczne odwzorowano na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej. Dzięki temu możliwe było określenie objętości zrzutów burzowych odprowadzanych do odbiornika (podczas opadów) oraz ocena wpływu analizowanych wariantów na częstotliwość i intensywność pracy przelewu.

W wariantcie bazowym nie uwzględniono żadnych elementów niebiesko-zielonej infrastruktury ani dodatkowych urządzeń retencyjnych. Uzyskane dla tego wariantu wyniki stanowią punkt odniesienia dla wszystkich dalszych analiz obejmujących wdrożenie rozwiązań BGI.

5.7. Warianty z rozproszoną retencją (BGI)

Kolejnym etapem prac było opracowanie wariantów modelu uwzględniającego zastosowanie rozproszonej retencji w postaci rozwiązań BGI. Celem tych działań było zweryfikowanie wpływu różnych strategii zagospodarowania wód opadowych na funkcjonowanie istniejącej sieci kanalizacyjnej w Bolesławcu. Skupiono się na możliwościach ograniczenia występowania lokalnych wylań oraz zmniejszenia częstotliwości i intensywności działania przelewów burzowych. Ze względu na to, że analizowana zlewnia jest położona na terenach domków jednorodzinnych, zdecydowano się na wdrożenie licznych, niewielkich rozwiązań retencyjnych na obszarze całej zlewni zamiast jednego, centralnego. To podejście umożliwi zatrzymanie oraz opóźnienie spływu powierzchniowego już w miejscu jego powstawania, dzięki czemu podczas intensywnych opadów zmniejszy się obciążenie hydrauliczne przewodów kanalizacyjnych. Symulacje projektowe wykonano, wykorzystując moduł LID w programie EPA SWMM. Umożliwia on odwzorowanie procesów retencji, infiltracji, magazynowania i kontrolowanego odpływu dla różnych typów BGI. Do analiz przyjęto sześć typów BGI dostępnych w modelu, tj.

- zielone dachy,
- ogrody deszczowe,
- niecki bioretencyjne,
- skrzynki rozsączające,
- nawierzchnie przepuszczalne,
- przydomowe beczki do retencjonowania wód opadowych.

Wybrane rozwiązania uwzględniły realne możliwości wdrożenia na terenie miejskim przy ograniczonej dostępności powierzchni. Punktem wyjścia do badań była szczegółowa analiza wszystkich zlewni cząstkowych z uwzględnieniem technicznych i przestrzennych możliwości wdrożenia poszczególnych typów BGI. W ramach tego etapu zweryfikowano każdą ze zlewni, wykluczając obszary niespełniające kryteriów lokalizacyjnych (np. brak wolnej przestrzeni, nieodpowiednia infrastruktura czy zbyt duże nachylenie połaci dachowych) i wyznaczając ostateczną pulę zlewni predysponowanych do retencji rozproszonej. Aby zapewnić możliwość porównania analizowanych wariantów, rozmieszczenie poszczególnych elementów BGI odbyło się przy użyciu jednolitego algorytmu doboru cząstkowych zlewni. Dla każdego

analizowanego rozwiązania (zielone dachy, ogrody deszczowe, niecki bioretencyjne, skrzynki rozsączające, nawierzchnie przepuszczalne, beczki retencyjne) procedurę tę przeprowadzono niezależnie.

W oparciu o ten algorytm, dla każdego z wymienionych rozwiązań BGI opracowano cztery warianty symulacyjne, różniące się skalą ich wdrożenia w przestrzeni miasta. Zakładały one osiągnięcie odpowiednio: 25%, 50%, 75% oraz 100% maksymalnej, zweryfikowanej wcześniej pod kątem możliwości wdrożenia (zakwalifikowanej) powierzchni implementacji danego rozwiązania na terenie Bolesławca. Dla każdego z tak zdefiniowanych wariantów wyznaczono docelową powierzchnię retencyjną, stanowiącą odpowiedni udział procentowy sumarycznego obszaru kwalifikującego się do wdrożenia danego typu BGI. Wybór konkretnych zlewni cząstkowych do analizy prowadzono w sposób iteracyjny, co pozwoliło na precyzyjne dopasowanie sumarycznej powierzchni wprowadzanych obiektów do założonego celu procentowego (z minimalnym odchyleniem od wartości docelowej).

W celu zachowania reprezentatywności przestrzennej, przy doborze zlewni zastosowano ważenie powierzchniowe. Procedura ta polegała na przypisaniu każdej zakwalifikowanej zlewni cząstkowej wagi w_i proporcjonalnej do jej powierzchni A_i względem całkowitej powierzchni obszaru kwalifikującego się do wdrożenia BGI ($A_{całkowita}$), zgodnie z zależnością:

$$w_i = \frac{A_i}{A_{całkowita}}$$

Tak zdefiniowane wagi zostały wykorzystane jako prawdopodobieństwa przejścia danej zlewni do kolejnego kroku iteracji. Zastosowanie tego podejścia zapobiegło skupianiu obiektów BGI wyłącznie w zlewniach o skrajnych rozmiarach (bardzo małych lub bardzo dużych) i zapewniło ich urealniony rozkład w strukturze miejskiej.

W modelowanych wariantach wdrożenia BGI dla każdej wybranej zlewni zachowano jej oryginalną szerokość hydrauliczną (taką samą jak w wariantie bazowym), natomiast parametry wymiarowe wdrażanych obiektów BGI przyjmowano zgodnie z założeniami przedstawionymi w tabeli 9. Wartości pozostałych parametrów zlewni w modelu pozostawiono bez zmian, co umożliwiło bezpośrednie porównanie efektywności poszczególnych wariantów w zakresie redukcji spływu powierzchniowego.

Tabela 9. Konfiguracja obiektów BGI w wariantach modelu z rozproszoną retencją

Rodzaj BGI	Kryterium rozmieszczenia obiektów BGI	Parametr wymiarowy pojedynczego obiektu
Zielony dach	Każdy budynek posiadający dach płaski lub o odpowiednim nachyleniu	Rzeczywista powierzchnia dachu
Ogród deszczowy	1 obiekt na każdy budynek	Powierzchnia 20 m ²
Beczka retencyjna	1 zbiornik na każdy budynek	Pojemność 1,2 m ³
Niecka bioretencyjna	1 obiekt na 20 budynków	Powierzchnia 75 m ²
Skrzynki rozsączające	1 obiekt na 10 budynków	Powierzchnia 25 m ²
Nawierzchnia przepuszczalna	1 obiekt na 10 budynków	Powierzchnia 50 m ²

W pierwszym etapie badań przeanalizowano 28 podstawowe warianty symulacyjne (6 obiektów BGI, dla każdego 4 stopnie wdrożenia, w tym dwa rodzaje odprowadzania odpływu z zielonych dachów), w których każde z rozwiązań BGI badano niezależnie. Pozwoliło to na ocenę indywidualnej skuteczności poszczególnych obiektów oraz ich bezpośredniego wpływu na warunki hydrauliczne w sieci kanalizacyjnej, a w konsekwencji – na wskazanie rozwiązań o najwyższej efektywności retencyjnej.

Szczególnym przypadkiem było przeprowadzenie oceny dwóch wariantów odprowadzenia wód z warstwy drenażowej zielonych dachów. W pierwszym wariantcie odpływ z warstwy drenażowej kierowano bezpośrednio do kanalizacji deszczowej ($ToPerv = 0$), natomiast w drugim na przyległe powierzchnie przepuszczalne ($ToPerv = 1$), umożliwiając dalszą infiltrację i retencję w obrębie zlewni. Przyjęcie obu konfiguracji pozwoliło ocenić wpływ sposobu odprowadzenia wód z zielonych dachów na funkcjonowanie systemu kanalizacyjnego oraz efektywność wdrożenia niebiesko-zielonej infrastruktury.

W drugim etapie poddano analizie 4 warianty mieszane (hybrydowe), zakładające jednocześnie wdrożenie kilku różnych rodzajów BGI. Ich dobór dostosowano do realnych możliwości zagospodarowania przestrzeni miejskiej, łącząc ze sobą rozwiązania z zakresu retencji dachowej, infiltracji powierzchniowej, magazynowania oraz rozsączania wody do gruntu. Podejście to umożliwiło ocenę skumulowanego wpływu współdziałających ze sobą obiektów w zlewni.

Właściwości fizyczne i konstrukcyjne obiektów BGI zdefiniowano na podstawie analizy literatury naukowej oraz wytycznych projektowych. Szczegółowe zestawienie parametrów wejściowych BGI wprowadzonych do modułu LID w programie SWMM przedstawiono w tabeli 10.

Dla każdego z opracowanych wariantów przeprowadzono symulacje hydrodynamiczne przy użyciu opadów modelowych. Wyniki symulacji odniesiono bezpośrednio do wariantu bazowego (stanu istniejącego bez wdrożonej infrastruktury BGI). Przeprowadzona analiza porównawcza pozwoliła określić rzeczywisty wpływ rozproszonej retencji na funkcjonowanie sieci ogólnospławnej oraz ułatwiła wskazanie najbardziej efektywnej strategii dla badanej zlewni miejskiej.

Tabela 10. Zestawienie parametrów hydraulicznych i konstrukcyjnych rozwiązań BGI zastosowanych w modelu EPA SWMM

Parametr w SWMM	Opis parametru	Jednostka	Zielony dach	Ogród deszczowy	Beczka retencyjna	Niecka bioretencyjna	Skrzynki rozsączające	Nawierzchnia przepuszczalna
Storage Depth	Retencja powierzchniowa	mm	30	150	–	200	75	10
Vegetation Fraction	Udział roślinności	–	0,20	0,25	–	0,25	0,00	0,00
Manning's Roughness	Współczynnik szorstkości Manninga	–	0,15	0,20	–	0,20	0,10	0,20
Surface Slope	Spadek terenu	%	2	1	–	1	1	2
Side Slope	Nachylenie skarp	–	5	5	–	5	5	5
Soil Thickness	Mięższość	mm	150	500	–	600	–	300
Porosity	Porowatość	–	0,50	0,45	–	0,45	–	0,45
Field Capacity	Polowa pojemność wodna	–	0,25	0,22	–	0,25	–	0,22
Wilting Point	Punkt wędnięcia	–	0,10	0,12	–	0,12	–	0,12
Hydraulic Conductivity	Współczynnik filtracji	mm/h	60	80	–	100	–	80
Conductivity Slope	Nachylenie krzywej przewodnictwa	–	10	10	–	10	–	10
Suction Head	Ssanie kapilarne	mm	110	120	–	150	–	120
Pavement Thickness	Grubość nawierzchni	mm	–	–	–	–	–	150
Pavement Void Ratio	Wskaźnik porowatości powierzchni	–	–	–	–	–	–	0,18
Pavement Conductivity	Współczynnik filtracji nawierzchni	mm/h	–	–	–	–	–	750
Storage Layer Thickness	Mięższość warstwy akumulacyjnej	mm	40	300	1200	400	900	400
Storage Void Ratio	Wskaźnik porowatości warstwy akumulacyjnej	–	0,50	0,40	0,75	0,75	0,95	0,40
Drain Coefficient	Współczynnik drenażu	mm/h	–	–	1,5	75	25	25
Drain Exponent	Wykładnik drenażu	–	–	–	0,50	0,30	0,25	0,30
Drain Offset	Wysokość ułożenia drenażu	mm	–	–	24	50	100	50
Drain Delay	Opóźnienie odpływu drenażowego	h	–	–	6	6	6	6

5.8. Kryteria oceny efektywności

W literaturze podaje się, że ocena skuteczności BGI nie powinna ograniczać się wyłącznie do określenia wielkości redukcji odpływu powierzchniowego. Należy przeprowadzić analizę zmian zachodzących w sieci kanalizacyjnej, takich jak zmniejszenie przepływów maksymalnych, ograniczenie przeciążeń hydraulicznych przewodów, redukcja objętości wód odprowadzanych przez przelewy burzowe oraz zwiększenie infiltracji do gruntu. Z tego powodu zastosowano zestaw wskaźników umożliwiających pełną ocenę efektywności wykorzystanych rozwiązań BGI w pracy całego systemu miejskiej kanalizacji.

Pierwszym z analizowanych kryteriów była redukcja objętości spływu powierzchniowego generowanego przez badaną zlewnię podczas rozpatrywanego epizodu opadowego. Jest to jeden z najczęściej wykorzystywanych współczynników w celu określenia skuteczności działania rozwiązań BGI, gdyż bezpośrednio określa ilość wody, która zamiast zostać odprowadzona do systemu kanalizacyjnego została zatrzymana w miejscu opadu, zretencjonowana bądź infiltrowana do gruntu. Zmniejszenie objętości odpływu powierzchniowego przekłada się bezpośrednio na ograniczenie obciążenia hydraulicznego kanałów, redukcję ryzyka przeciążenia sieci oraz zmniejszenie ilości wód opadowych kierowanych do odbiornika. W przeprowadzonej analizie porównano całkowitą objętość odpływu uzyskaną dla każdego ze scenariuszy z wartościami odpowiadającymi stanowi istniejącemu. Uzyskane różnice przedstawiono zarówno w sposób bezwzględny, jak i w procentach. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie, które pozwoliło określić, które rozwiązanie charakteryzuje się najwyższą zdolnością do redukcji spływu powierzchniowego.

Drugim analizowanym wskaźnikiem była zmiana objętości ścieków przepływających przez przepompownię. Parametr ten bezpośrednio odzwierciedla stopień obciążenia hydraulicznego sieci, jednocześnie określając, w jakim stopniu wykorzystanie rozwiązań BGI wpływa na ograniczenie ilości wód dopływających do przepompowni podczas opadów. W tym samym czasie sprawdzono, jak działał przelew burzowy podczas opadów. Zweryfikowano, w jakim stopniu udział rozwiązań BGI pozwolił na zmniejszenie objętości ścieków odprowadzanych do odbiornika. Porównano wyniki dla każdego wariantu ze scenariuszem bazowym. Sprawdzono, w jakim stopniu redukcja objętości oraz czasu działania przelewu burzowego pozwala ograniczyć ilość ścieków kierowanych bezpośrednio do odbiornika, a tym samym zmniejszyć presję na środowisko wodne oraz poprawić efektywność funkcjonowania systemu kanalizacyjnego.

Sprawdzono wskaźnik całkowitej objętości wylań z sieci kanalizacyjnej opisanej w EPA SWMM jako Flooding Loss. Parametr ten określa objętość wody, która nie została odprowadzona przez system kanalizacyjny z powodu przekroczenia jego całkowitej przepustowości i została utracona w wyniku występowania wylewów w węzłach sieci. Zmniejszenie tego wskaźnika wskazuje na poprawę działania systemu kanalizacyjnego w mieście, przy zachowaniu bezpieczeństwa hydraulicznego oraz ograniczeniu ryzyka występowania lokalnych podtopień podczas opadów o wysokiej intensywności. Dla każdego z wariantów wyznaczono procentowy stopień redukcji objętości wylań w porównaniu ze

scenariuszem bazowym. Poza analizą objętości zweryfikowano liczbę węzłów, w których podczas symulacji następują wylania z sieci. Sprawdzono, jaki zasięg przestrzenny obejmuje przeciążenie hydrauliczne systemu oraz jaką skuteczność mają poszczególne rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury w ograniczaniu tych zdarzeń.

6. Wyniki modelowania hydrodynamicznego

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki symulacji hydrodynamicznych przeprowadzonych z wykorzystaniem skalibrowanego i zwalidowanego modelu lewobrzeżnego systemu kanalizacji ogólnospławnej miasta Bolestawiec. Symulacje wykonano dla opadów modelowych Eulera typu II o czasie trwania $t = 45$ min oraz częstotliwości występowania $C = 1, 2, 5, 10$ i 50 lat, opisanych w rozdziale 5.5. Analizie poddano wariant bazowy (stan istniejący), 24 warianty podstawowe obejmujące sześć rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury wdrażanych niezależnie na czterech poziomach implementacji (25%, 50%, 75% i 100% powierzchni zakwalifikowanej do zagospodarowania) oraz cztery warianty mieszane, łączące zielone dachy z wybranymi rozwiązaniami infiltracyjno-retencyjnymi. Dla wariantów obejmujących zielone dachy rozpatrzono dodatkowo dwie konfiguracje odprowadzenia wód z warstwy drenażowej: bezpośrednio do sieci kanalizacyjnej oraz na przyległe powierzchnie przepuszczalne.

Ocenę efektywności poszczególnych wariantów przeprowadzono na podstawie zestawu wskaźników zdefiniowanych w rozdziale 5.8, obejmujących całkowitą objętość ścieków przepływających przez przepompownię Ceramiczna, całkowitą objętość ścieków odprowadzanych do odbiornika przez przelew burzowy, objętość wylań z sieci kanalizacyjnej oraz liczbę węzłów, w których wystąpiły wylania. Wyniki liczbowe zestawiono w tabelach obejmujących wszystkie analizowane scenariusze opadowe, natomiast na rysunkach (hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni i przelewu burzowego oraz mapy wylań) przedstawiono wyniki dla opadu o częstotliwości występowania $C = 5$ lat, przyjętego jako scenariusz reprezentatywny dla warunków znacznego, lecz realnego obciążenia hydraulicznego systemu.

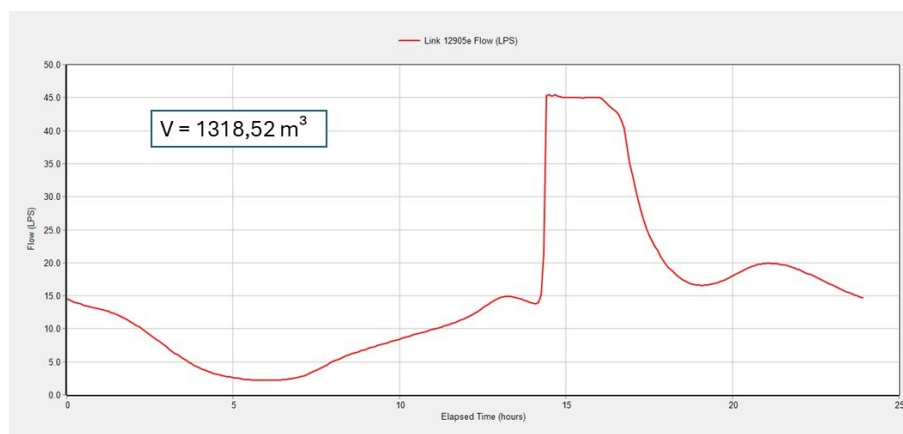
6.1. Wyniki dla stanu istniejącego

Wyniki symulacji przeprowadzonych dla wariantu bazowego, odzwierciedlającego aktualny sposób funkcjonowania systemu kanalizacyjnego, zestawiono w tabeli 11. Uzyskane rezultaty potwierdzają problemy hydrauliczne zidentyfikowane w rozdziale 4.6. Już podczas opadu o częstotliwości występowania $C = 1$ rok uruchamiany jest przelew burzowy, przez który do rzeki Bóbr odprowadzane jest 2370 m^3 mieszaniny ścieków i wód opadowych. Oznacza to, że zrzuty burzowe do odbiornika stanowią w analizowanym systemie zjawisko występujące nawet podczas opadów o stosunkowo niewielkiej intensywności. Wylania z sieci kanalizacyjnej pojawiają się natomiast począwszy od opadu o $C = 2$ lata (7 węzłów, objętość wylań 260 m^3) i narastają wraz ze wzrostem intensywności opadu – dla $C = 5$ lat wylania obejmują 13 węzłów (1160 m^3), dla $C = 10$ lat – 22 węzły (1980 m^3), natomiast dla opadu o $C = 50$ lat aż 58 węzłów, z których wylewa się łącznie 5100 m^3 ścieków.

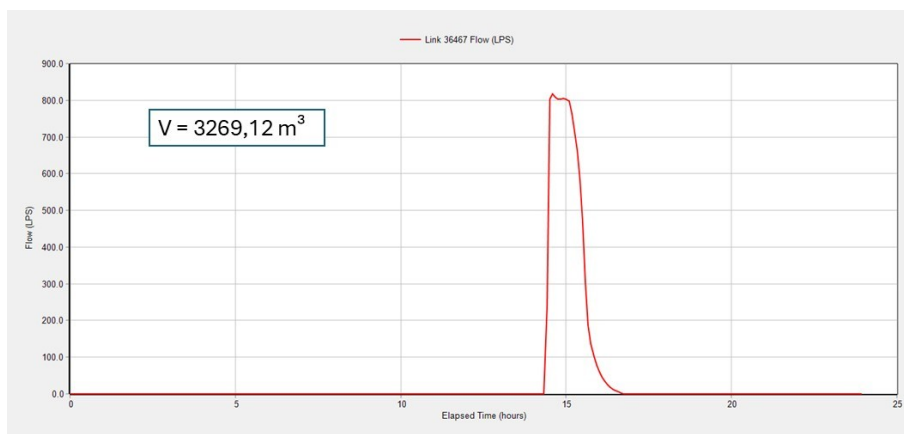
Tabela 11. Wyniki symulacji dla wariantu bazowego (bez BGI) dla opadów modelowych Eulera o czasie trwania $t = 45$ min

Częstość opadu C	Przepompownia – objętość [m^3]	Przelew burzowy – objętość [m^3]	Objętość wylań [m^3]	Liczba węzłów z wylaniami [–]
1 rok	1304	2370	0	0
2 lata	1312	2918	260	7
5 lat	1319	3269	1160	13
10 lat	1323	3407	1980	22
50 lat	1344	3785	5100	58

Charakterystykę pracy systemu podczas opadu o $C = 5$ lat przedstawiono na rysunkach 14 i 15. Hydrogram przepływu w przekroju przepompowni (rys. 14) odzwierciedla typową dobową zmienność dopływu ścieków bytowo-gospodarczych w zakresie od około 2,5 do 20 dm^3/s , na którą nakłada się gwałtowny wzrost przepływu po wystąpieniu opadu. Dopływ do przepompowni osiąga wówczas wartość około 45 dm^3/s , odpowiadającą jej maksymalnej wydajności, i utrzymuje się na tym poziomie przez blisko dwie godziny. Ograniczona wydajność przepompowni powoduje, że nadmiar ścieków jest retencjonowany w sieci, a następnie stopniowo odprowadzany, co przejawia się wydłużonym czasem opadania hydrogramu. Zupełnie odmienny charakter ma praca przelewu burzowego (rys. 15) – zrzut do odbiornika następuje niemal natychmiast po wystąpieniu kulminacji opadu, osiąga wartość szczytową około 800 dm^3/s i trwa około półtorej godziny. Porównanie obu hydrogramów wskazuje, że to przelew burzowy przejmuje zasadniczą część odpływu opadowego generowanego w zlewni, podczas gdy przepustowość przepompowni ogranicza objętość ścieków kierowanych do oczyszczalni.



Rysunek 14. Hydrogram przepływu w przekroju przepompowni Ceramiczna dla wariantu bazowego (opad $C = 5$ lat)



Rys. 15. Hydrogram przepływu przez przelew burzowy dla wariantu bazowego (opad $C = 5$ lat)

Przestrzenny rozkład przeciążeń hydraulicznych dla opadu o $C = 5$ lat przedstawiono na rysunku 16. Węzły, w których dochodzi do wylań, koncentrują się przede wszystkim we wschodniej, najniższej położonej części zlewni, w rejonie zwartej zabudowy śródmiejskiej, w sąsiedztwie głównego kolektora doprowadzającego ścieki do przepompowni. Dodatkowo lokalne wylania występują w południowo-zachodniej części obszaru. Taki rozkład przeciążeń jest zbieżny z problemami eksploatacyjnymi zgłaszanymi przez przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne i potwierdza, że o lokalizacji wylań decyduje zarówno ograniczona przepustowość przewodów, jak i konfiguracja wysokościowa terenu.



Rysunek 16. Lokalizacja węzłów z wylaniami z sieci kanalizacyjnej dla wariantu bazowego (opad $C = 5$ lat)

Uzyskane wyniki należy interpretować również w kontekście przyjętego w rozdziale 5.5 scenariusza zmian klimatu, zakładającego wzrost częstości występowania opadów nawałnych. Jeżeli opad o obecnej częstości występowania $C = 2$ lata będzie w przyszłości pojawiać się średnio raz w roku, wylania z sieci kanalizacyjnej – obecnie sporadyczne – staną się zjawiskiem

corocznym, a objętości zrzutów burzowych do rzeki Bóbr ulegną dalszemu zwiększeniu. Wyniki uzyskane dla wariantu bazowego stanowią punkt odniesienia dla oceny skuteczności rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury przedstawionej w kolejnych podrozdziałach.

6.2. Wyniki dla rozproszonej retencji (BGI)

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki symulacji dla wariantów uwzględniających wdrożenie poszczególnych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury. Dla każdego rozwiązania zestawiono w formie tabelarycznej wyniki uzyskane dla wszystkich pięciu scenariuszy opadowych oraz czterech poziomów implementacji, wraz z wartościami uzyskanymi dla wariantu bazowego, umożliwiającymi bezpośrednie porównanie. Na rysunkach przedstawiono hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni oraz przelewu burzowego, a także mapy wylań dla opadu o $C = 5$ lat. Mapy wylań zamieszczono dla tych poziomów implementacji, przy których w symulacjach wystąpiły wylania z sieci.

6.2.1. Zielone dachy

Zielone dachy ograniczają odpływ ze zlewni poprzez retencjonowanie wody opadowej w warstwie wegetacyjnej i substracie (retencja powierzchniowa 30 mm) oraz w warstwie drenażowej, z której woda odprowadzana jest z opóźnieniem. Ponieważ o ostatecznym efekcie hydraulicznym decyduje sposób zagospodarowania wód z warstwy drenażowej, przeanalizowano dwie konfiguracje: odprowadzenie drenażu bezpośrednio do sieci kanalizacyjnej (tabela 12) oraz odprowadzenie na przyległe powierzchnie przepuszczalne, umożliwiające infiltrację wody do gruntu (tabela 13).

W konfiguracji z odprowadzeniem drenażu na powierzchnie przepuszczalne zielone dachy zapewniają umiarkowaną, systematycznie rosnącą wraz ze stopniem wdrożenia redukcję obciążenia hydraulicznego systemu. Dla opadu o $C = 1$ rok objętość zrzutu przez przelew burzowy zmniejsza się o 3,9% przy 25% wdrożeniu oraz o 14,9% przy pełnej implementacji. Skuteczność ta wyraźnie maleje jednak wraz ze wzrostem intensywności opadu – dla $C = 5$ lat pełne wdrożenie ogranicza objętość zrzutu o 5,4%, a dla $C = 50$ lat już tylko o 3,5%. Korzystniej przedstawia się wpływ zielonych dachów na wylania z sieci: dla opadu o $C = 2$ lata pełna implementacja ogranicza objętość wylań o 76,92% (z 260 do 60 m³), a liczbę zalanych węzłów z 7 do 3. Dla opadów o większej intensywności redukcja objętości wylań maleje do 37,07% ($C = 5$ lat) oraz 18,04% ($C = 50$ lat).

Tabela 12. Wyniki symulacji dla wariantów z zielonymi dachami
– drenaż odprowadzany bezpośrednio do sieci kanalizacyjnej

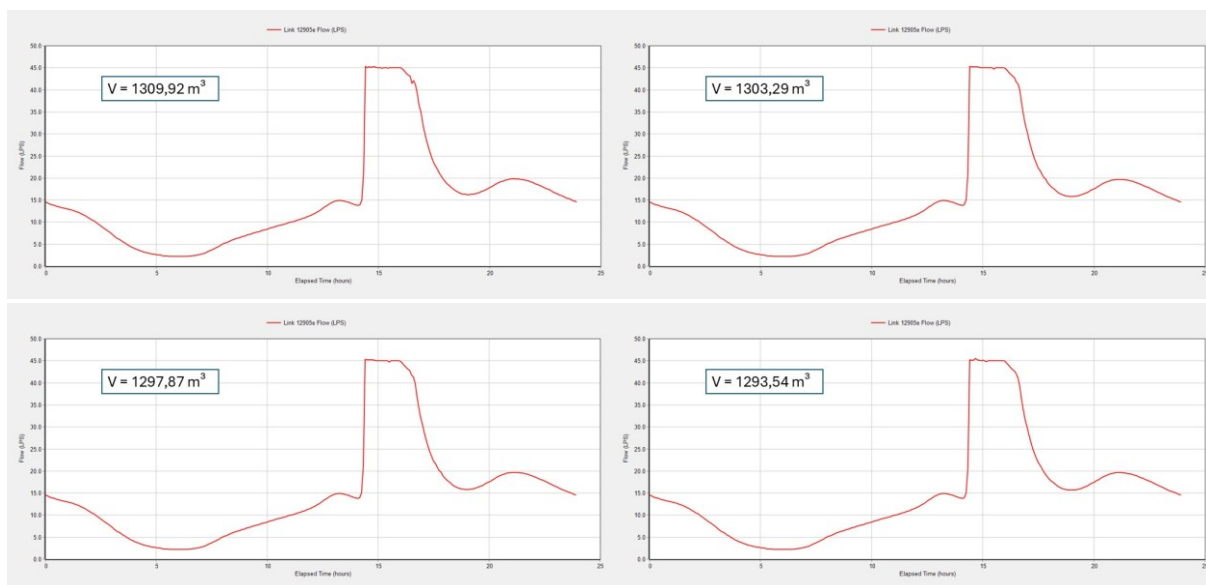
Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m³]	Przelew burzowy – objętość [m³]	Objętość wylań [m³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [–]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	25%	1296	2278	0	–	0
	50%	1290	2182	0	–	0
	75%	1284	2091	0	–	0
	100%	1279	2016	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1304	2867	210	19,23	5
	50%	1297	2808	150	42,31	5
	75%	1291	2732	90	65,38	4
	100%	1288	2671	60	76,92	3
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1311	3222	1057	8,88	12
	50%	1306	3179	939	19,05	10
	75%	1301	3137	828	28,62	9
	100%	1298	3096	724	37,59	9
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1329	3465	1850	6,57	21
	50%	1331	3535	1710	13,64	21
	75%	1334	3601	1570	20,71	19
	100%	1337	3684	1450	26,77	17
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1406	4032	4970	2,55	55
	50%	1427	4342	4810	5,69	51
	75%	1442	4638	4660	8,63	47
	100%	1452	4936	4550	10,78	45

Odmienne rezultaty uzyskano w konfiguracji z odprowadzeniem drenażu bezpośrednio do kanalizacji. Dla opadów o $C \leq 5$ lat wyniki obu konfiguracji są zbliżone, jednak dla opadów o $C = 10$ i 50 lat objętości ścieków przepływających przez przepompownię oraz odprowadzanych przez przelew burzowy przewyższają wartości uzyskane dla wariantu bazowego – dla opadu o $C = 50$ lat i pełnej implementacji odpowiednio o 8,0% i 30,4%. Efekt ten wynika z bilansu masy w systemie: zielone dachy ograniczają wylania z sieci (redukcja objętości wylań o 10,78% przy $C = 50$ lat), przez co większa część ścieków pozostaje w przewodach i jest odprowadzana przez przelew burzowy, a dodatkowo opóźniony odpływ z warstwy drenażowej trafia do sieci w czasie, gdy pozostaje ona nadal przeciążona. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że sposób odprowadzenia wód z warstwy drenażowej zielonych dachów ma kluczowe znaczenie dla efektu hydraulicznego w skali systemu, a rozwiązaniem zalecanym jest kierowanie drenażu na tereny biologicznie czynne. Z tego względu w dalszych analizach porównawczych wykorzystywano wyniki konfiguracji z odprowadzeniem drenażu na powierzchnie przepuszczalne i tej konfiguracji odpowiadają zamieszczone rysunki.

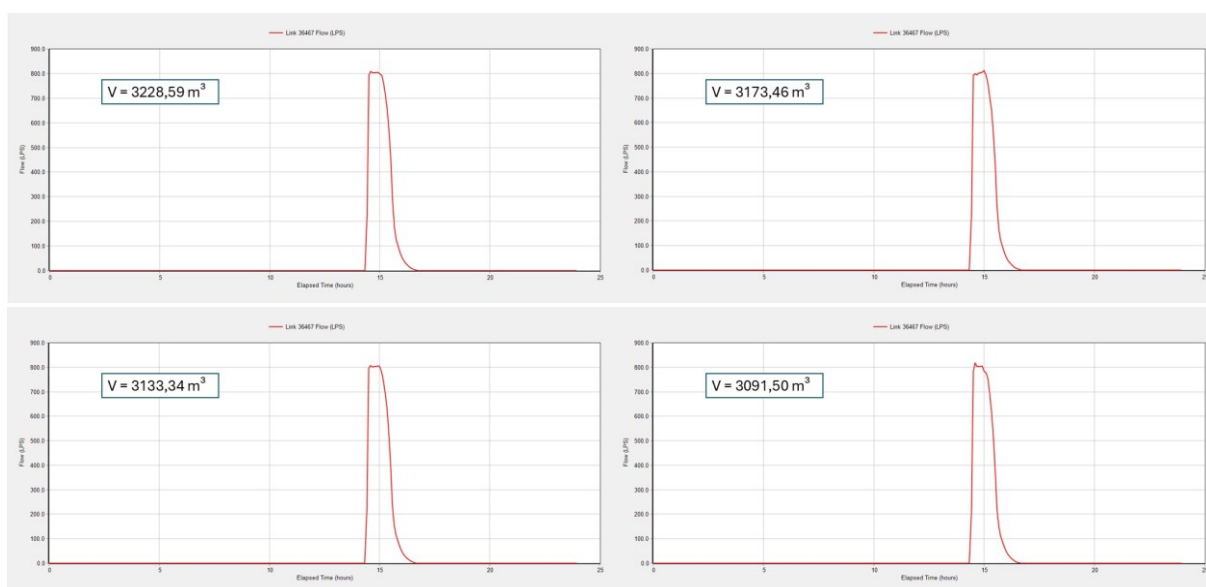
Tabela 13. Wyniki symulacji dla wariantów z zielonymi dachami
– drenaż odprowadzany na powierzchnie przepuszczalne

Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m³]	Przelew burzowy – objętość [m³]	Objętość wylań [m³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [–]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	25%	1296	2278	0	–	0
	50%	1290	2182	0	–	0
	75%	1284	2091	0	–	0
	100%	1279	2016	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1304	2867	210	19,23	5
	50%	1297	2808	150	42,31	5
	75%	1291	2732	90	65,38	4
	100%	1288	2671	60	76,92	3
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1310	3229	1060	8,62	12
	50%	1303	3173	940	18,97	10
	75%	1298	3133	830	28,45	9
	100%	1294	3092	730	37,07	9
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1315	3365	1850	6,57	21
	50%	1308	3312	1690	14,65	21
	75%	1303	3274	1540	22,22	19
	100%	1298	3231	1410	28,79	17
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1335	3758	4880	4,31	51
	50%	1328	3717	4630	9,22	51
	75%	1323	3698	4380	14,12	47
	100%	1319	3652	4180	18,04	45

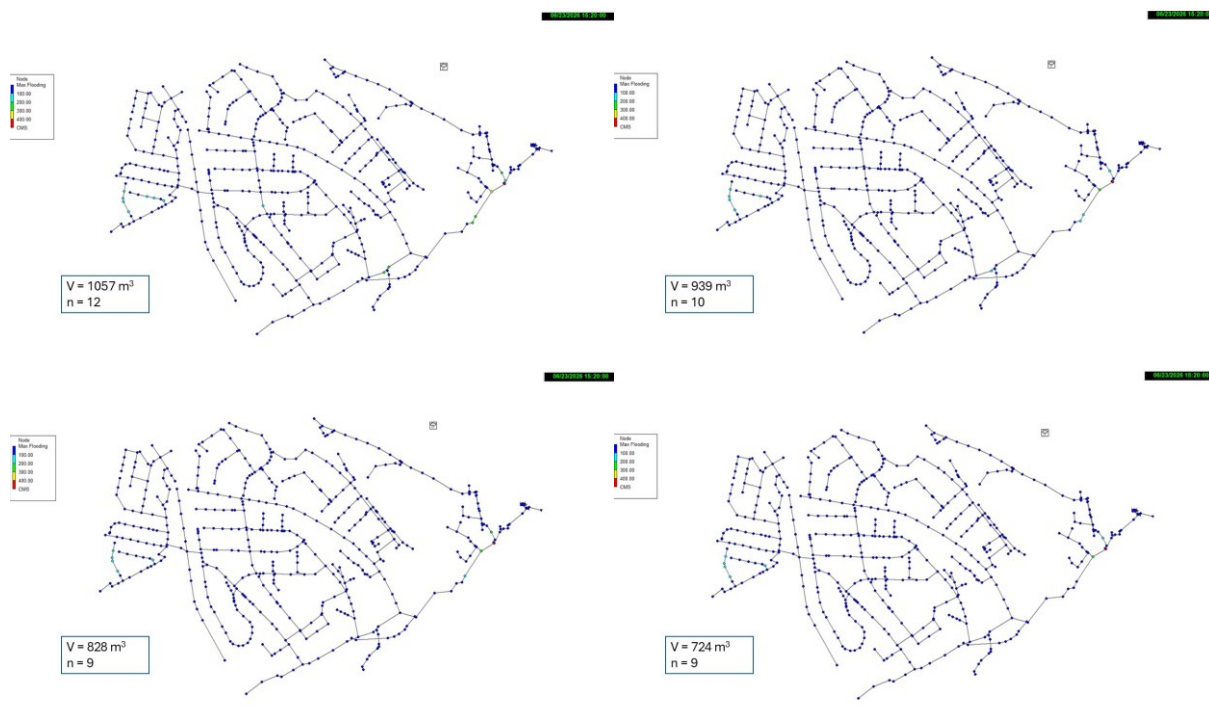
Hydrogramy przedstawione na rysunkach 17 i 18 wskazują, że zielone dachy w niewielkim stopniu modyfikują przebieg przepływu w przekroju przepompowni, natomiast systematycznie obniżają objętość zrzutu przez przelew burzowy wraz ze wzrostem stopnia wdrożenia. Mapy wylań (rys. 19) potwierdzają stopniowe zmniejszanie liczby zalanych węzłów z 12 (25% wdrożenia) do 9 (100% wdrożenia), przy czym lokalizacja wylań pozostaje niezmienna – ograniczeniu ulega przede wszystkim ich skala, a nie zasięg przestrzenny.



Rysunek 17. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów z zielonymi dachami przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 18. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów z zielonymi dachami przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 19. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów z zielonymi dachami przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)

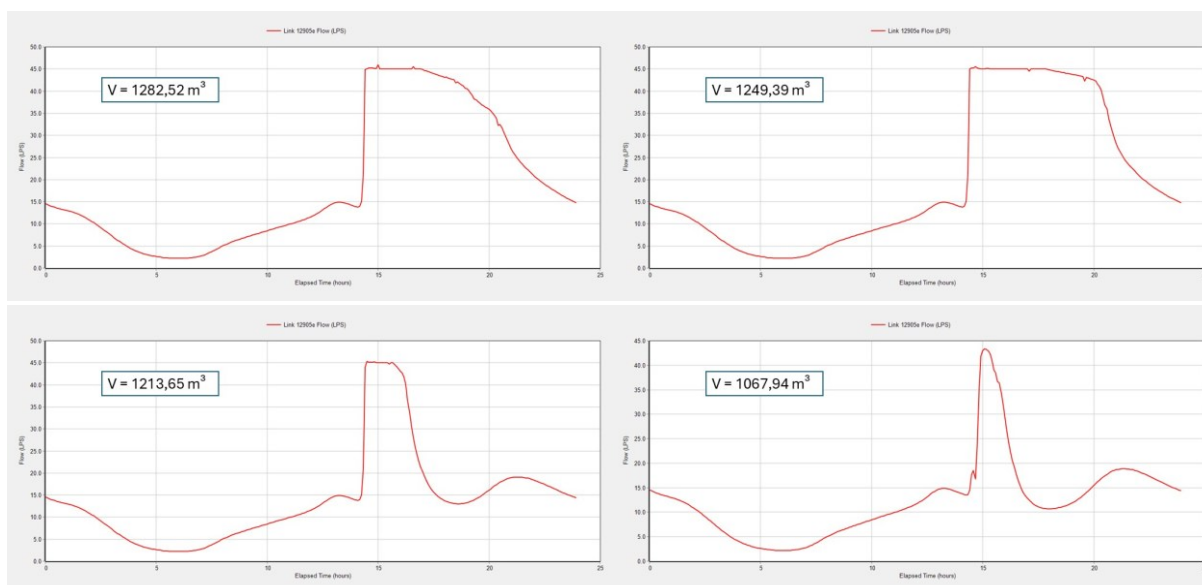
6.2.2. Niecki bioretencyjne

Niecki bioretencyjne okazały się najskuteczniejszym z analizowanych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury. Dzięki znacznej retencji powierzchniowej (200 mm), miąższości warstwy gruntowej (600 mm) oraz wysokiemu współczynnikowi filtracji umożliwiają one zarówno czasowe magazynowanie, jak i infiltrację znacznych objętości wód opadowych. Wyniki symulacji dla wszystkich scenariuszy opadowych zestawiono w tabeli 14.

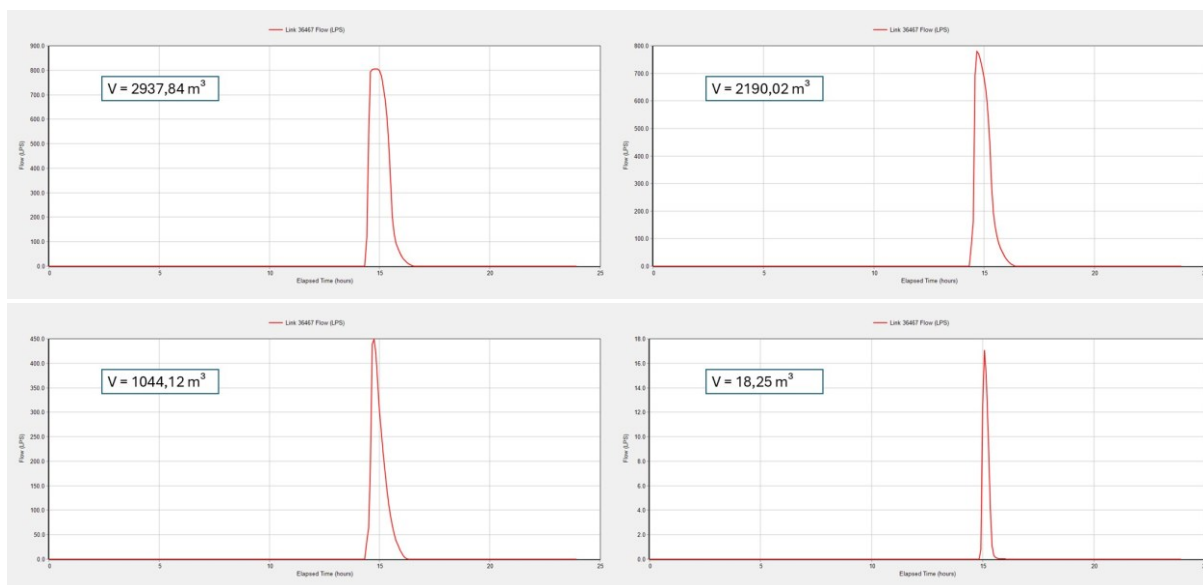
Dla opadu o $C = 1$ rok wdrożenie niecek na 100% zakwalifikowanej powierzchni prowadzi do całkowitego wyeliminowania zrzutu przez przelew burzowy, a objętość ścieków przepływających przez przepompownię zmniejsza się o 27,9% – jest to największa redukcja tego wskaźnika uzyskana w całym programie badań. Równie wysoką skuteczność stwierdzono w zakresie ograniczania wylań z sieci: dla opadu o $C = 2$ lata już 25% wdrożenie eliminuje wylania całkowicie, dla $C = 5$ lat objętość wylań spada do zera przy 75% implementacji, a dla $C = 10$ lat przy 75% wdrożeniu wylania nie występują w żadnym węźle. Nawet dla ekstremalnego opadu o $C = 50$ lat pełna implementacja niecek ogranicza objętość wylań o 99,41% (z 5100 do 30 m³), liczbę zalanych węzłów z 58 do 2, a objętość zrzutu burzowego o 48,8%.

Tabela 14. Wyniki symulacji dla wariantów z nieckami bioretencyjnymi

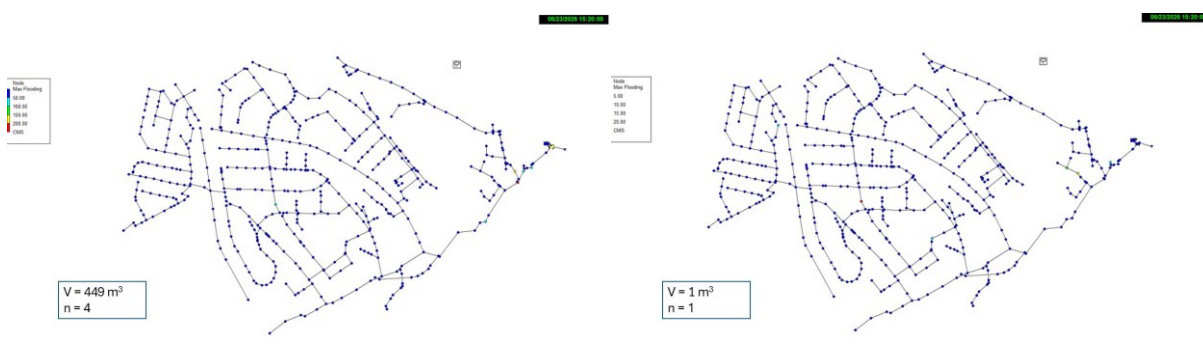
Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m³]	Przelew burzowy – objętość [m³]	Objętość wylań [m³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [-]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	25%	1266	1736	0	–	0
	50%	1232	1073	0	–	0
	75%	1189	428	0	–	0
	100%	941	0	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1275	2348	0	100	0
	50%	1242	1503	0	100	0
	75%	1202	640	0	100	0
	100%	972	0	0	100	0
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1283	2938	449	61,29	4
	50%	1249	2190	1	99,91	1
	75%	1214	1044	0	100	1
	100%	1068	18	0	100	0
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1288	3187	1110	43,94	9
	50%	1256	2688	180	90,91	3
	75%	1221	1464	0	100	0
	100%	1119	154	0	100	0
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1309	3549	4110	19,41	38
	50%	1279	3380	2540	50,20	20
	75%	1251	3063	880	82,75	5
	100%	1208	1936	30	99,41	2



Rysunek 20. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów z nieckami bioretencyjnymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 21. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów z nieckami bioretencyjnymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)



Rysunek 22. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów z nieckami bioretencyjnymi przy stopniu wdrożenia 25% i 50% (opad $C = 5$ lat)

Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy (rys. 21) obrazują wyraźne, narastające wraz ze stopniem wdrożenia ograniczanie zrzutu – dla opadu o $C = 5$ lat objętość zrzutu maleje z 3269,12 m³ w wariantie bazowym do 18,25 m³ przy pełnej implementacji, co oznacza redukcję o 99,4% i praktyczne wyłączenie przelewu z pracy. Jednocześnie hydrogramy w przekroju przepompowni (rys. 20) wskazują na skrócenie czasu pracy pompowni przy maksymalnej wydajności. Mapy wylań (rys. 22) potwierdzają, że już przy 50% wdrożeniu wylania ograniczają się do pojedynczego węzła o marginalnej objętości.

6.2.3. Ogrody deszczowe

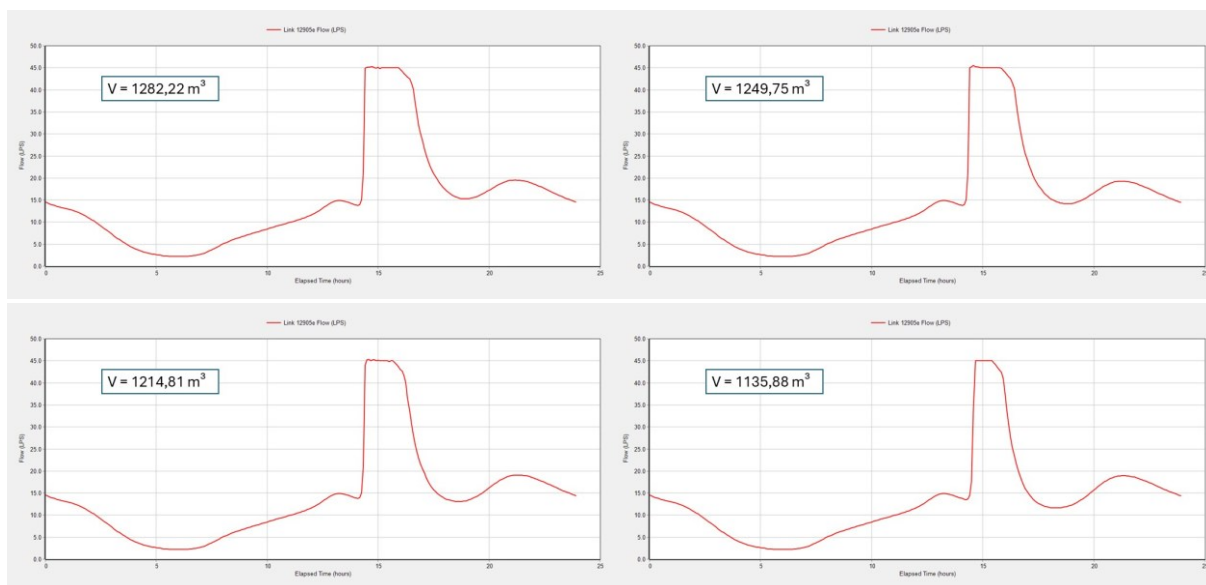
Ogrody deszczowe, przyjęte w modelu jako obiekty o powierzchni 20 m² lokalizowane przy każdym budynku, działają na zasadzie zbliżonej do niecek bioretencyjnych, lecz charakteryzują się mniejszą retencją powierzchniową (150 mm) i mniejszą miąższością warstwy gruntowej. Wyniki symulacji zestawiono w tabeli 15.

Tabela 15. Wyniki symulacji dla wariantów z ogrodami deszczowymi

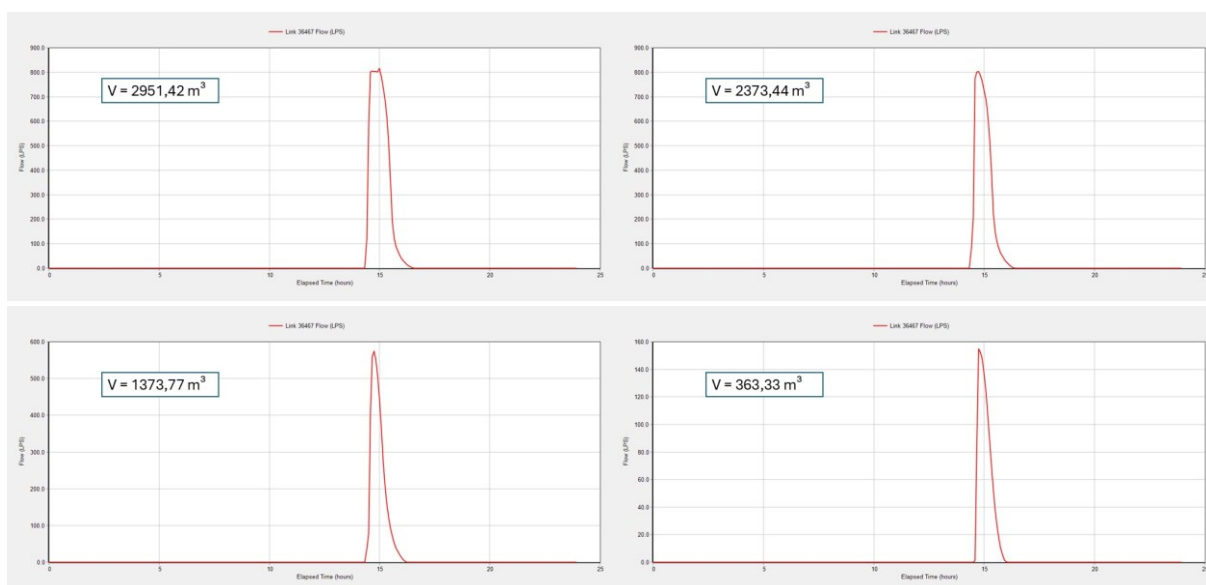
Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m ³]	Przelew burzowy – objętość [m ³]	Objętość wylań [m ³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [-]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	25%	1267	1773	0	–	0
	50%	1233	1119	0	–	0
	75%	1191	489	0	–	0
	100%	1005	0	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1276	2399	0	100	0
	50%	1242	1595	0	100	0
	75%	1203	792	0	100	0
	100%	1078	64	0	100	0
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1282	2951	536	53,79	4
	50%	1250	2373	3	99,74	2
	75%	1215	1374	0	100	0
	100%	1136	363	0	100	0
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1287	3176	1200	39,39	9
	50%	1256	2783	340	82,83	4
	75%	1222	1964	0	100	0
	100%	1159	802	0	100	0
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1309	3548	4070	20,20	36
	50%	1278	3387	2850	44,12	22
	75%	1250	3179	1700	66,67	16
	100%	1212	2813	650	87,25	10

Skuteczność ogrodów deszczowych jest nieznacznie niższa od skuteczności niecek bioretencyjnych, lecz nadal bardzo wysoka. Dla opadu o $C = 1$ rok pełna implementacja eliminuje zrzut burzowy całkowicie, a dla $C = 2$ lata ogranicza go o 97,8%. Wylania z sieci są całkowicie eliminowane przy 25% wdrożeniu dla opadu o $C = 2$ lata oraz przy 75% wdrożeniu dla opadów o $C = 5$ i 10 lat. Dla opadu o $C = 50$ lat pełne wdrożenie ogrodów deszczowych zmniejsza objętość wylań o 87,25% (do 650 m³), liczbę zalanych węzłów z 58 do 10, natomiast objętość zrzutu przez przelew o 25,7%. Redukcja objętości ścieków przepływających przez przepompownię osiąga 22,9% dla opadu o $C = 1$ rok. Hydrogramy oraz mapy wylań dla opadu o $C = 5$ lat przedstawiono na rysunkach 23–25.

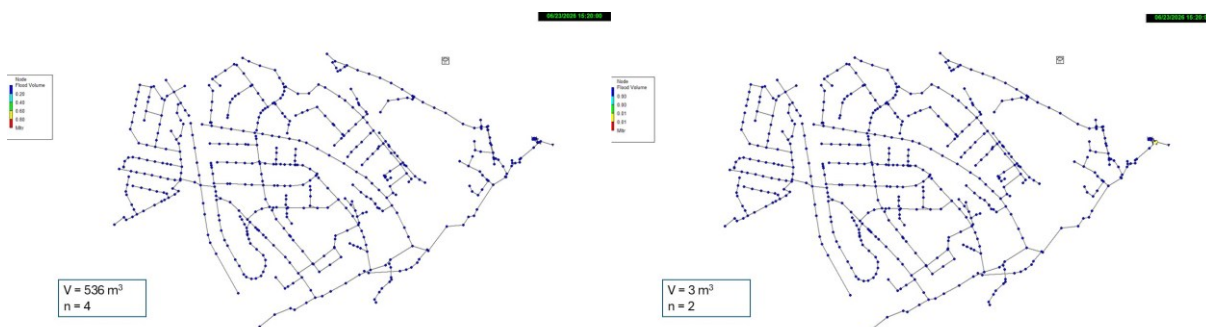
Przebieg hydrogramów (rys. 23 i 24) wskazuje na systematyczne zmniejszanie objętości i czasu trwania zrzutu burzowego wraz ze wzrostem stopnia implementacji, a mapy wylań (rys. 25) dokumentują redukcję liczby zalanych węzłów z 13 w wariantie bazowym do 4 przy 25% oraz 2 przy 50% wdrożeniu.



Rysunek 23. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów z ogrodami deszczowymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)



Rysunek 24. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów z ogrodami deszczowymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)



Rysunek 25. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów z ogrodami deszczowymi przy stopniu wdrożenia 25% i 50% (opad $C = 5$ lat)

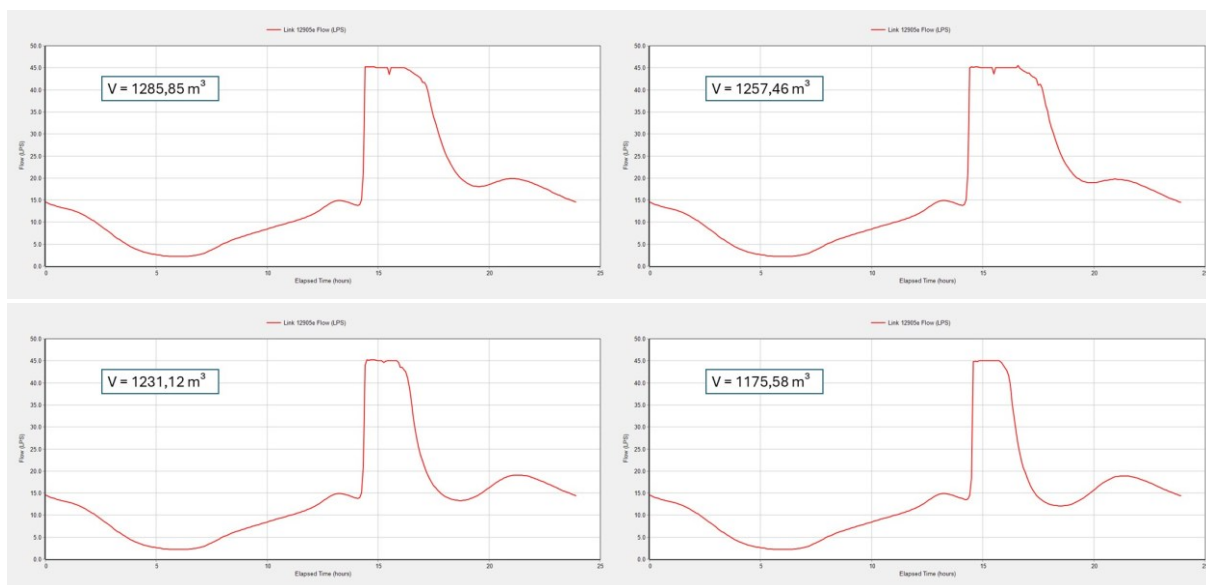
6.2.4. Powierzchnie przepuszczalne

Nawierzchnie przepuszczalne umożliwiają infiltrację wód opadowych przez warstwę konstrukcyjną nawierzchni (o wysokim współczynniku filtracji 750 mm/h) do warstwy akumulacyjnej i dalej do gruntu rodzimego. W przeciwieństwie do niecek i ogrodów deszczowych charakteryzują się jednak niewielką retencją powierzchniową (10 mm), przez co ich działanie opiera się głównie na procesach infiltracyjnych. Wyniki symulacji zestawiono w tabeli 16.

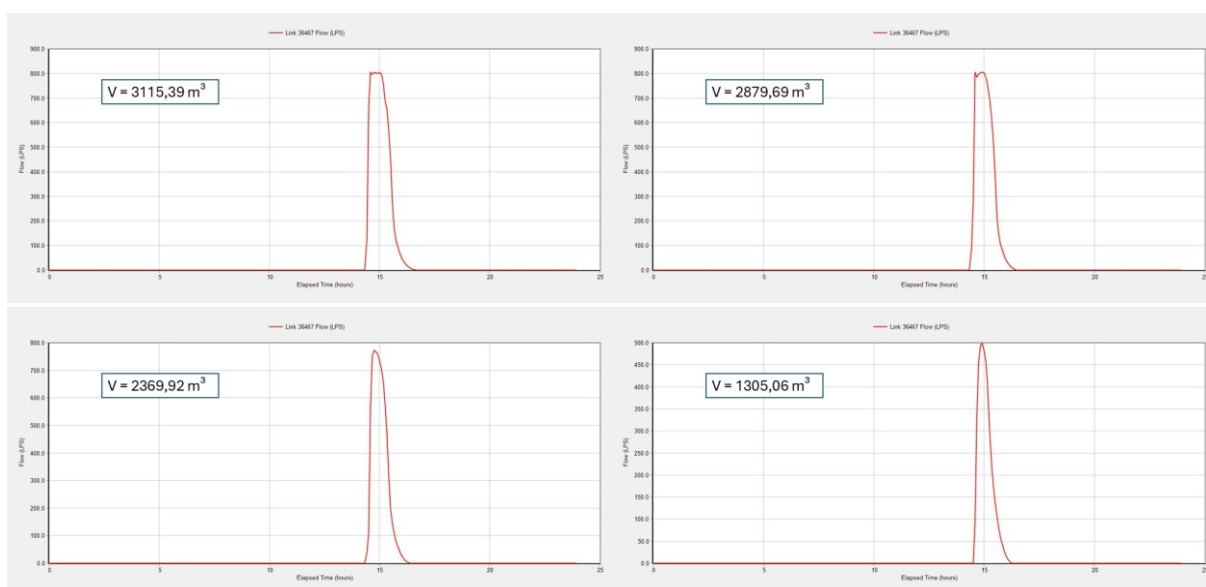
Tabela 16. Wyniki symulacji dla wariantów z powierzchniami przepuszczalnymi

Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m³]	Przelew burzowy – objętość [m³]	Objętość wylań [m³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [-]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	25%	1271	1924	0	–	0
	50%	1240	1291	0	–	0
	75%	1207	633	0	–	0
	100%	1104	58	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1279	2663	40	84,62	2
	50%	1250	2038	0	100	0
	75%	1222	1204	0	100	0
	100%	1151	405	0	100	0
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1286	3115	848	26,90	9
	50%	1257	2880	351	69,74	4
	75%	1231	2370	1	99,91	1
	100%	1176	1305	0	100	0
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1291	3308	1650	16,67	13
	50%	1262	3166	1110	43,94	10
	75%	1238	2897	440	77,78	6
	100%	1187	2091	30	98,48	1
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1311	3635	4740	7,06	46
	50%	1284	3536	4160	18,43	34
	75%	1260	3449	3400	33,33	30
	100%	1225	3161	2240	56,08	23

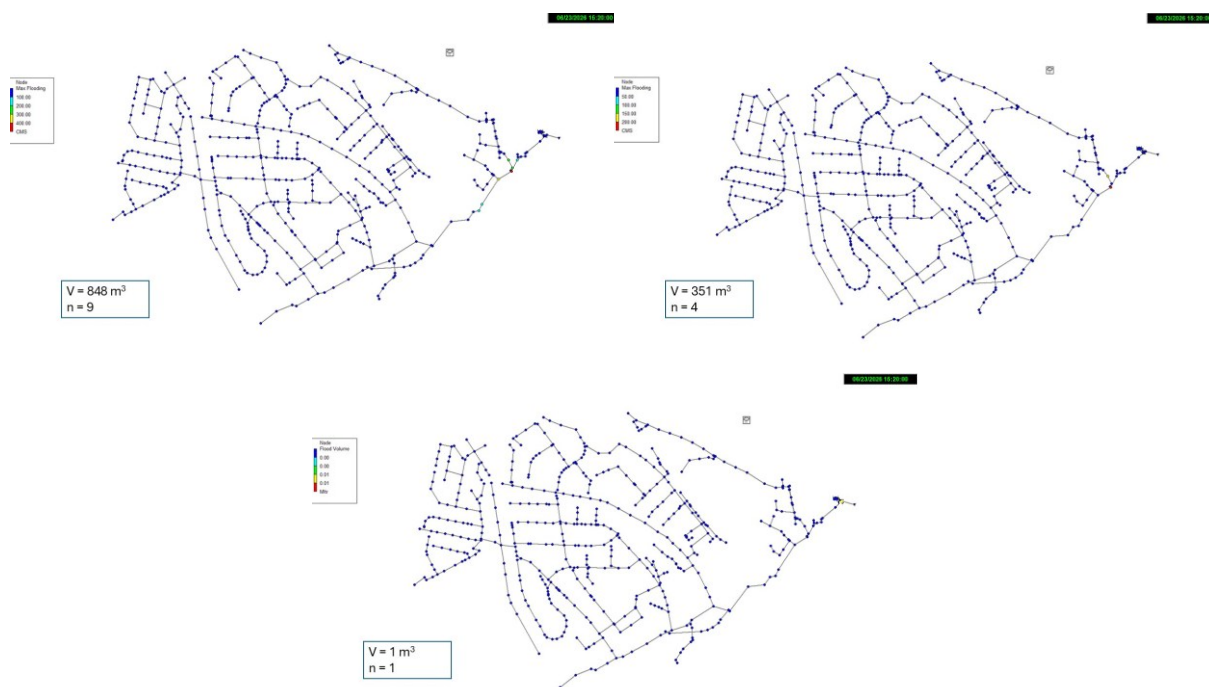
Dla opadów o małej intensywności skuteczność nawierzchni przepuszczalnych jest wysoka – przy pełnym wdrożeniu objętość zrzutu burzowego ulega redukcji o 97,5% dla opadu o $C = 1$ rok oraz o 86,1% dla $C = 2$ lata. Wraz ze wzrostem intensywności opadu efektywność maleje szybciej niż w przypadku rozwiązań bioretencyjnych – dla opadu o $C = 50$ lat pełna implementacja ogranicza zrzut o 16,5%, a objętość wylań o 56,08% (przy 23 zalanych węzłach wobec 58 w wariancie bazowym). Wylania są całkowicie eliminowane przy 50% wdrożenia dla opadu o $C = 2$ lata oraz przy pełnym wdrożeniu dla opadu o $C = 5$ lat. Hydrogramy oraz mapy wylań przedstawiono na rysunkach 26–28.



Rysunek 26. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów z powierzchniami przepuszczalnymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)



Rysunek 27. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów z powierzchniami przepuszczalnymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)



Rysunek 28. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów z powierzchniami przepuszczalnymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50% i 75% (opad $C = 5$ lat)

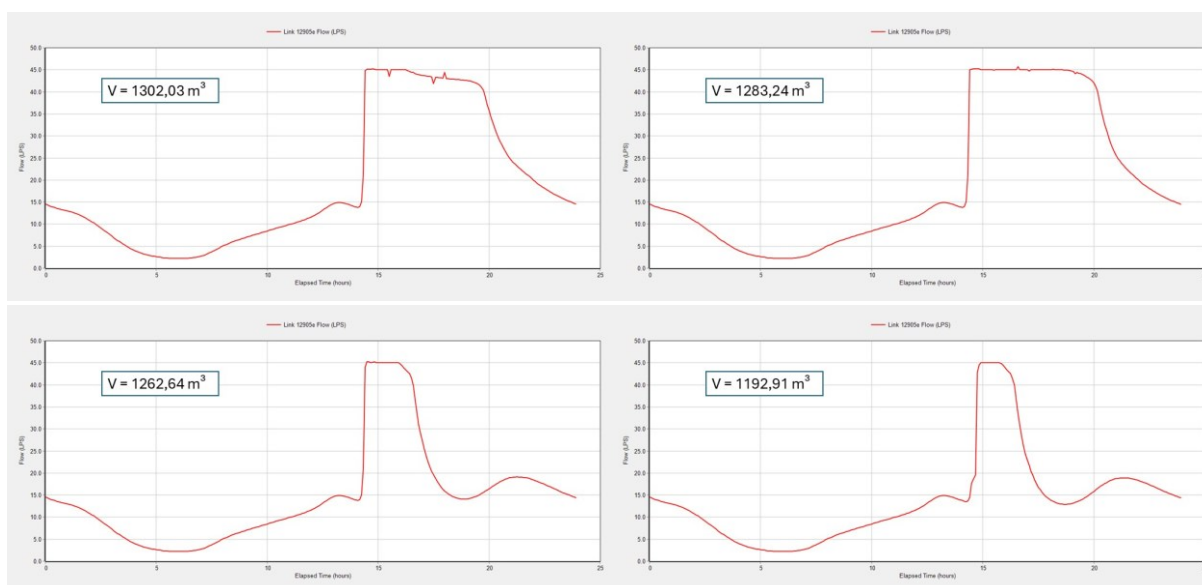
6.2.5. Skrzynki rozsączające

Skrzynki rozsączające stanowią podziemne obiekty retencyjno-infiltracyjne o bardzo dużej pojemności jednostkowej, wynikającej ze znacznej miąższości warstwy akumulacyjnej (900 mm) i wysokiego wskaźnika porowatości (0,95). W modelu przyjęto jeden obiekt o powierzchni 25 m^2 na każde 10 budynków. Wyniki symulacji zestawiono w tabeli 17.

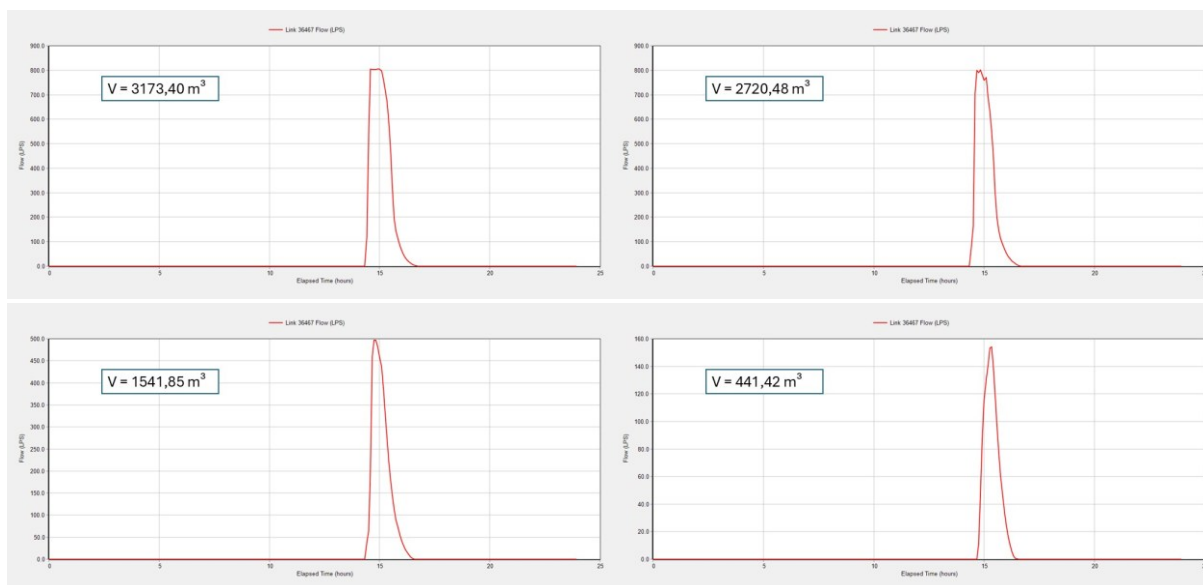
Dla opadów o częstotliwości występowania $C = 1$ i 2 lata skuteczność skrzynek rozsączających jest porównywalna ze skutecznością niecek bioretencyjnych – pełne wdrożenie eliminuje zrzut burzowy całkowicie ($C = 1$ rok) lub niemal całkowicie (redukcja o 98,5% dla $C = 2$ lata). Wylania z sieci są całkowicie eliminowane przy 25% wdrożeniu dla opadu o $C = 2$ lata oraz przy 75% wdrożeniu dla opadów o $C = 5$ i 10 lat. Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest jednak szybszy spadek skuteczności redukcji zrzutu burzowego przy opadach ekstremalnych – dla opadu o $C = 50$ lat pełna implementacja ogranicza objętość zrzutu jedynie o 15,2%, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej, wynoszącej 87,06%, redukcji objętości wylań (liczba zalanych węzłów maleje z 58 do 6). Hydrogramy oraz mapy wylań przedstawiono na rysunkach 29–31.

Tabela 17. Wyniki symulacji dla wariantów ze skrzynkami rozsączającymi

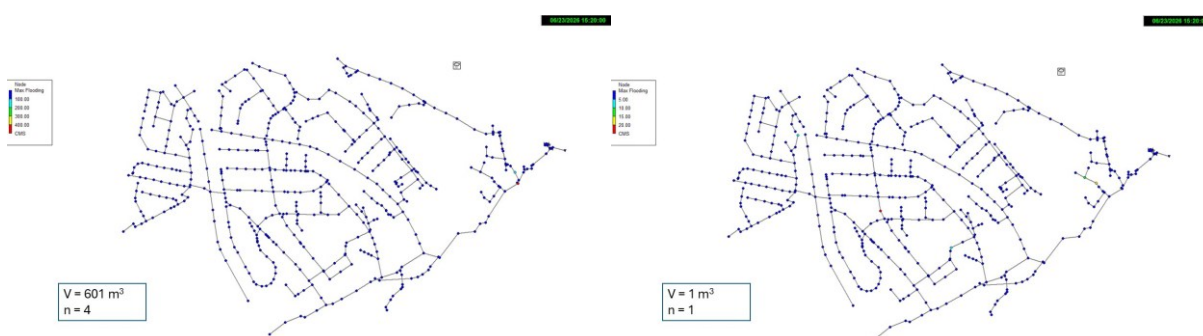
Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m³]	Przelew burzowy – objętość [m³]	Objętość wylań [m³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [-]
1 rok	Bez BGI	1304	2370,30	0	–	0
	25%	1283	1789,55	0	–	0
	50%	1253	1115,43	0	–	0
	75%	1217	463	0	–	0
	100%	1004	0	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1295	2523	0	100	0
	50%	1270	1674	0	100	0
	75%	1243	797	0	100	0
	100%	1126	44	0	100	0
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1302	3173	601	48,19	4
	50%	1283	2720	1	99,91	1
	75%	1263	1542	0	100	0
	100%	1193	441	0	100	0
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1307	3401	1390	29,80	10
	50%	1289	3256	460	76,77	3
	75%	1272	2348	0	100	0
	100%	1219	992	0	100	0
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1328	3717	4490	11,96	38
	50%	1310	3718	3470	31,96	20
	75%	1295	3656	2130	58,24	13
	100%	1266	3208	660	87,06	6



Rysunek 29. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów ze skrzynkami rozsączającymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 30. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów ze skrzynkami rozsączającymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 31. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów ze skrzynkami rozsączającymi przy stopniu wdrożenia 25% i 50% (opad C = 5 lat)

6.2.6. Beczki przydomowe

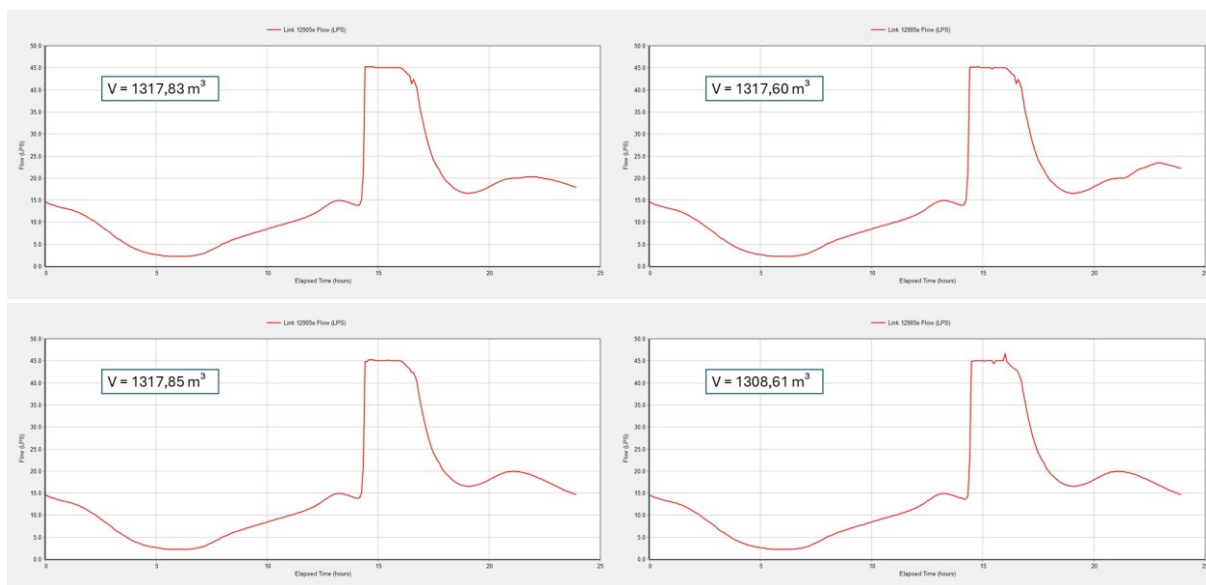
Przydomowe beczki na wodę opadową stanowią najprostsze i najtańsze z analizowanych rozwiązań. W modelu przyjęto jeden zbiornik o pojemności $1,2 \text{ m}^3$ na każdy budynek, przechwytyjący odpływ z powierzchni dachowej, z powolnym opróżnianiem (współczynnik drenażu $1,5 \text{ mm/h}$) rozpoczynającym się z sześciogodzinnym opóźnieniem, odzwierciedlającym wykorzystanie zgromadzonej wody do podlewania terenów zielonych. Wyniki symulacji zestawiono w tabeli 18.

Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest praktycznie niezauważalny wpływ na objętość ścieków przepływających przez przepompownię (redukcja poniżej 1,5% we wszystkich scenariuszach), wynikający z faktu, że woda zgromadzona w beczkach nie jest odprowadzana do sieci w czasie trwania symulacji. Beczki wykazują natomiast zauważalną skuteczność w ograniczaniu zrzutów burzowych podczas opadów o małej intensywności – dla opadu o $C = 1$ rok redukcja objętości zrzutu wynosi od 13,1% (25% wdrożenia) do 58,2% (pełna

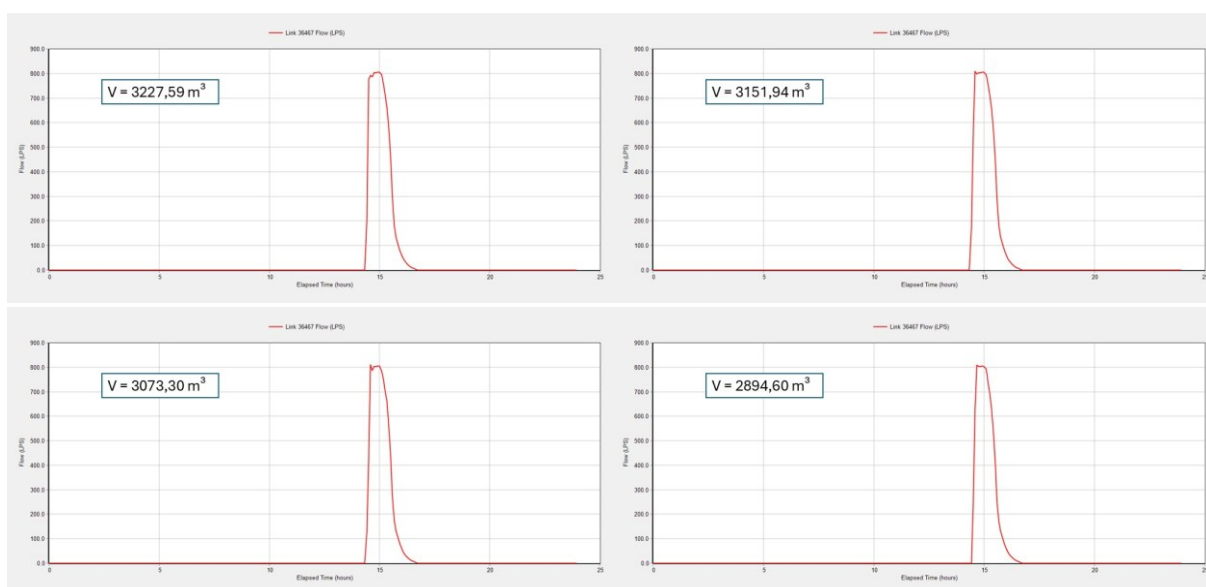
implementacja). Ograniczona pojemność zbiorników powoduje jednak jej szybkie wyczerpywanie podczas opadów nawaalnych – dla opadu o $C = 50$ lat redukcja zrzutu przy pełnym wdrożeniu wynosi zaledwie 3,1%. Na uwagę zasługuje natomiast stosunkowo wysoka skuteczność ograniczania wylań przy opadach o umiarkowanej intensywności – dla opadu o $C = 5$ lat pełna implementacja zmniejsza objętość wylań o 93,53% (do 75 m³), a liczbę zalanych węzłów z 13 do 2. Hydrogramy oraz mapy wylań przedstawiono na rysunkach 32–34.

Tabela 18. Wyniki symulacji dla wariantów z beczkami przydomowymi

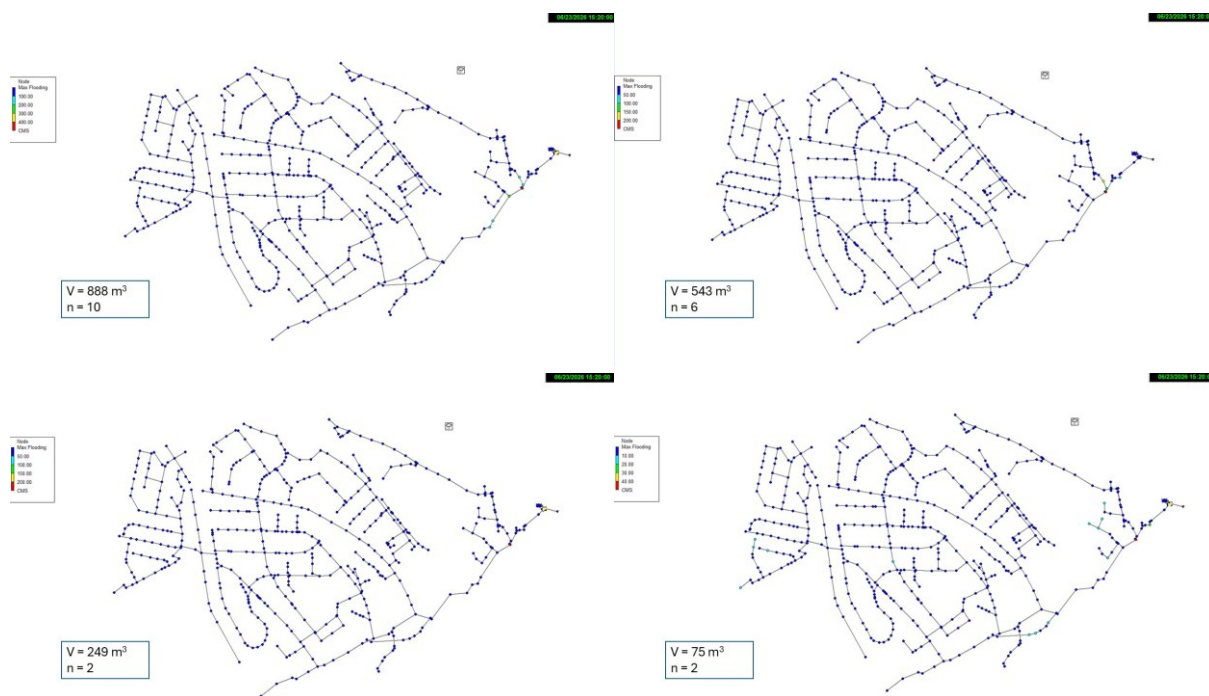
Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m ³]	Przelew burzowy – objętość [m ³]	Objętość wylań [m ³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [-]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	25%	1303	2061	0	–	0
	50%	1301	1675	0	–	0
	75%	1298	1304	0	–	0
	100%	1284	991	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	25%	1312	2791	70	73,08	2
	50%	1311	2460	0	100	0
	75%	1311	2082	0	100	0
	100%	1301	1764	0	100	0
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	25%	1318	3228	888	23,45	10
	50%	1318	3152	543	53,19	6
	75%	1318	3073	249	78,53	2
	100%	1309	2895	75	93,53	2
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	25%	1323	3391	1700	14,14	16
	50%	1323	3383	1330	32,83	11
	75%	1323	3349	990	50	10
	100%	1316	3223	740	62,63	8
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	25%	1343	3744	4810	5,69	50
	50%	1343	3700	4420	13,33	40
	75%	1343	3688	4060	20,39	34
	100%	1336	3669	3750	26,47	33



Rysunek 32. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów z beczkami przydomowymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 33. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów z beczkami przydomowymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad C = 5 lat)



Rysunek 34. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów z beczkami przydomowymi przy stopniu wdrożenia 25%, 50%, 75% i 100% (opad $C = 5$ lat)

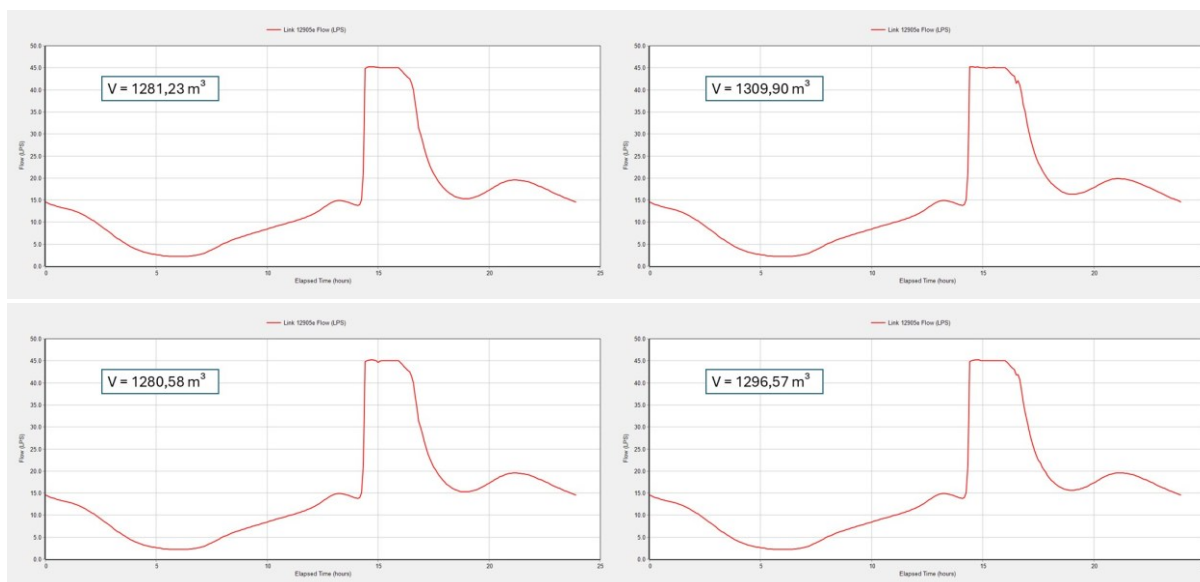
6.2.7. Warianty mieszane

W drugim etapie badań przeanalizowano cztery warianty mieszane, zakładające jednocześnie wdrożenie zielonych dachów na 25% zakwalifikowanej powierzchni oraz jednego z rozwiązań infiltracyjno-retencyjnych – ogrodów deszczowych (ZD + OD), beczek przydomowych (ZD + BP), niecek bioretencyjnych (ZD + NB) albo skrzynek rozsączających (ZD + SR) – również na poziomie 25% implementacji. Podobnie jak w przypadku wariantów z samymi zielonymi dachami, rozpatrywano dwie konfiguracje odprowadzenia drenażu; w tabeli 19 zestawiono wyniki konfiguracji z odprowadzeniem drenażu na powierzchnie przepuszczalne (dla opadów o $C = 1$ i 2 lata wyniki obu konfiguracji były tożsame).

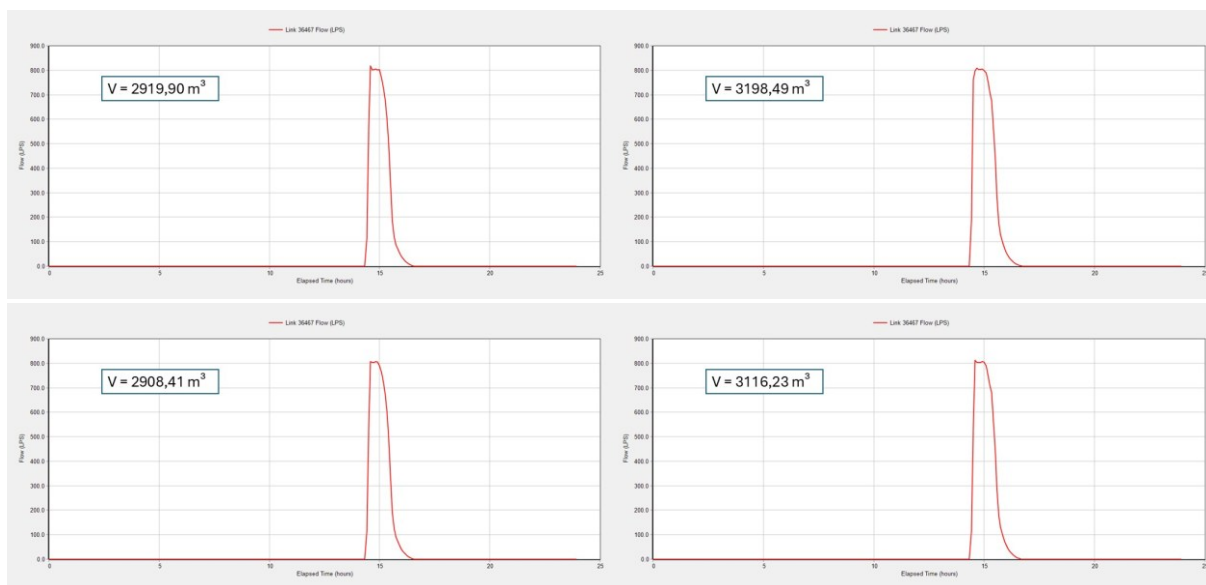
Wyniki wskazują, że efekty łącznego wdrożenia dwóch rozwiązań są zbliżone do sumy efektów uzyskiwanych przez każde z nich osobno. Przykładowo dla opadu o $C = 5$ lat wariant ZD + NB ogranicza objętość zrzutu burzowego o 11,0%, podczas gdy samodzielne wdrożenie 25% niecek bioretencyjnych zapewnia redukcję o 10,1%, a 25% zielonych dachów o 1,2%. Analogiczna prawidłowość dotyczy wylań z sieci – wariant ZD + NB ogranicza ich objętość o 63,79% wobec 61,29% dla samych niecek. Najwyższą skuteczność spośród wariantów mieszanych uzyskano dla kombinacji zielonych dachów z nieckami bioretencyjnymi oraz z ogrodami deszczowymi, najniższą natomiast dla kombinacji z beczkami przydomowymi – jako jedynej niezapewniającej całkowitej eliminacji wylań dla opadu o $C = 2$ lata. Hydrogramy oraz mapy wylań dla opadu o $C = 5$ lat przedstawiono na rysunkach 35–37.

Tabela 19. Wyniki symulacji dla wariantów mieszanych (25% zielonych dachów + 25% drugiego rozwiązania; drenaż zielonych dachów odprowadzany na powierzchnie przepuszczalne)

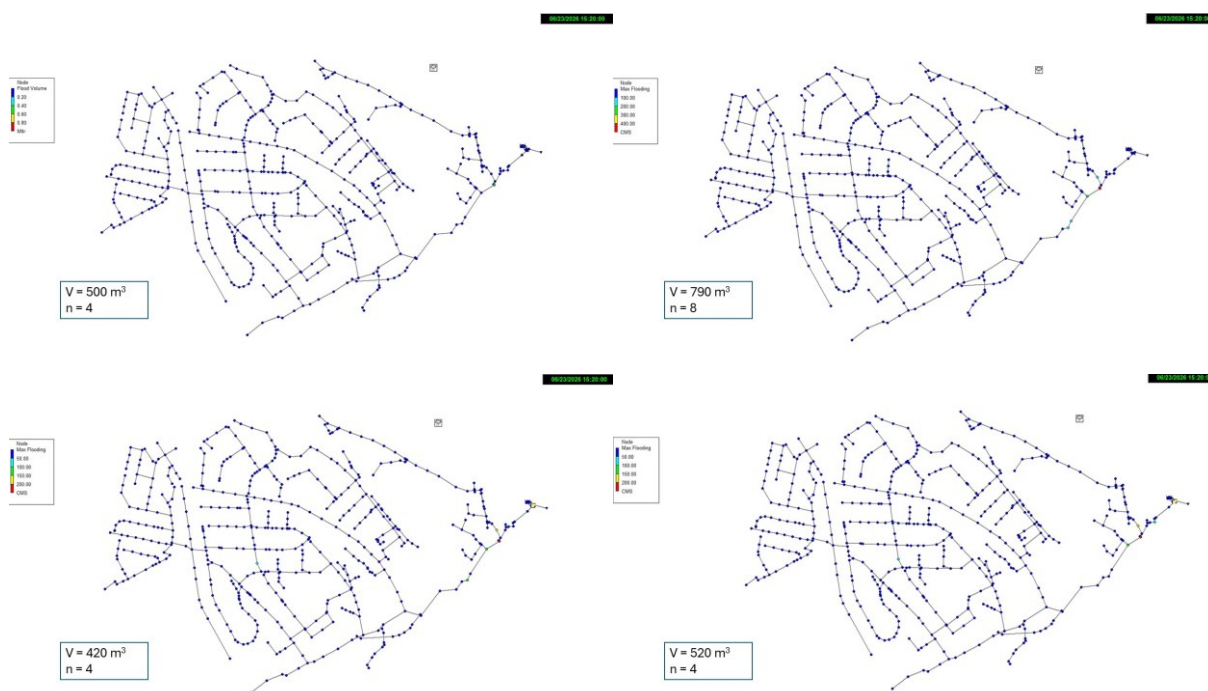
Częstość opadu C	Wariant	Przepompownia – objętość [m³]	Przelew burzowy – objętość [m³]	Objętość wylań [m³]	Redukcja objętości wylań [%]	Liczba węzłów z wylaniami [-]
1 rok	Bez BGI	1304	2370	0	–	0
	ZD + OD	1265	1753	0	–	0
	ZD + BP	1294	1982	0	–	0
	ZD + NB	1266	1727	0	–	0
	ZD + SR	1274	1757	0	–	0
2 lata	Bez BGI	1312	2918	260	–	7
	ZD + OD	1274	2379	0	100	0
	ZD + BP	1303	2714	40	84,62	2
	ZD + NB	1274	2310	0	100	0
	ZD + SR	1289	2437	0	100	0
5 lat	Bez BGI	1319	3269	1160	–	13
	ZD + OD	1281	2920	500	56,90	4
	ZD + BP	1310	3198	790	31,90	8
	ZD + NB	1281	2908	420	63,79	4
	ZD + SR	1297	3116	520	55,17	4
10 lat	Bez BGI	1323	3407	1980	–	22
	ZD + OD	1286	3152	1140	42,42	8
	ZD + BP	1314	3344	1560	21,21	14
	ZD + NB	1286	3167	1040	47,47	7
	ZD + SR	1301	3348	1260	36,36	9
50 lat	Bez BGI	1344	3785	5100	–	58
	ZD + OD	1308	3518	3920	23,14	38
	ZD + BP	1334	3729	4580	10,20	48
	ZD + NB	1308	3553	3900	23,53	36
	ZD + SR	1321	3681	4270	16,27	36



Rysunek 35. Hydrogramy przepływu w przekroju przepompowni dla wariantów mieszanych: ZD + OD, ZD + BP, ZD + NB oraz ZD + SR (opad C = 5 lat)



Rysunek 36. Hydrogramy przepływu przez przelew burzowy dla wariantów mieszanych: ZD + OD, ZD + BP, ZD + NB oraz ZD + SR (opad C = 5 lat)



Rysunek 37. Lokalizacja węzłów z wylaniami dla wariantów mieszanych: ZD + OD, ZD + BP, ZD + NB oraz ZD + SR (opad C = 5 lat)

6.3. Analiza porównawcza efektywności rozwiązań

W celu syntetycznego porównania analizowanych rozwiązań w tabeli 20 zestawiono redukcje objętości ścieków odprowadzanych przez przelew burzowy uzyskane przy pełnym (100%) wdrożeniu każdego z rozwiązań, dla wszystkich analizowanych scenariuszy opadowych

(dla zielonych dachów przyjęto konfigurację z odprowadzeniem drenażu na powierzchnie przepuszczalne).

Tabela 20. Redukcja objętości ścieków odprowadzanych przez przelew burzowy [%] przy 100% wdrożeniu poszczególnych rozwiązań BGI względem wariantu bazowego

Rozwiązanie BGI	C = 1 rok	C = 2 lata	C = 5 lat	C = 10 lat	C = 50 lat
Zielone dachy	14,9	8,5	5,4	5,2	3,5
Niecki bioretencyjne	100,0	100,0	99,4	95,5	48,8
Ogrody deszczowe	100,0	97,8	88,9	76,5	25,7
Powierzchnie przepuszczalne	97,5	86,1	60,1	38,6	16,5
Skrzynki rozsączające	100,0	98,5	86,5	70,9	15,2
Beczki przydomowe	58,2	39,6	11,5	5,4	3,1

Zestawienie to prowadzi do trzech zasadniczych spostrzeżeń. Po pierwsze, w całym zakresie analizowanych opadów najwyższą skuteczność wykazują rozwiązania infiltracyjno-retencyjne o dużej pojemności jednostkowej – niecki bioretencyjne, ogrody deszczowe oraz skrzynki rozsączające – które dla opadów o $C \leq 2$ lata eliminują zrzuty burzowe całkowicie lub niemal całkowicie. Po drugie, skuteczność wszystkich rozwiązań maleje wraz ze wzrostem intensywności opadu, co wynika z wyczerpywania się ich pojemności retencyjnej – najwyraźniej widać to w przypadku beczek przydomowych (spadek redukcji z 58,2% do 3,1%) i skrzynek rozsączających (ze 100% do 15,2%), natomiast najbardziej stabilne wyniki zachowują niecki bioretencyjne (spadek ze 100% do 48,8%). Po trzecie, rozwiązania oparte wyłącznie na retencji dachowej (zielone dachy) oraz na małych zbiornikach (beczki) pełnią funkcję uzupełniającą – ich samodzielne wdrożenie nie rozwiązuje problemów hydraulicznych systemu podczas opadów nawalnych.

Odrębnego komentarza wymaga wpływ analizowanych rozwiązań na pracę przepompowni. Całkowita objętość ścieków przepływających przez przepompownię zmienia się w stosunkowo wąskim zakresie (od około 940 do 1350 m³), co wynika z ograniczonej wydajności pompowni, limitującej dopływ do oczyszczalni niezależnie od scenariusza. Zasadnicza część efektu hydraulicznego rozwiązań BGI koncentruje się zatem w redukcji zrzutów burzowych oraz wylań z sieci, a wyraźne zmniejszenie objętości przepompowywanych ścieków (o 10–28%) występuje dopiero dla wariantów o najwyższej skuteczności retencyjnej, w których dochodzi do skrócenia czasu pracy pompowni przy maksymalnej wydajności.

Uzyskane wyniki mają bezpośrednie znaczenie w kontekście przyjętego scenariusza zmian klimatu. Przy założeniu, że opady o obecnych częstościach występowania będą pojawiały się odpowiednio częściej, wdrożenie niecek bioretencyjnych, ogrodów deszczowych lub skrzynek rozsączających na poziomie co najmniej 50% zakwalifikowanej powierzchni pozwala utrzymać system wolny od wylań dla opadów o dzisiejszej częstości $C = 2$ lata (przyszłej $C = 1$ rok), a na poziomie 75% – również dla opadów o dzisiejszej częstości $C = 5$ –10 lat. Rozproszona retencja może zatem stanowić realną alternatywę dla kosztownej rozbudowy infrastruktury podziemnej, zapewniając systemowi kanalizacyjnemu zapas przepustowości kompensujący prognozowany wzrost intensywności opadów.

7. Dyskusja wyników

7.1. Interpretacja wyników modelowania

Przeprowadzone symulacje wykazały, że rozproszone rozwiązania niebiesko-zielonej infrastruktury mogą istotnie ograniczyć obciążenie hydrauliczne systemu kanalizacji ogólnospławnej, jednak skala tego efektu zależy od trzech zasadniczych czynników: mechanizmu działania danego rozwiązania, stopnia jego wdrożenia oraz intensywności opadu. Najwyższą i najbardziej stabilną skuteczność uzyskały rozwiązania łączące znaczną retencję powierzchniową z infiltracją do gruntu (niecki bioretencyjne, ogrody deszczowe), następnie rozwiązania oparte głównie na infiltracji lub podziemnym magazynowaniu (nawierzchnie przepuszczalne, skrzynki rozsączające), a najniższą – rozwiązania o ograniczonej pojemności retencyjnej (zielone dachy, beczki przydomowe). Kolejność ta odpowiada uszeregowaniu analizowanych obiektów pod względem jednostkowej pojemności retencyjnej przypadającej na obsługiwaną powierzchnię zlewni.

Zaobserwowany we wszystkich wariantach spadek skuteczności wraz ze wzrostem częstości występowania opadu ma charakter systematyczny i wynika z wyczerpywania się pojemności retencyjnej obiektów w trakcie zdarzenia. Podczas opadów o małej intensywności obiekty BGI przechwytyują zasadniczą część odpływu, natomiast podczas opadów nawałnych ich pojemność zostaje wypełniona we wczesnej fazie zdarzenia, a pozostała część odpływu trafia do sieci w sposób zbliżony do warunków bazowych. Konsekwencją praktyczną tej prawidłowości jest konieczność definiowania celu wdrożenia BGI: rozwiązania te są bardzo skuteczne w ograniczaniu częstych, corocznych zrzutów burzowych oraz wylań przy opadach o $C \leq 10$ lat, natomiast nie eliminują skutków zdarzeń ekstremalnych, które wymagają komplementarnych działań w zakresie zarządzania ryzykiem powodziowym.

Istotnym wynikiem pracy jest również wykazanie nieliniowej zależności pomiędzy stopniem wdrożenia a uzyskiwanym efektem. Dla większości rozwiązań przyrost skuteczności pomiędzy poziomami 75% i 100% implementacji jest większy niż pomiędzy poziomami niższymi, co szczególnie wyraźnie widać w redukcji objętości ścieków przepływających przez przepompownię (np. dla niecek bioretencyjnych przy opadzie o $C = 1$ rok wzrost redukcji z 8,8% przy 75% wdrożenia do 27,9% przy pełnej implementacji). Wynika to z faktu, że dopiero przy wysokim stopniu wdrożenia retencja rozproszona przejmuje odpływ w stopniu pozwalającym na skrócenie czasu pracy przepompowni przy maksymalnej wydajności oraz uniknięcie uruchomienia przelewu burzowego. Warianty mieszane potwierdziły natomiast w przybliżeniu addytywny charakter efektów łączenia rozwiązań, co umożliwia elastyczne komponowanie strategii wdrożeniowych dostosowanych do lokalnych uwarunkowań przestrzennych.

7.2. Wrażliwość wyników na założenia modelowe

Najważniejszym czynnikiem, którego wpływ na wyniki poddano bezpośredniej analizie, okazał się sposób odprowadzenia wód z warstwy drenażowej zielonych dachów. Różnica

między dwiema rozpatrywanymi konfiguracjami, nieistotna dla opadów o $C \leq 5$ lat, dla opadu o $C = 50$ lat sięga ponad 30 punktów procentowych w odniesieniu do objętości zrzutu burzowego – konfiguracja z drenażem odprowadzającym do kanalizacji prowadzi wręcz do zwiększenia obciążenia przelewu względem stanu bez BGI. Wynik ten pokazuje, że pozornie drugorzędne założenie dotyczące szczegółu konstrukcyjnego może decydować o tym, czy dane rozwiązanie przynosi efekt pozytywny, czy negatywny w skali systemu, i powinno być każdorazowo weryfikowane na etapie projektowania.

Parametry hydrauliczne i konstrukcyjne obiektów BGI przyjęto na podstawie danych literaturowych oraz wytycznych projektowych (rozdział 5.7). Rzeczywista skuteczność wdrożonych obiektów może odbiegać od modelowej w zależności od lokalnych warunków gruntowych, jakości wykonania oraz utrzymania – dotyczy to w szczególności nawierzchni przepuszczalnych, których przepustowość może ulegać degradacji wskutek kolmatacji, a także współczynników filtracji przyjętych dla warstw gruntowych niecek i ogrodów deszczowych. Wpływ na wyniki mają również parametry kalibracyjne modelu, w tym współczynniki szorstkości oraz retencja powierzchniowa zlewni cząstkowych; przyjęty w pracy wielokryterialny proces kalibracji i walidacji ograniczył niepewność tych parametrów, jednak jej całkowite wyeliminowanie nie jest możliwe.

Na wyniki symulacji wpływa także przyjęty algorytm przestrzennego rozmieszczania obiektów BGI, oparty na losowym doborze zlewni cząstkowych z ważeniem powierzchniowym. Rzeczywisty proces wdrażania rozwiązań, uzależniony od decyzji właścicieli nieruchomości oraz dostępności finansowania, może prowadzić do innej konfiguracji przestrzennej o odmiennym oddziaływaniu lokalnym, zwłaszcza w odniesieniu do liczby i lokalizacji węzłów z wylaniami. Wpływ ten jest natomiast mniejszy w odniesieniu do wskaźników zintegrowanych (objętości w przekroju przepompowni i przelewu), które zależą przede wszystkim od sumarycznej pojemności retencyjnej wdrożonych obiektów.

7.3. Ograniczenia metodyczne

Podstawowym ograniczeniem przeprowadzonych badań jest oparcie kalibracji i walidacji modelu na pomiarach z jednego przekroju kontrolnego (przepompownia Ceramiczna) oraz na stosunkowo krótkim, rocznym okresie obserwacji. Deszczomierz wykorzystany w procesie kalibracji zlokalizowany jest poza granicami analizowanej zlewni, co mogło wpływać na rozbieżności pomiędzy zarejestrowanym a rzeczywistym przebiegiem opadów – ograniczenie to ujawniło się w wartościach wskaźników jakości uzyskanych dla kalibracji w warunkach opadowych. Walidacja modelu przeprowadzona dla niezależnego okresu obejmującego opady nawalne wykazała jednak bardzo dobrą zgodność wyników symulacji z pomiarami, co uzasadnia wykorzystanie modelu do analiz scenariuszowych.

Analizy wariantowe przeprowadzono dla syntetycznych opadów modelowych Eulera o stałym czasie trwania $t = 45$ min. Opady rzeczywiste charakteryzują się zmiennością przestrzenną oraz zróżnicowanymi przebiegami czasowymi, a skuteczność rozwiązań BGI zależy również od odstępów pomiędzy kolejnymi zdarzeniami, warunkujących odtworzenie

pojemności retencyjnej obiektów. Przyjęte podejście, typowe dla analiz projektowych, umożliwia porównywalność wariantów, nie zastępuje jednak wieloletnich symulacji ciągłych. Należy również zaznaczyć, że objętość wylań wyznaczana w programie SWMM jako Flooding Loss traktowana jest jako woda usuwana z systemu, podczas gdy w rzeczywistości część wylanych ścieków spływa powierzchniowo i może powracać do sieci w niżej położonych węzłach.

Zakres pracy ograniczono do hydraulicznych aspektów funkcjonowania systemu kanalizacyjnego. Poza analizą pozostały kwestie jakości wód (w tym ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych przez przelew burzowy do rzeki Bóbr), efektów mikroklimatycznych i przyrodniczych rozwiązań BGI, a także aspekty ekonomiczne, obejmujące koszty inwestycyjne i eksploatacyjne poszczególnych wariantów. Przyjęty scenariusz zmian klimatu, oparty na przesunięciu częstości występowania opadów, stanowi uproszczenie umożliwiające wykorzystanie lokalnych charakterystyk opadowych; nie uwzględnia on natomiast możliwych zmian struktury czasowej opadów prognozowanych w modelach klimatycznych.

7.4. Odniesienie do wyników innych badań

Uzyskane wyniki są zbieżne z rezultatami badań publikowanych w literaturze przedmiotu. Wysoka skuteczność systemów bioretencyjnych, które w niniejszej pracy zapewniły redukcję objętości zrzutów burzowych sięgającą 100% przy opadach o małej intensywności oraz około 49% przy opadzie o $C = 50$ lat, potwierdza doniesienia o redukcji objętości odpływu przekraczającej 50% oraz redukcji przepływów szczytowych powyżej 70% (Hoban & Gambirazio, 2021; Sabbagh et al., 2025). Ograniczona skuteczność zielonych dachów podczas opadów nawalnych, przy jednocześnie zauważalnym efekcie dla opadów częstych, odpowiada wynikom badań wskazującym, że zdolność retencyjna zielonych dachów zależy od grubości warstw konstrukcyjnych i ulega wyczerpaniu podczas zdarzeń ekstremalnych (Hill et al., 2017; Howell et al., 2017). Podobnie malejąca wraz z intensywnością opadu efektywność nawierzchni przepuszczalnych potwierdza ich wysoką skuteczność przede wszystkim podczas opadów o małej i średniej intensywności (Y. Y. Cheng et al., 2019; Orsi et al., 2025).

Zaobserwowana w przybliżeniu addytywność efektów wariantów mieszanych wpisuje się w formułowany w literaturze postulat łączenia komplementarnych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury w celu zwiększenia zdolności retencyjnej zlewni oraz bardziej równomiernego rozłożenia odpływu w czasie (Eckart et al., 2017; Fletcher et al., 2015). Wyniki pracy uzupełniają ten obraz o ilościową ocenę współdziałania rozwiązań w rzeczywistym systemie ogólnospławnym, wykonaną na poziomie całej zlewni miejskiej – a więc w ujęciu wskazywanym w rozdziale 2.7 jako luka badawcza.

Szczególną wartość poznawczą ma wykazany w pracy wpływ konfiguracji odprowadzenia drenażu zielonych dachów na wyniki w skali systemu. Rezultat ten koresponduje z sygnalizowanymi w literaturze trudnościami poprawnego odwzorowania procesów retencji i odpływu w modułach LID programu SWMM (Bako & Kazezyilmaz-Alhan, 2023; US EPA, 2015) i wskazuje, że ocena rozwiązań BGI prowadzona wyłącznie na poziomie pojedynczego obiektu,

bez uwzględnienia jego powiązania z systemem odwodnienia, może prowadzić do błędnych wniosków. Potwierdza to zasadność prowadzenia analiz z wykorzystaniem modeli hydrodynamicznych obejmujących kompletny system kanalizacyjny, co postulowano również w pracach dotyczących adaptacji systemów odwodnienia do zmian klimatu (Silva et al., 2021; Sobota et al., 2022).

8. Wnioski końcowe

8.1. Weryfikacja hipotez badawczych

Przeprowadzone badania pozwoliły na pozytywną weryfikację tezy pracy, zgodnie z którą wdrożenie rozproszonych rozwiązań niebiesko-zielonej infrastruktury w zlewniach miejskich umożliwia istotne zmniejszenie obciążenia hydraulicznego systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej. W analizowanym systemie kanalizacji ogólnospławnej miasta Bolestawiec rozwiązania BGI zapewniły redukcję objętości ścieków odprowadzanych przez przelew burzowy sięgającą 100%, redukcję objętości wylań z sieci sięgającą 100% oraz zmniejszenie objętości ścieków przepływających przez przepompownię o blisko 28%, przy czym skala tych efektów zależała od rodzaju rozwiązania, stopnia jego wdrożenia oraz intensywności opadu.

Weryfikacja tezy wymaga jednak dwóch zastrzeżeń. Po pierwsze, skuteczność wszystkich analizowanych rozwiązań maleje wraz ze wzrostem częstości występowania opadu, w związku z czym rozproszona retencja skutecznie ogranicza skutki opadów o częstościach $C = 1$ –10 lat, natomiast przy zdarzeniach ekstremalnych ($C = 50$ lat) jedynie łagodzi, lecz nie eliminuje przeciążeń hydraulicznych. Po drugie, wykazano, że niewłaściwie zaprojektowane rozwiązanie – zielone dachy z drenażem odprowadzanym bezpośrednio do kanalizacji – może przy opadach nawałnych zwiększyć obciążenie przelewu burzowego względem stanu istniejącego. Skuteczność niebiesko-zielonej infrastruktury nie jest zatem właściwością daną a priori, lecz rezultatem poprawnego doboru, zwymiarowania i powiązania rozwiązań z systemem odwodnienia.

8.2. Najważniejsze wyniki pracy

Do najważniejszych wyników przeprowadzonych badań należy zaliczyć:

- Opracowanie, skalibrowanie i zwalidowanie hydrodynamicznego modelu rzeczywistego systemu kanalizacji ogólnospławnej (527 zlewni cząstkowych, 529 węzłów, 544 przewody) na podstawie rocznej serii pomiarowej z przepompowni ścieków, z uzyskaniem bardzo dobrych wskaźników jakości walidacji ($R^2 = 0,76$, błąd objętości 7,03%, błąd przepływu maksymalnego 5,92%).
- Wykazanie, że w stanie istniejącym przelew burzowy uruchamiany jest już podczas opadów o częstości występowania $C = 1$ rok, a wylania z sieci pojawiają się od opadów o $C = 2$ lata i obejmują do 58 węzłów przy opadzie o $C = 50$ lat.
- Wykazanie, że najskuteczniejszym z analizowanych rozwiązań są niecki bioretencyjne, które przy pełnym wdrożeniu eliminują zrzuty burzowe dla opadów o $C \leq 2$ lata, eliminują wylania z sieci dla opadów o $C \leq 10$ lat oraz ograniczają objętość wylań o 99,4% przy opadzie o $C = 50$ lat.
- Uszeregowanie analizowanych rozwiązań pod względem skuteczności hydraulicznej: niecki bioretencyjne > ogrody deszczowe > skrzynki rozsączające $\approx$ nawierzchnie

przepuszczalne > becзки przydomowe > zielone dachy, wraz z ilościową charakterystyką spadku skuteczności ze wzrostem intensywności opadu.

- Wykazanie kluczowego znaczenia sposobu odprowadzenia wód z warstwy drenażowej zielonych dachów – odprowadzenie drenażu do kanalizacji może przy opadach o $C \geq 10$ lat zwiększać objętość zrzutów burzowych względem stanu bez BGI (o 30,4% przy $C = 50$ lat i pełnej implementacji), podczas gdy odprowadzenie na powierzchnie przepuszczalne zapewnia efekt pozytywny w całym zakresie opadów.
- Wykazanie w przybliżeniu addytywnego charakteru efektów łącznego wdrażania rozwiązań BGI w wariantach mieszanych, umożliwiającego prognozowanie skuteczności strategii łączonych na podstawie wyników rozwiązań składowych.
- Wykazanie, że wdrożenie rozwiązań infiltracyjno-retencyjnych na poziomie co najmniej 50–75% dostępnej powierzchni pozwala skompensować prognozowany wzrost częstości występowania opadów nawalnych i utrzymać system wolny od wylań w warunkach przyjętego scenariusza zmian klimatu.

Opracowana metodyka – obejmująca weryfikację danych GIS, budowę i wielokryterialną kalibrację modelu, algorytm przestrzennego rozmieszczania obiektów BGI oraz jednolity zestaw wskaźników oceny – ma charakter uniwersalny i może być bezpośrednio zastosowana do oceny efektywności niebiesko-zielonej infrastruktury w innych systemach kanalizacji ogólnospławnej.

8.3. Kierunki dalszych badań

Przeprowadzone badania wskazują na kilka kierunków dalszych prac. Za celowe należy uznać rozszerzenie analiz o wieloletnie symulacje ciągłe, oparte na długich seriach opadowych, które umożliwią ocenę skuteczności rozwiązań BGI z uwzględnieniem sekwencji zdarzeń opadowych oraz procesów odtwarzania pojemności retencyjnej obiektów, a także o warianty kompleksowe zakładające równoczesne wdrożenie wszystkich analizowanych rozwiązań. Rozwinięciem pracy powinna być również analiza ekonomiczna, obejmująca koszty inwestycyjne i eksploatacyjne poszczególnych wariantów w odniesieniu do uzyskiwanych efektów hydraulicznych, umożliwiającą wskazanie strategii optymalnych kosztowo.

Odrębnym kierunkiem badań jest uwzględnienie aspektów jakościowych, w szczególności redukcji ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych przez przelew burzowy do odbiornika, co pozwoliłoby na pełniejszą ocenę środowiskowych korzyści ograniczania zrzutów burzowych. Wskazane jest ponadto objęcie monitoringiem pilotażowych obiektów niebiesko-zielonej infrastruktury wdrażanych na terenie miasta, co umożliwiłoby weryfikację przyjętych w modelu parametrów LID w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, oraz rozszerzenie sieci pomiarów opadowych i przepływowych w zlewni, ograniczające niepewność przyszłych analiz modelowych. Wreszcie, zastosowanie opracowanej metodyki w zlewniach o odmiennej charakterystyce pozwoliłoby na ocenę przenośności uzyskanych wyników oraz sformułowanie ogólniejszych zaleceń projektowych dotyczących wykorzystania rozproszonej retencji w adaptacji systemów kanalizacyjnych do zmian klimatu.

Literatura

- 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. <https://doi.org/10.2166/bgs.2021.016>
- Andersson, E., Grimm, N. B., Lewis, J. A., Redman, C. L., Barthel, S., Colding, J., & Elmqvist, T. (2022). Urban climate resilience through hybrid infrastructure. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 55). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101158>
- Ansarifard, S., Eyvazi, M., kalantari, M., mohseni, B., Ghorbanifard, M., Moghaddam, H. J., & Nouri, M. (2024). Simulation of floods under the influence of effective factors in hydraulic and hydrological models using HEC-RAS and MIKE 21. *Discover Water*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00155-0>
- Antoszewski, P., Świerk, D., Krzyżaniak, M., & Choryński, A. (2024). Legal Tools for Blue-Green Infrastructure Planning—Based on the Example of Poznań (Poland). *Sustainability (Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/su16010141>
- Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., Olsson, J., Beecham, S., Pathirana, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H., & Nguyen, V. T. V. (2013). Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: A review. In *Water Science and Technology* (Vol. 68, Number 1, pp. 16–28). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.251>
- Asghari, F., Piadeh, F., Egyir, D., Yousefi, H., Rizzuto, J. P., Campos, L. C., & Behzadian, K. (2023). Resilience Assessment in Urban Water Infrastructure: A Critical Review of Approaches, Strategies and Applications. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Number 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151411151>
- Ayad, A., Fahmy, M., & Kamel, W. (2019). *Urban Green and Blue Infrastructure Simulation in a Changing Climate from Microclimate to Energy Consumption: A Case Study in Alexandria, Egypt*. 3499–3507. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210676>
- Bako, K., & Kazezyilmaz-Alhan, C. M. (2023). An improvement in drainage flow equation of EPA SWMM green roof module. *Water Science and Technology*, 87(9), 2172–2183. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.118>
- Baron, K. (2020). *Błękitno-zielona infrastruktura a bezpieczeństwo powodziowe środowisk zurbanizowanych / Blue-green infrastructure and flood safety of urban environments*. <https://www.researchgate.net/publication/351563391>
- Chandwani, D., Singh, R., Satpute, R., & Dabir, V. (2021). *Blue-Green Infrastructure for Environmental Sustainability: A Bibliometric Analysis*. www.scopus.com
- Chatzimentor, A., Apostolopoulou, E., & Mazaris, A. D. (2020). A review of green infrastructure research in Europe: Challenges and opportunities. In *Landscape and Urban Planning* (Vol. 198). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103775>

- Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2014). Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate. *Scientific Reports*, 4(1), 7093. <https://doi.org/10.1038/srep07093>
- Cheng, Y. Y., Lo, S. L., Ho, C. C., Lin, J. Y., & Yu, S. L. (2019). Field testing of porous pavement performance on runoff and temperature control in Taipei City. *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/W11122635>
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Dell’Aira, F., & Meier, C. I. (2025). Beyond total impervious area: a new lumped descriptor of basin-wide hydrologic connectivity for characterizing urban watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(4), 1001–1032. <https://doi.org/10.5194/hess-29-1001-2025>
- Departament Gospodarki Wodnej i Żeglugi Śródlądowej. (2023). *Błękitno-zielona infrastruktura. Dlaczego jest tak ważna dla retencji?* <https://www.gov.pl/web/retencja/blekitno-zielona-infrastruktura-dlaczego-jest-tak-wazna-dla-retencji>
- Dong, X., Guo, H., & Zeng, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Research*, 124, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of The Total Environment*, 607–608, 413–432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>
- Fletcher, T. D., Deletic, A., Mitchell, V. G., & Hatt, B. E. (2008). Reuse of Urban Runoff in Australia: A Review of Recent Advances and Remaining Challenges. *Journal of Environmental Quality*, 37(S5). <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0411>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Ghofrani, Z., Sposito, V., & Faggian, R. (2017). A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts. In *International Journal of Environment and Sustainability* (Vol. 6, Number 1). www.sciencetarget.com
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- Grădinaru, S. R., & Hersperger, A. M. (2019). Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.04.018>

- Green, D., O'Donnell, E., Johnson, M., Slater, L., Thorne, C., Zheng, S., Stirling, R., Chan, F. K. S., Li, L., & Boothroyd, R. J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* (Vol. 8, Number 6). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wat2.1560>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hamel, P., & Fletcher, T. D. (2014). The impact of stormwater source-control strategies on the (low) flow regime of urban catchments. *Water Science and Technology*, 69(4), 739–745. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.772>
- Hill, J., Drake, J., Sleep, B., & Margolis, L. (2017). Influences of Four Extensive Green Roof Design Variables on Stormwater Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001534](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001534)
- Hoban, A., & Gambirazio, C. (2021). Bioretention performance: a review of field studies. *Australian Journal of Water Resources*, 25(2), 202–210. <https://doi.org/10.1080/13241583.2021.1984190>
- Howell, C., Drake, J., & Margolis, L. (2017, September). *How green roofs can help cities sponge away excess stormwater*. <https://theconversation.com/how-green-roofs-can-protect-city-streets-from-flooding-82679>
- IPCC. (2023a). Chapter 4: Water. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 551–712). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>
- IPCC. (2023b). Water Cycle Changes. In I. P. on C. C. (IPCC) (Ed.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 1055–1210). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.010>
- Iwaszuk, E., Rudik, G., Duin, L., Mederake, L., Davis, M., Naumann, S., & Wagner, I. (2019). *Błękitno-zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu w miastach Katalog techniczny*.
- Jefferson, A. J., Bhaskar, A. S., Hopkins, K. G., Fanelli, R., Avellaneda, P. M., & McMillan, S. K. (2017). Stormwater management network effectiveness and implications for urban watershed function: A critical review. *Hydrological Processes*, 31(23), 4056–4080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.11347>
- Kapetas, L., & Fenner, R. (2020). Integrating blue-green and grey infrastructure through an adaptation pathways approach to surface water flooding. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2168), 20190204. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0204>
- Kaur, R., & Gupta, K. (2022). Blue-Green Infrastructure (BGI) network in urban areas for sustainable storm water management: A geospatial approach. *City and Environment Interactions*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2022.100087>

- Keller, A. A., Garner, K., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2023). Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models. *Science of The Total Environment*, 867, 161209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161209>
- Kimic, K., & Ostrysz, K. (2021). Assessment of Blue and Green Infrastructure Solutions in Shaping Urban Public Spaces—Spatial and Functional, Environmental, and Social Aspects. *Sustainability*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131911041>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Legates, D. R., & McCabe Jr., G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Liao, K. H., Deng, S., & Tan, P. Y. (2017). Blue-Green Infrastructure: New Frontier for Sustainable Urban Stormwater Management. In *Advances in 21st Century Human Settlements* (pp. 203–226). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4113-6_10
- Londra, P. A., Antoniou, G. P., Theocharis, A. T., Dalezios, N. R., & Angelakis, A. N. (2021). *Evolution of Small-Scale Rainwater Harvesting in the Hellenic World Through the Millennia*.
- Martín Muñoz, S., Elliott, S., Schoelynck, J., & Staes, J. (2024). Urban Stormwater Management Using Nature-Based Solutions: A Review and Conceptual Model of Floodable Parks. *Land*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/land13111858>
- Mayor of London. (2016). *SuDS in London – a guide*. <https://content.tfl.gov.uk/sustainable-urban-drainage-november-2016.pdf>
- Mazur-Belzyt, K. (2021). *Błękitna infrastruktura Londynu w kontekście adaptacji do zmian klimatu*. <https://www.therrc.co.uk/manual-river-restoration-techniques>,
- McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13), 2295–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>
- Michalik-Śnieżek, M., Adamczyk-Mucha, K., Sowisz, R., & Bieske-Matejak, A. (2024). Green Roofs: Nature-Based Solution or Forced Substitute for Biologically Active Areas? A Case Study of Lublin City, Poland. *Sustainability (Switzerland)*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/su16083131>
- Miller, J. D., & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345–362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>
- Muttil, N., Nasrin, T., & Sharma, A. K. (2023). Impacts of Extreme Rainfalls on Sewer Overflows and WSUD-Based Mitigation Strategies: A Review. *Water*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/w15030429>

- Nazeri Tahroudi, M. (2025). Comprehensive global assessment of precipitation trend and pattern variability considering their distribution dynamics. *Scientific Reports*, 15(1), 22458. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06050-5>
- Nowakowska, M., Kotowski, A., Wydawnicza, O., & Wrocławskiej, P. (2017). *Metodyka i zasady modelowania odwodnień terenów zurbanizowanych*.
- O'Donnell, E., Lamond, J., & Thorne, C. (2017). Recognising barriers to implementation of Blue-Green Infrastructure: a Newcastle case study. *Urban Water Journal*, 14. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1279190>
- Orsi, E., Crispino, G., Iervolino, M., & Gisonni, C. (2025). Hydraulic and Hydrologic Invariance: Effectiveness of Green Roofs and Permeable Pavements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 151(2). <https://doi.org/10.1061/jidedh.ireng-10304>
- Osaka, S., Bellamy, R., & Castree, N. (2021). Framing “nature-based” solutions to climate change. *WIREs Climate Change*, 12(5), e729. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wcc.729>
- Pearsall, H. (2018). Chapter 20: New directions in urban environmental/green gentrification research. In *Handbook of Gentrification Studies*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781785361746.00031>
- Pochodyła, E., Glińska-Lewczuk, K., & Jaszczak, A. (2021). Blue-green infrastructure as a new trend and an effective tool for water management in urban areas. *Landscape Online*, 92, 1–20. <https://doi.org/10.3097/LO.202192>
- Przestrzelska, K., Wartalska, K., Rosińska, W., Jurasz, J., & Kaźmierczak, B. (2024). Climate Resilient Cities: A Review of Blue-Green Solutions Worldwide. *Water Resources Management*, 38(15), 5885–5910. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03950-5>
- Puzdrakiewicz, K. (2017). ZIELONA INFRASTRUKTURA JAKO WIELOZADANIOWE NARZĘDZIE ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU. *Studia Miejskie*, (27), 155–174. <https://doi.org/10.25167/sm2017.027.12>
- Ren, X., Hong, N., Li, L., Kang, J., & Li, J. (2020). Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process. *Geoderma*, 363, 114158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114158>
- Rodak, C. M., Jayakaran, A. D., Moore, T. L., David, R., Rhodes, E. R., & Vogel, J. R. (2020). Urban stormwater characterization, control, and treatment. *Water Environment Research*, 92(10), 1552–1586. <https://doi.org/10.1002/wer.1403>
- Sabbagh, M., Browne, D., Pickering, L., Lintern, A., & Winfrey, B. (2025). Urban stormwater bioretention reduces runoff and improves water quality: A global meta-analysis of field studies. *Journal of Hydrology*, 663, 134163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134163>
- Salvadore, E., Bronders, J., & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. In *Journal of Hydrology* (Vol. 529, Number P1, pp. 62–81). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>

- Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models iber and SWMM. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092647>
- Shafique, M., Luo, X., & Zuo, J. (2020). Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. In *Solar Energy* (Vol. 202, pp. 485–497). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.101>
- Shah, A. M., Liu, G., Meng, F., Yang, Q., Xue, J., Dumontet, S., Passaro, R., & Casazza, M. (2021). A Review of Urban Green and Blue Infrastructure from the Perspective of Food-Energy-Water Nexus. *Energies*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/en14154583>
- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263–275. <https://doi.org/10.1080/15730620500386529>
- Sidek, L. M., Jaafar, A. S., Majid, W. H. A. W. A., Basri, H., Marufuzzaman, M., Fared, M. M., & Moon, W. C. (2021). High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using infoworks icm. *Sustainability (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/su131810259>
- Silva, D. F., Simonovic, S. P., Schardong, A., & Goldenfum, J. A. (2021). Introducing non-stationarity into the development of intensity-duration-frequency curves under a changing climate. *Water (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/w13081008>
- Sobota, M., Burszta-Adamiak, E., & Kowalczyk, T. (2022). Legislative opportunities and barriers in stormwater management in urban areas in Poland. *Journal of Water and Land Development*, 2022, 130–138. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.143728>
- Sołtys, P., & Stec, A. (2014). Hydrodynamic model of storm drainage system. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, XXXI(61 (3/I/14)), 285–311. <https://doi.org/10.7862/rb.2014.62>
- Szruba, M. (2020). Odwodnienie i zagospodarowanie wód opadowych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 40–46.
- The Flood Hub. (2018). *An Introduction to Sustainable Drainage Systems (SuDS)*. <https://thefloodhub.co.uk/wp-content/uploads/2018/09/FT-Q-R121-An-Introduction-to-Sustainable-Drainage-Systems-SuDS.pdf>
- US EPA. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division*.
- Wang, J., Liu, J., Wang, H., & Mei, C. (2020). Approaches to multi-objective optimization and assessment of green infrastructure and their multi-functional effectiveness: A review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 12, Number 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w12102714>
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G., & Roberts, N. M. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522–555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014RG000464>

- Wilbers, G. J., de Bruin, K., Seifert-Dähnn, I., Lekkerkerk, W., Li, H., & Budding-Polo Ballinas, M. (2022). Investing in Urban Blue–Green Infrastructure—Assessing the Costs and Benefits of Stormwater Management in a Peri-Urban Catchment in Oslo, Norway. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031934>
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., & Nguyen, V. T. V. (2012). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 103, 106–118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.003>
- Williams, J. B., Jose, R., Moobela, C., Hutchinson, D. J., Wise, R., & Gaterell, M. (2019). Residents’ perceptions of sustainable drainage systems as highly functional blue green infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103610>
- Wong, T. H. F., & Brown, R. R. (2009). The water sensitive city: principles for practice. *Water Science and Technology*, 60(3), 673–682. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.436>
- Xue, Z., Hou, G., Zhang, Z., Lyu, X., Jiang, M., Zou, Y., Shen, X., Wang, J., & Liu, X. (2019). Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data: Case study of cities of Northeast China. *Landscape and Urban Planning*, 182, 92–100. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2018.10.015>
- Zhou, T. (2021). New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us? *The Innovation*, 2(4), 100173. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100173>