

# Efekty wynikające ze zwiększania pojemności zbiornika gromadzącego wodę deszczową na obszarze Polski o średniej wysokości opadów

Effects of increasing the volume of a rainwater storage tank on the territory of Poland with average rainfall

AGNIESZKA LUDWIŃSKA, EDYTA DUDKIEWICZ

DOI 10.36119/15.2024.4.5

W przypadku wykorzystywania wody deszczowej na cele domowo-ogrodowe w budynku jednorodzinnym pojemność zbiornika wody deszczowej, w zależności od wybranej metody obliczeniowej, może wynosić od 5000 l do 15000 l. Trzykrotna różnica wymaga rozważenia korzyści i skutków wynikających z zastosowania zbiorników o poszczególnych pojemnościach. W artykule przeanalizowano pracę jedenastu zbiorników magazynujących wodę deszczową o różnych pojemnościach uwzględniając rozkład opadów oraz sześć profili dynamiki rozbioru wody deszczowej w budynku jednorodzinnym. Kluczowym aspektem było uwzględnienie podlewania trawnika lub jego brak. Innowacyjnym podejściem jest analiza w kroku godzinowym, która wykazała, że każde zwiększenie pojemności zbiornika o 1000 litrów pozwala na wzrost uzysku wody od 1 do 5%. Procentowy udział odzyskanej wody deszczowej w całkowitym zapotrzebowaniu na wodę deszczową na cele domowo-ogrodowe rośnie od 66% do 83%. Zapotrzebowanie wody deszczowej tylko na pranie i spłukiwanie toalet można w pełni pokryć stosując zbiornik o pojemności 6000 l.

*Słowa kluczowe: zagospodarowanie wody deszczowej, budynek jednorodzinny, godzinowy rozkład opadów, profil rozbioru wody deszczowej, opady we Wrocławiu*

In the case of the use of rainwater for domestic and gardening purposes in a single-family house, the capacity of rainwater, depending on the chosen calculation method, can be range from 5,000 l to 15,000 l. The threefold difference requires consideration of the benefits and effects of using tanks with different capacities. The paper analyses the performance of eleven rainwater storage tanks with different capacities depending on rainfall distribution and six profiles of rainwater distribution dynamics in a single-family house. The key is the inclusion of lawn watering or its absence. An innovative approach is the hourly step analysis, which showed that each 1,000 litre increase in tank capacity allows for an increase in water yield of 1 to 5%. The percentage of recovered rainwater in the total rainwater demand for the domestic and gardening purposes increases from 66% to 83%. Rainwater demand only for washing and toilet flushing can be fully covered by using a tank with a capacity of 6,000 l.

*Keywords: rainwater harvesting, single-family building, hourly rainfall distribution, rainwater distribution profile, precipitation in Wrocław*

## Wstęp

W kontekście ograniczonych zasobów wody, gdy wiadome jest, że Polska na tle Europy zalicza się do krajów o stosunkowo niewielkich jej zasobach [18,26], systemy ograniczające zużycie wody do picia jawią się jako pożądane rozwiązania. Woda deszczowa ma ogromny potencjał, który można w pełni wykorzystać dzięki wprowadzeniu innowacyjnych rozwiązań. Uznaje się obecnie, że rozważne podejście do gospodarki wodami opadowymi w miastach jest także skutecznym środkiem

przeciwdziałania zmianom klimatycznym i postępującej urbanizacji [9]. Magazynowanie wody i ciepła jest niezbędne do rozwoju miast w ramach zasad zrównoważonego rozwoju [25]. Proponowane są rozwiązania zagospodarowania wody deszczowej w skali makro, obejmujące osiedla, obszary zakładów produkcyjnych i obiektów sportowych oraz działania na mniejszą skalę, które można zastosować bezpośrednio w przestrzeni domu jednorodzinnego [20,21]. Przykłady rozwiązań technicznych proponowane są w Katalogu dobrych praktyk [12]. Infrastruktura obejmie

rozwiązania zarówno do powierzchniowego przejęcia wód opadowych (nawierzchnie przepuszczalne, zbiorniki infiltracyjne, muldy retencyjne, zielone dachy, ogrody deszczowe), jak i do podziemnego przejęcia wód opadowych (komory drenażowe, skrzynki retencyjno-rozsączające, retencyjne zbiorniki podziemne oraz studnie chłonne). Niewielkie, lecz skuteczne projekty, takie jak ogrody deszczowe, pojemniki na deszczówkę, zielone dachy czy zastąpienie uszczelnionych nawierzchni powierzchniami przepuszczalnymi, mogą przyczynić się do zwiększenia odporności

dr inż. Agnieszka Ludwińska <https://orcid.org/0000-0002-1455-9580>; dr hab. inż. Edyta Dudkiewicz, prof. PWR <https://orcid.org/0000-0002-6276-5290> edyta.dudkiewicz@pwr.edu.pl – Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wrocław. Adres do korespondencji/Corresponding Author: agnieszka.ludwinska@pwr.edu.pl

miast na powodzie [22]. Działając na poziomie lokalnym, można ograniczyć ryzyko powodziowe na danym obszarze, zmniejszyć ilość zanieczyszczeń odprowadzanych do wód, poprawić mikroklimat oraz wzbogacić przestrzeń miejską, tworząc bardziej przyjazne otoczenie dla mieszkańców. Warto podkreślić, że efekty tych niewielkich, mniej kosztownych inwestycji mogą być znaczące i sumarycznie mogą znacząco wpłynąć na jakość życia w całym mieście i na ochronę zasobów wody słodkiej.

Generalnie w literaturze powszechnie są analizy pracy zbiornika gromadzącego wodę deszczową, w których model obliczeniowy podaje różnicę sumarycznej wartości dziennego opadu i całodniowego zapotrzebowania na wodę deszczową [2, 19, 20, 23, 24]. Jednak taki bilans w mniejszym stopniu odzwierciedla rzeczywiste sytuacje, w których:

- 1) dochodzi do przelania wody ze zbiornika na skutek wystąpienia opadu zanim nastąpi zapotrzebowanie na wodę deszczową w budynku lub
- 2) zupełnie odwrotnie tj. zapotrzebowanie na wodę deszczową jest wcześniej niż pojawi się opad atmosferyczny.

Te różnice w czasie wystąpienia zapotrzebowania na wodę i opadów nie wykazują konieczności napełnienia zbiornika wodą wodociągową, gdy bilans dobowy pokazuje równe wartości. Nie uwzględnia również nagłych, intensywnych opadów deszczu, które są niekorzystne dla pracy instalacji dualnej, gdyż np. zbiornik nie będzie mógł zmagazynować wody opadowej bez konieczności jej przelewania. Ma to szczególne znaczenie w budynkach jednorodzinnych z instalacją wody deszczowej wykorzystywaną do podlewania ogrodu, której zapotrzebowanie jest znacznie wyższe niż na cele domowe, tj. do napełnienia zbiorników miski ustępowej czy uruchomienia pralki. Dlatego stworzono algorytm, w którym bilansowano w kroku godzinowym zapotrzebowanie i uzysk wody deszczowej. Przeprowadzanie różnych analiz w kroku godzinowym jest uznawane metodą bilansowania [1].

Celem artykułu jest ocena efektywności pracy systemu zagospodarowania wody deszczowej na cele domowo-ogrodowe w oparciu o dane meteorologiczne godzinowych wysokości opadów we Wrocławiu. Analiza działania systemu obejmuje zaimplementowanie: godzinowych rozkładów opadów atmosferycznych w przypadku roku o przeciętnej sumie opadów, sześciu profili dobowego rozbiórki wody deszczowej, w których kluczowe jest uwzględnienie podlewania

trawnika lub jego brak i zbiorników gromadzących wodę opadową o jedenastu różnych pojemnościach.

## Charakterystyka opadów we Wrocławiu

Opady deszczu powstają w wyniku interakcji różnych czynników pogodowych w atmosferze. Jest to zjawisko losowe, charakteryzujące się znaczną zmiennością w czasie i przestrzeni przez co modelowanie opadów jest zadaniem bardzo trudnym, choć pożądanym w celu prawidłowego wymiarowania, projektowania oraz przy budowie nowych i modernizacji istniejących sieci kanalizacji ogólnospławnej i deszczowej, a także modernizacji i rozbudowie istniejącej infrastruktury retencjonowania, odprowadzania i gromadzenia wód opadowych i roztopowych [10].

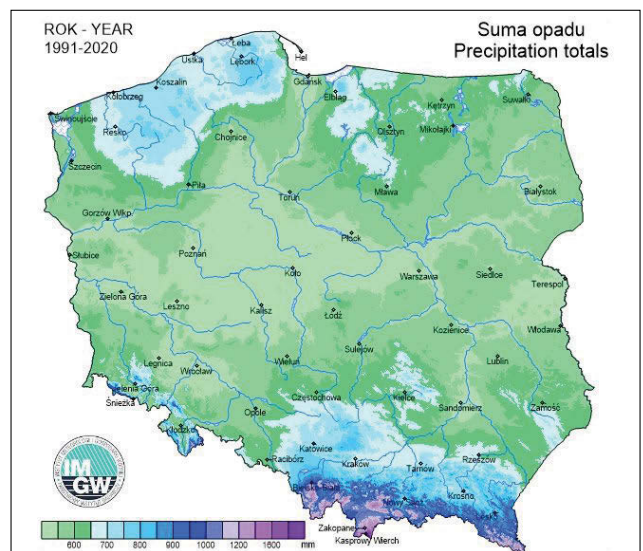
W Polsce w latach 1952–2023 występowały zarówno lata suche, w których wartości opadów mieściły się w przedziale od 50 do 74% wartości normalnych i skrajnie mokre, w których wartości opadów osiągały 126 i 150% wartości typowych [8, 14]. Średnia roczna suma opadów w Polsce wynikająca z okresu 1991–2020 wynosi 628 mm [14]. Ilość opadów zależy w dużej mierze od ukształtowania terenu i wysokości nad poziomem morza. Na nizinach roczne opady wynoszą 500–600 mm, a najniższa wysokość opadów notowana jest we wschodniej Wielkopolsce, na Kujawach i w północno-zachodniej części Mazowsza. Roczne opady w tych regionach nie przekraczają 500 mm. Pojezierza Mazurskie i Pomorskie charakteryzują roczne opady w wysokości 600–700 mm. Wyższe wartości do 800 mm obserwuje się na wyżynach. Północna i zachodnia część Kotliny Sandomierskiej, ze względu na swoje położenie

w okolicy Gór Świętokrzyskich, charakteryzuje się roczną sumą opadów rzędu 500–600 mm. Najwyższe roczne sumy opadów notuje się w górach, gdzie przekraczają 1200–1500 mm, przy czym na Kasprowym Wierchu suma rocznych opadów przekracza 1762 mm. Na rys. 1 przedstawiono mapę wizualizującą sumy opadów w Polsce w 30-letnim okresie normalnym 1991–2020 [14].

Wrocław należy do grupy miast charakteryzujących się ilością deszczu nieco poniżej przeciętnej krajowej. Analizowane dane w okresie ostatnich 50 lat ze stacji meteorologicznych w Polsce również wykazują w przypadku Wrocławia istotne statystycznie tendencje spadkowe sumy dwudziestodniowych opadów [4]. Uzyskane z IMGW dane meteorologiczne sumarycznego opadu pozwoliły określić, że średnio opady atmosferyczne występują w ciągu 167 dni w roku, a ich średnia wartość roczna w latach 1901–2000 wynosiła 583 mm, zaś w latach 2000–2019 541,2 mm [6]. W ostatnim przedziale czasowym, w 2015 r. średnia roczna suma opadów była najniższa i wyniosła 388,3 mm, a rok 2009 z największą sumą opadów scharakteryzował się wartością równą 723,5 mm. Zaś rok 2005 wykazał średni opad dla danego okresu, przy czym dni z opadem deszczu w ciągu roku było 154, a maksymalny opad dzienny wynosił 32,2 mm/d. Zatem roczny uzysk wody w roku z najwyższą sumą opadów jest niemal dwukrotnie wyższy niż w roku charakteryzującym się najniższą sumą opadów, co pokazuje jak dużym wyzwaniem jest dla projektantów optymalizacja systemu dualnego.

Wskaźniki klimatologiczne dla stacji synoptycznych w Polsce publikowane są na stronie IMGW od wielu lat, a od 2008 r. w przypadku wielu stacji dostępne są dane pozyskane w kroku godzinowym

**Rys. 1.** Średnia roczna suma opadów w Polsce z okresu 1991–2020 [14]  
**Fig. 1.** Average annual precipitation in Poland from 1991–2020 [14]



[14]. W przypadku Wrocławia, jak udało się dowiedzieć autorkom, dane gromadzone w kroku godzinowym są do pobrania na cele publikacyjne od roku 2019.

## Cechy rozwiązania ze zbiornikiem podziemnym

Przykładowe rozwiązanie dla budynków jednorodzinnych obejmuje wykorzystanie retencyjnego zbiornika podziemnego, którego zadaniem jest gromadzenie wody opadowej z dachów, balkonów, tarasów lub innych powierzchni o niskim stopniu zanieczyszczenia. W zależności od sposobu wykorzystania wody deszczowej na terenie nieruchomości istnieją trzy rozwiązania:

- ogrodowe – umożliwiające wykorzystanie wody deszczowej do nawadniania terenów zielonych w sezonie wegetacyjnym roślin oraz do prac porządkowych lub mycia samochodów,
- domowe (wewnętrzne) – umożliwiające wykorzystanie wody deszczowej do spłukiwania toalet, pisuarów oraz do prania i prac porządkowych,
- domowo-ogrodowe, będące połączeniem powyższych systemów.

Dostępne na rynku zbiorniki na gromadzoną wodę deszczową mogą być zastosowane do montażu na zewnątrz budynku w przypadku wykorzystania wody deszczowej do nawadniania zieleni, a także wewnątrz budynku np. na najniższej kondygnacji (zwykle w piwnicy). W przypadku systemu domowo-ogrodowego, eksploatowanego przez cały rok, stosowane są zarówno zbiorniki umieszczane wewnątrz budynków jak i zbiorniki podziemne. W tym ostatnim przypadku istotne jest uwzględnienie panujących warunków gruntowych, tj. maksymalnego poziomu wód gruntowych i rodzaju gleby, głębokości przymarzania gruntu oraz potencjalnego obciążenia terenu ze względu na ruch pieszy i kołowy. Bezwzględnie muszą być przestrzegane wytyczne montażowe producenta dotyczące maksymalnego zasięgu i odległości od innych obiektów, takich jak budynki, drogi i nasypy. Zbiorniki są wykonywane z różnych materiałów, tj. tworzywa sztucznego – polietylen i polipropylen, betonu, stali odpornej na korozję i żywicy poliestrowej wzmocnionej włóknem szklanym. Cechują się różnymi kształtami – zazwyczaj w formie cylindrów lub prostokątów, zaś do montażu naziemnego mogą mieć formę elementu dekoracyjnego. Pojemność zbiornika podziemnego może wynosić od około 1500 l do 70000 l, a nawet więcej, dając możliwość wykorzystania ich w przypadku budynków o małej jak

i bardzo dużej liczbie osób. Prawidłowe określenie pojemności zbiornika jest najistotniejszym aspektem dla efektywnego i ekonomicznie racjonalnego działania całego systemu, przy czym zwiększanie pojemności zbiornika niesie wysokie koszty inwestycyjne, które dodatkowo istotnie zależą od materiału z jakiego wykonany jest zbiornik, a opłacalność całej inwestycji od ceny wody w danym obszarze Polski [7].

Obecnie w Polsce uregulowania prawne, które określałyby zasady projektowania i użytkowania systemów zagospodarowania wód opadowych w głównej mierze bazują na niemieckiej normie DIN 1989-1:2002-04 [5] lub brytyjskiej BS 8515:2009 [3]. Dostępne są również wytyczne, nomogramy i kalkulatory do doboru pojemności zbiorników wody deszczowej [13]. Niektórzy producenci podają własne instrukcje do określania pojemności zbiorników [16,17]. Można ogólnie powiedzieć, że większość dostępnych metod bazuje na podobnych zasadach obliczeniowych, tzn. obliczane są: uzysk wody deszczowej uzależniony od pola powierzchni odwadnianej, współczynnik spływu dachu, sprawność filtra,

średni roczny opad deszczu, a wyniki są porównywane z zapotrzebowaniem na wodę deszczową.

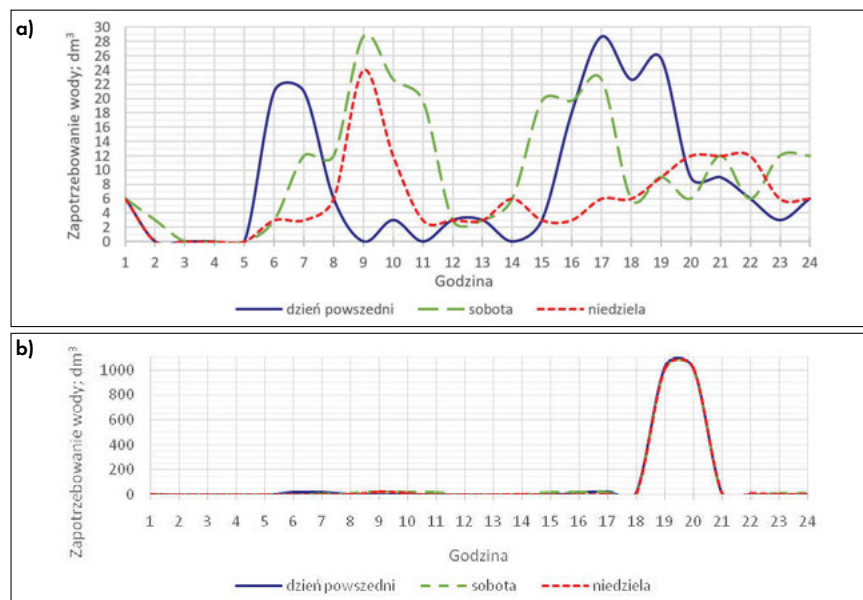
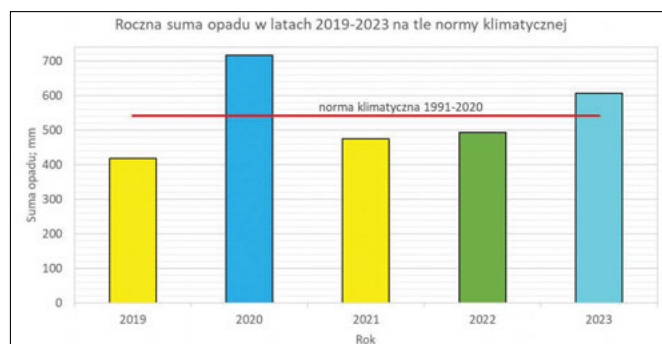
## Metodyka

### Opis algorytmu

Na potrzeby analizy rozpatrzono dane uzyskane z IMGW dotyczące sumy rocznych opadów w latach 2019-2023. Na rys. 2, wykorzystując skalę klasyfikacji opadów według Kaczorowskiej [14], pokazano roczną sumę opadów dla tego okresu i do dalszej analizy zdecydowano się przyjąć rok 2022, który pod kątem wysokości opadu zaliczany jest jako rok normowy, z rocznym opadem równym 492,8 mm, co stanowi 91% średniej wartości rocznej z 30-letniego okresu normalnego 1991-2020 oznaczonej na rys. 2 linią w kolorze czerwonym.

Przyjmując założenie różnego rozkładu zużycia wody w budynku mieszkalnym w dni robocze, soboty i niedziele/święta, utworzono trzy modele godzinowego rozbioru wody deszczowej wykorzystywanej do spłukiwania miski ustępowej i pralki, które pokazano na rys. 3a. Uwzględniono

Rys. 2. Sumy rocznych opadów we Wrocławiu w latach 2019-2023  
Fig. 2. Average annual precipitation in Wrocław from 2019-2023



Rys. 3. Profile zapotrzebowania wody deszczowej na cele: a) domowe b) domowo-ogrodowe  
Fig. 3. Profiles of rainwater demand for purposes: a) domestic b) domestic and gardening



różne godziny korzystania z tych urządzeń w poszczególne trzy dni. Przyjęto dzienne zapotrzebowanie na wodę deszczową w ilości: 24 dm<sup>3</sup>/os · d na splukiwanie miski ustępowej (za [5]) oraz 50 dm<sup>3</sup>/cykl na potrzeby prania odzieży, przyjmując 7 cykli prania w tygodniu. Profile zostały rozbudowane przez wprowadzenie zapotrzebowania na cele ogrodowe tj. podlewania zieleni. Nawadnianie terenów zielonych przyjęto w okresie od kwietnia do końca września, w godzinach między 19:00 a 21:00 jako czas pracy poszczególnych sekcji zraszaczy, dwa/trzy razy w tygodniu w zależności od opadów, tzn. przy braku opadów przez dwa kolejne dni. Profile rozbiórów wody dla trzech dni uwzględniających podlewanie pokazano na rys. 3b. Wybrano wieczorną porę ze względu na zmniejszone zapotrzebowanie wody deszczowej w godzinach nocnych i potencjalne możliwe uzupełnienie zbiornika wodami opadowymi. Należy zauważyć, że zaplanowanie podlewania w godzinach wczesno porannych może wpłynąć na wyniki analizy. Powierzchnia nawadnianych terenów zielonych wynosi 500 m<sup>2</sup>, a średnie zapotrzebowanie wody deszczowej na to zadanie ustalono na poziomie 4 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Roczne zapotrzebowanie na wodę deszczową, obliczone na podstawie powyższych założeń, wynosi łącznie 174760 dm<sup>3</sup> w przypadku nawadniania terenów zielonych, natomiast w przypadku wykorzystania wody deszczowej wyłącznie do splukiwania misek ustępowych i prania wartość wynosi 70760 dm<sup>3</sup>. Rozkład zapotrzebowania na poszczególne cele zaprezentowano na rys. 4.

Dane pozyskane z IMGW zawierają informacje o ilości opadu w mm dla każdej godziny w roku. W pierwszym kroku w pro-

jako sumę opadów w danej godzinie i ilości wody w zbiorniku. Niedobór wody stanowił różnicę wartości ilości wody wynikających z zapotrzebowania i zagospodarowania. Napełnienie wynikało z testu logicznego w odniesieniu do pojemności danego zbiornika i dopływającej wody. Przelew stanowił różnicę wartości dopływu i napełnienia.

### Charakterystyka analizowanego obiektu

Przyjęty do analizy budynek mieszkalny jednorodzinny o powierzchni użytkowej 656 m<sup>2</sup>, zlokalizowany jest w województwie dolnośląskim, we Wrocławiu. Miasto znajduje się w I strefie przymarzania gruntu. Działka budowlana ma powierzchnię 1700 m<sup>2</sup>, na której znajduje się parking zewnętrzny, wjazd do parkingu podziemnego, taras i tereny zielone. Budynek posiada 3 kondygnacje: piwnicę, parter oraz piętro i jest zamieszkiwany przez 6 osób. Rozważane rozwiązanie obejmuje wykończenie retencyjnego zbiornika podziemnego, którego zadaniem jest gromadzenie wody opadowej z dachów i tarasu o łącznej powierzchni 294 m<sup>2</sup>.

### Zbiorniki wody deszczowej w analizie

W przypadku analizowanego budynku mieszkalnego pojemność zbiornika wody deszczowej w zależności od wybranej metody obliczeniowej [3,5,13,16,17], może wynosić od 5000 l do 15000 l. Trzykrotna różnica w pojemności zbiorników w przypadku tak małego obiektu budowlanego może budzić obawy co do poprawności niektórych metod, korzyści i skutków wynikających z zastosowania zbiornika o danej pojemności. Ponieważ koszty inwestycyjne zależą głównie od

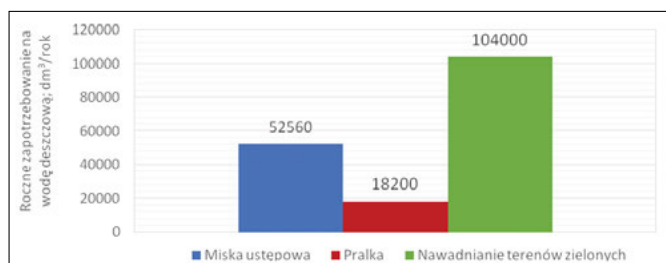
pojemności dobranego magazynu wody deszczowej, to taka rozbieżność może nie tylko wpłynąć na pracę instalacji, ale także na końcową opłacalność inwestycji [7]. Analiza bilansu wody deszczowej w kroku godzinowym pozwala dokładniej omówić niektóre z tych kwestii. Do dalszej analizy przyjęto zastosowanie zbiorników o pojemnościach dostępnych na rynku sprzedaży, tj.: 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000, 11000, 12000, 13000, 14000, 15000 litrów.

### Wyniki analizy i dyskusja

W wyniku opadu następuje doprowadzenie wody opadowej do zbiornika i jego wypełnienie. Zbiorniki o określonych pojemnościach wypełnią się w 100%, a przekroczenie pojemności powoduje zrzut wód opadowych poza instalację. Niedobór wody opadowej potrzebnej w instalacji uzupełniany musi być wodą wodociągową. Zbiorniki o zbyt dużej pojemności generują wyższe koszty inwestycyjne i sytuacje sprzyjające pogorszeniu się jakości magazynowanej wody deszczowej. Zaś zbyt mała pojemność zbiornika będzie przyczyniać się do nieefektywnego działania układu, uniemożliwiając magazynowanie odpowiedniego zapasu wody na okres dni bez deszczu, a w przypadku dłuższych lub obfitych opadów brak możliwości zatrzymania wody opadowej w zbiorniku, przelewanie i stratę zasobów. Z punktu oceny cyklu życia zbiorniki wykonane z różnych materiałów stają się w przyszłości odpadem wymagającym właściwej utylizacji [11].

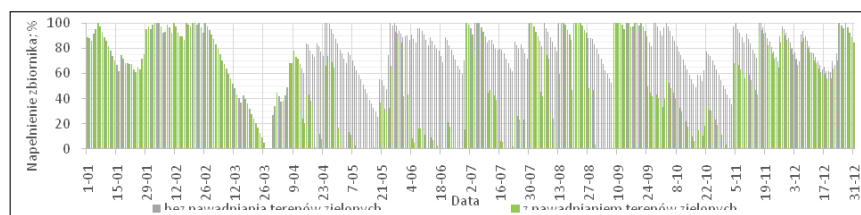
Wyniki symulacji pracy instalacji dualnej pokazano na wykresach obrazujących pracę zbiorników w ciągu roku oraz tabelarycznie zestawiając wartości godzinowe i roczne.

Na rysunkach od 5 do 15 pokazano dla każdej godziny wykresy procentowego napełnienia poszczególnych zbiorników wodą deszczową w przeciągu całego roku, stworzone z uwzględnieniem profili godzinowych rozkładów opadów deszczu i dynamiki rozbioru wody deszczowej. Dwa nałożone wykresy pozwalają zauważyć wpływ podlewania zieleni

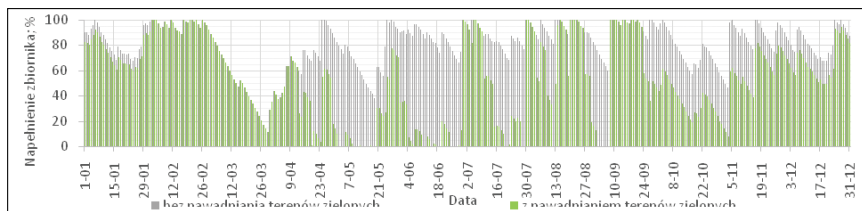


Rys. 4. Roczne zapotrzebowanie na wodę deszczową na poszczególne potrzeby  
Fig. 4. Annual rainwater demand for individual needs

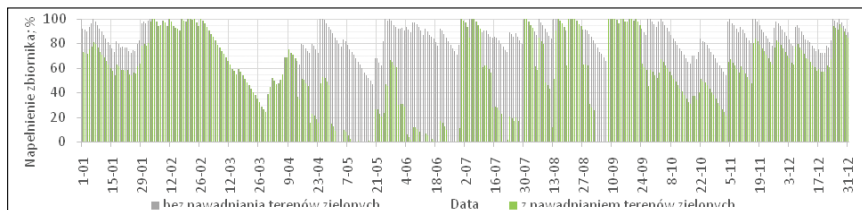
gramie Excel dla każdego dnia w roku i każdej godziny wprowadzono wysokość opadu. Iloczyn wartości godzinowego opadu oraz powierzchni zlewni pozwolił wyznaczyć uzysk wody w ciągu jednej godziny. Zapotrzebowanie na wodę deszczową w budynku w każdej godzinie wynikało z wprowadzonego harmonogramu rozbioru wody (rys. 3). Następnie wyznaczono ilość wody do zagospodarowania



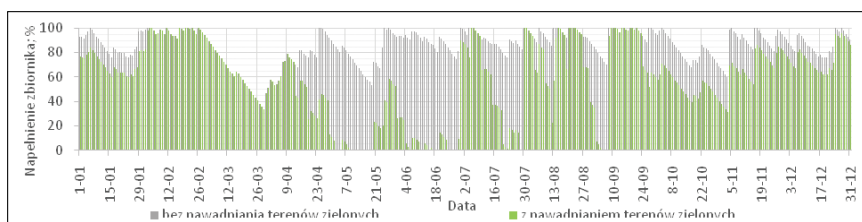
Rys. 5. Procentowy wykres napełnienia zbiornika 5000 l  
Fig. 5. Percentage fill chart for a 5000-liter tank



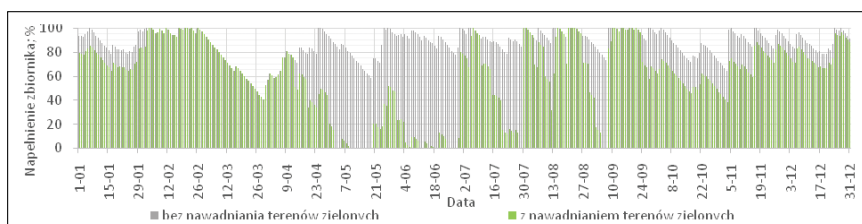
Rys. 6.  
Procentowy wykres napełnienia zbiornika 6000 l  
Fig. 6. Percentage fill chart for a 6000-liter tank



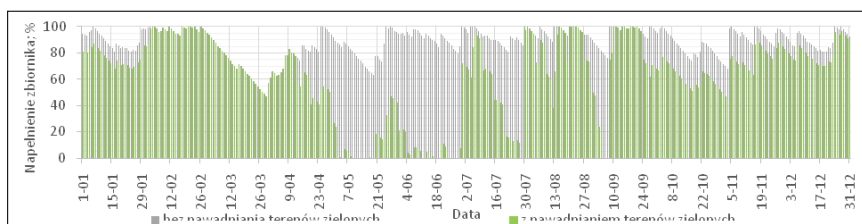
Rys. 7.  
Procentowy wykres napełnienia zbiornika 7000 l  
Fig. 7. Percentage fill chart for a 7000-liter tank



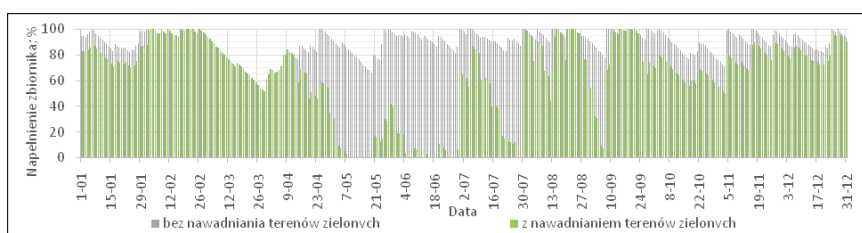
Rys. 8.  
Procentowy wykres napełnienia zbiornika 8000 l  
Fig. 8. Percentage fill chart for a 8000-liter tank



Rys. 9.  
Procentowy wykres napełnienia zbiornika 9000 l  
Fig. 9. Percentage fill chart for a 9000-liter tank



Rys. 10.  
Procentowy wykres napełnienia zbiornika 10000 l  
Fig. 10. Percentage fill chart for a 10000-liter tank

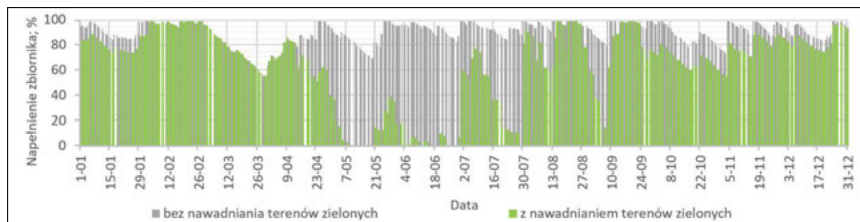


Rys. 11.  
Procentowy wykres napełnienia zbiornika 11000 l  
Fig. 11. Percentage fill chart for a 11000-liter tank

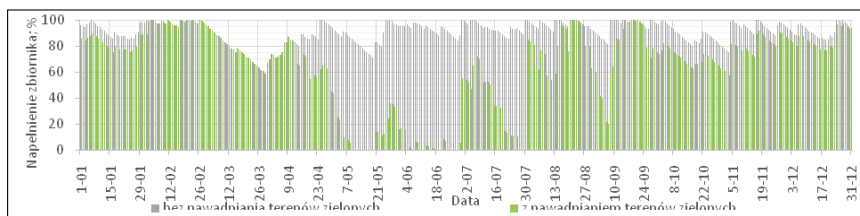
(wykres zielony) na pracę zbiornika. Można zauważyć efekty wynikające ze znacznej nierównomierności występowania opadów i ich intensywności w poszczególnych dobach i sezonach roku; widoczne są przedwiosenne i późnojesienne okresy zwiększonego uzysku wody i napełnienie zbiorników na różnym poziomie.

W przypadku analizy pracy zbiornika z uwzględnieniem podlewania można zaobserwować, że nawet zbiornik o największej pojemności (15000 l) nie pozwala na zgromadzenie takiej ilości wody, aby pokryć w pełni zapotrzebowanie na wodę deszczową. Dla porównania na rys. 16 pokazano niedobory wody deszczowej w przypadku trzech zbiorników o pojemności 5000 l (ciągła szara linia), 10000 l (przerywana szara linia) i 15000 l (przerywana czarna linia). Kolorem niebieskim zaznaczono uzysk wody deszczowej. W maju, czerwcu, lipcu i wrześniu ze względu na suche okresy występowały sytuacje wymagające uzupełnienia instalacji wodą przeznaczoną do spożycia przez ludzi. Przykładowo 15 dniowy okres bez opadów w maju i konieczność podlewania zieleni zmusiły do uzupełniania instalacji wodą wodociągową.

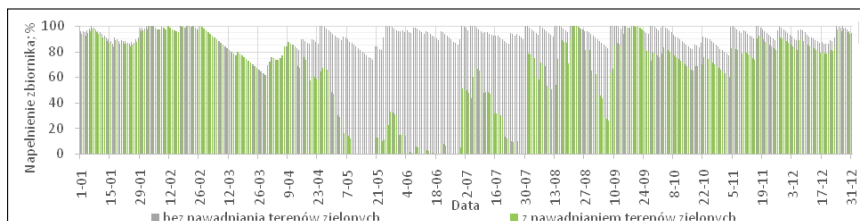
Analiza rysunków 5 – 15 pokazuje, że nie można było również uniknąć sytuacji, w której opad nie zostaje zmagazynowany. Na rys. 17 pokazano wartości ilości wody odprowadzanej poza instalację w przypadku trzech zbiorników. Jak można było się spodziewać, w przypadku najmniejszego zbiornika sytuacje, gdy niewykorzystana woda deszczowa była kierowana do przelewu występowały częściej niż gdy zaimplementowano zbiorniki o większej pojemności, ale zbiornik o pojemności 15000 l nie był również w stanie zapewnić pełnego przejścia wody. Pomimo znacznej pojemności zbiornika, obserwowano przypadki, gdy nadmiar wód musiał zostać odprowadzony poza instalację. Wynika to z rozkładu opadów i sezonowego podlewania, gdyż sezon objęty podlewaniem terenów zielonych charakteryzował się okresami z wysokim stopniem napełnienia zbiornika w okresie wczesnowiosennym oraz w cieplejsze dni w zimie, kiedy występuje zjawisko topnienia zgromadzonego na dachu śniegu [23], bądź intensywnymi opadami pod koniec lata. We wrześniu intensywny opad w wysokości 21,9 mm spowodował wygenerowanie blisko 6500 l wody deszczowej do zagospodarowania w ciągu godziny. Taka sytuacja meteorologiczna sprawiła, że żaden racjonalny sposób magazynowania nie daje możliwości zmagazynowania dostępnych zasobów wody.



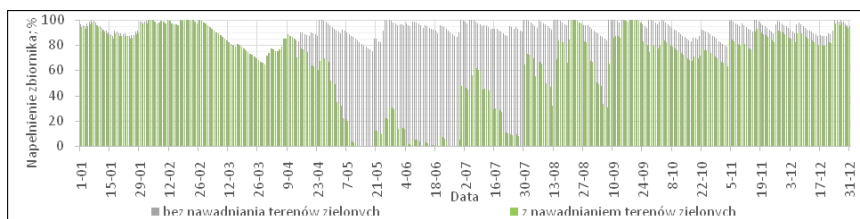
**Rys. 12.**  
**Procentowy wykres napętnienia zbiornika 12000 l**  
**Fig. 12. Percentage fill chart for a 12000-liter tank**



**Rys. 13.**  
**Procentowy wykres napętnienia zbiornika 13000 l**  
**Fig. 13. Percentage fill chart for a 13000-liter tank**



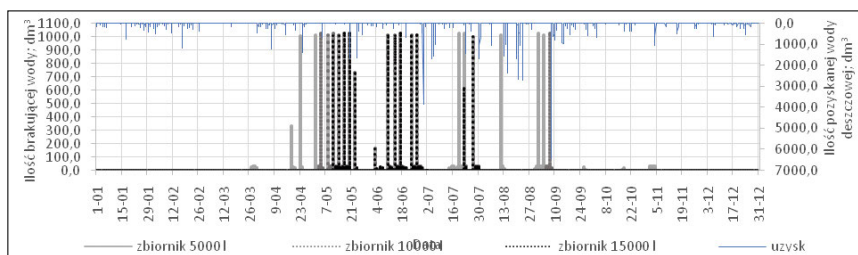
**Rys. 14.**  
**Procentowy wykres napętnienia zbiornika 14000 l**  
**Fig. 14. Percentage fill chart for a 14000-liter tank**



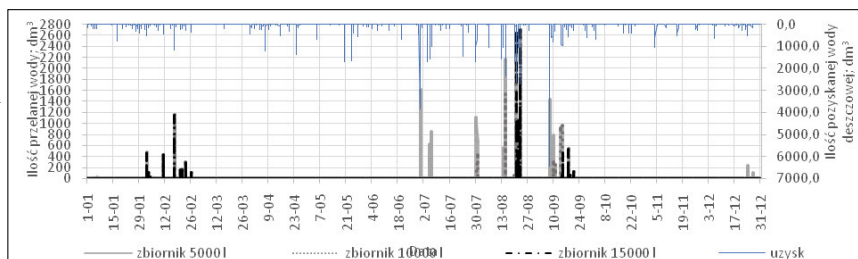
**Rys. 15.**  
**Procentowy wykres napętnienia zbiornika 15000 l**  
**Fig. 15. Percentage fill chart for a 15000-liter tank**

Nawadnianie terenów zielonych stanowi największy udział wykorzystania wody deszczowej i jest istotnym czynnikiem wpływającym na działanie systemu zagospodarowania wody deszczowej. Rezygnacja z nawadniania znacznie zmienia sposób wymiarowania całej instalacji i pozwala określić wielkość retencji optymalnie ze względu na nieznaczne wahania w ciągu roku w profilach rozbioru. Tak więc w przypadku analizy efektywności pracy zbiorników w instalacji bez podlewania można zaobserwować na rys. 5-15 niewielkie różnice w rozkładach napełnienia zbiorników. Duża powierzchnia do pozy-

**Rys. 17.**  
**Ilość przelanej i uzysk wody deszczowej w przypadku nawadniania i zbiorników o pojemnościach 5000 l, 10000 l i 15000 l**  
**Fig. 17. The amount of overflowed and yield of rainwater for irrigation and tanks with capacities of 5000 l, 10000 l and 15000 l**



**Rys. 16.**  
**Ilość brakującej (kolor szary) i uzysk (kolor niebieski) wody deszczowej w przypadku nawadniania i zbiorników o pojemnościach 5000 l, 10000 l i 15000 l**  
**Fig. 16. The amount of missing (grey colour) and yield (blue colour) of rainwater for irrigation and tanks with capacities of 5000 l, 10000 l and 15000 l**



skiwania wody deszczowej generuje taką ilość wody retencionowanej, która zapewni bilansowanie uzysku i zapotrzebowania we wszystkich przypadkach poza układem ze zbiornikiem o pojemności 5000 l (rys. 5). Analiza godzinowego rozkładu opadów deszczu i profili rozbioru wody deszczowej w poszczególne dni tygodnia okazała się szczególnie użyteczna do optymalizowania wielkości zbiornika wody deszczowej. Jak wynika z przedstawionych danych i rysunków dla danego budynku korzystny pod względem pełnego zapewnienia zasobu wody deszczowej jest zbiornik o pojemności 6000 l. Zwiększenie pojemności zbiornika nie przyniesie żadnych korzyści.

Szczegółowe wyniki symulacji opadów i rozbioru wody deszczowej w instalacjach z funkcją podlewania i bez podlewania terenów zielonych przedstawiono w tabeli 1, w której kolumny druga i trzecia odnoszą się do jednej godziny, kolumny od czwartej do dziewiątej do roku, a kolejno oznaczają:

- pierwsza, to pojemność zbiornika wody deszczowej [l],
- druga, to maksymalny uzysk wody w ciągu godziny, tj. sumaryczna ilość wody, która jest dostępna w zbiorniku wraz z ilością wody z opadu deszczu uzyskanego w przeciągu jednej godziny. Wartość wskazuje maksymalną ilość wody łącznie jaką użytkownik przy danej pojemności zbiornika ma do dyspozycji [dm<sup>3</sup>/h],
- trzecia oznacza zasób wody skierowany w ciągu jednej godziny do przelewu w wyniku pełnego wypełnienia zbiornika w czasie np. intensywnego opadu [dm<sup>3</sup>/h],



- czwarta, to ilość wody wykorzystana w skali roku, czyli odzysk wody deszczowej użytej na cele domowe i ogrodowe [dm<sup>3</sup>/rok],
- piąta wskazuje na średni poziom wody w zbiorniku w ciągu roku [%],
- szóstą wskazuje na ilość wody przelanej w ciągu roku [dm<sup>3</sup>/rok],
- siódma, to niedobór wody w skali roku, czyli wartość wskazująca na ilość wody pobranej z sieci wodociągowej [dm<sup>3</sup>/rok],
- ósma pokazuje ilość godzin w ciągu roku, gdy zbiornik pozostawał pusty [h/rok],
- dziewiąta, to ilość wystąpień braku wody deszczowej, czyli ilość sytuacji w przeciągu roku, gdy wystąpiła konieczność wykorzystania wody wodociągowej w przypadku pustego zbiornika. Każde zapotrzebowanie wody do spłukiwania toalety, prania czy nawadniania w przypadku braku wody deszczowej dodaje wartość +1 do wartości [15]. Wskaźnik ten jest szczególnie istotny w analizach godzinowego bilansu wody, gdyż pozwala przykładowo określić znaczenie czasu uruchomienia instalacji podlewania ogrodu.

Oceniając poziom wody w zbiorniku (tab. 1), można zauważyć, że średni poziom wzrasta wraz z pojemnością, bilansując ilość wody przelanej. W ciągu roku zbiorniki są wypełnione wodą od 49% do 64% bądź od 75% do 91% w zależności od funkcji instalacji odpowiednio z podlewaniem i bez podlewania.

Analiza braku wody pokazuje, że sytuacji, w których brakuje wody, jest mniej niż liczba godzin, gdy zbiornik jest pusty. Trzykrotne zwiększenie pojemności zbiornika spowodowało mniejsze o 567 występowanie sytuacji, w których wykorzystana jest woda do picia. Iloraz niedoboru wody i braku wody wskazuje, że średnio, w każdej sytuacji, gdy brakowało wody, istniała potrzeba uzupełnienia około 47-55 dm<sup>3</sup> wody deszczowej wodą wodociągową.

W celu określenia korzyści wynikających ze zwiększania pojemności zbiornika wody deszczowej sporządzono tabelę 2, w której porównano otrzymane wyniki dla 10 zbiorników o pojemności od 6000 l do 15000 l w odniesieniu do wyników otrzymanych w przypadku zbiornika o najmniejszej pojemności 5000 l. W tabeli 2 podano wzrost lub spadek poszczególnych wartości podanych w tabeli 1. Dodatkowo podano wzrost ceny zbiornika w kolumnie 10 i zobrazowano go na rys. 18.

Na rys. 18 pokazano również ilości wody odzyskanej, przelanej, niedoboru wraz ze wzrostem pojemności zbiornika w przypadku pracy instalacji z wykorzystaniem wody na cele domowo-ogrodowe. Z wykresu wynika, że każde zwiększenie

Tabela 1. Wyniki symulacji opadów i rozbiór wody deszczowej  
Table 1. Simulation results of rainfall and rainwater distribution

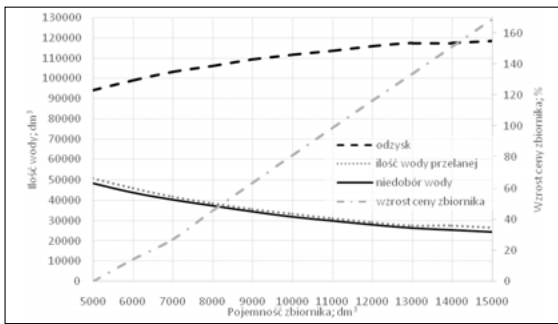
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pojemność zbiornika, l	Maksymalny uzysk, dm <sup>3</sup> /h	Maksymalny przelew, dm <sup>3</sup> /h	Odzysk wody, dm <sup>3</sup> /rok	Średnie napełnienie, %	Woda przelana, dm <sup>3</sup> /rok	Niedobór wody, dm <sup>3</sup> /rok	Pusty zbiornik, h/rok	Brak wody
<b>Z nawadnianiem terenów zielonych</b>								
5000	7705	2705	94022	49	50862	48588	1398	1043
6000	8705	2705	99022	50	45862	43759	1075	811
7000	9705	2705	103245	53	41638	40365	1024	772
8000	10705	2705	106245	55	38638	37365	897	674
9000	11705	2705	109245	58	35638	34365	876	657
10000	12705	2705	111703	60	33180	31907	833	625
11000	13705	2705	113703	61	31180	29907	733	553
12000	14705	2705	115703	62	29180	27907	731	551
13000	15705	2705	117352	63	27532	26258	693	527
14000	16705	2705	117362	64	27522	25258	692	526
15000	17705	2705	118352	64	26532	24258	621	476
<b>Bez nawadniania terenów zielonych</b>								
5000	8790	3787	70002	75	74882	608	83	62
6000	9790	3787	70610	78	74273	0	0	0
7000	10790	3787	70610	81	74273	0	0	0
8000	11790	3787	70610	84	74273	0	0	0
9000	12790	3787	70610	86	74273	0	0	0
10000	13790	3787	70610	87	74273	0	0	0
12000	15790	3787	70610	89	74273	0	0	0
13000	16790	3787	70610	90	74273	0	0	0
14000	17790	3787	70610	91	74273	0	0	0
15000	18790	3787	70610	91	74273	0	0	0

Tabela 2. Efekty wynikające ze zwiększania pojemności zbiornika wody deszczowej  
Table 2. Effects resulting from increasing the volume of the rainwater tank

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pojemność zbiornika dm <sup>3</sup>	Wzrost maksymalnego uzysku %	Spadek maksymalnego przelewu %	Wzrost ilości odzyskanej wody %	Wzrost średniego poziomu wody %	Spadek ilości wody przelanej %	Spadek niedoboru wody %	Spadek godzin pustego zbiornika %	Spadek braku wody %	Wzrost ceny %
<b>Z nawadnianiem terenów zielonych</b>									
5000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6000	13,0	0,0	5,3	1,3	9,8	9,9	23,1	22,2	14,3
7000	26,0	0,0	9,8	6,8	18,1	16,9	26,8	26,0	27,1
8000	38,9	0,0	13,0	12,6	24,0	23,1	35,8	35,4	45,8
9000	51,9	0,0	16,2	17,7	29,9	29,3	37,3	37,0	63,4
10000	64,9	0,0	18,8	21,4	34,8	34,3	40,4	40,1	81,0
11000	77,9	0,0	20,9	24,2	38,7	38,4	47,6	47,0	98,6
12000	90,9	0,0	23,1	25,7	42,6	42,6	47,7	47,2	116,2
13000	103,8	0,0	24,8	27,0	45,9	46,0	50,4	49,5	133,8
14000	116,8	0,0	24,8	29,6	45,9	48,0	50,5	49,6	151,3
15000	129,8	0,0	25,9	30,7	47,8	50,1	55,6	54,4	168,8
<b>Bez nawadniania terenów zielonych</b>									
5000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6000	11,4	0,0	0,9	4,6	0,8	100	100	100	14,3
7000	22,8	0,0	0,9	8,7	0,8	100	100	100	27,1
8000	34,1	0,0	0,9	11,8	0,8	100	100	100	45,8
9000	45,5	0,0	0,9	14,2	0,8	100	100	100	63,4
10000	56,9	0,0	0,9	16,1	0,8	100	100	100	81,0
11000	68,3	0,0	0,9	17,7	0,8	100	100	100	98,6
12000	79,6	0,0	0,9	19,0	0,8	100	100	100	116,2
13000	91,0	0,0	0,9	20,1	0,8	100	100	100	133,8
14000	102,4	0,0	0,9	21,1	0,8	100	100	100	151,3
15000	113,8	0,0	0,9	21,9	0,8	100	100	100	168,8

pojemności zbiornika o 1000 litrów pozwala na zwiększenie uzysku wody od 1 do 5 %, zwiększenie średniego rocznego poziomu wody w zbiorniku o około 8% oraz zmniejszenie ilości wody przelanej oraz pobranej z sieci wodociągowej o około 9 %. Przy czym wyraźnie widać, że

wzrost pojemności zbiornika powyżej 12000 l przynosi dużo mniejsze korzyści i odzysk wody nie jest tak istotny jak w przypadku zwiększenia pojemności zbiornika z 5000 l na 12000 l. Podobna zależność następuje w przypadku ilości wody przelanej i niedoboru wody, przy czym tu różnice



**Rys. 18.** Efekty wynikające ze zwiększenia pojemności wraz z procentowym wzrostem ceny zbiornika  
**Fig. 18.** The effects of increasing volume with the percentage increase in the price of the tank

są już mniejsze przy pojemności powyżej 10000 l. Procentowy udział odzyskanej wody deszczowej w całkowitym zapotrzebowaniu na wodę deszczową rośnie wraz ze wzrostem pojemności zbiornika i wynosi od 66% do 83%. Natomiast niedobór wody deszczowej maleje odpowiednio wraz ze wzrostem pojemności zbiornika i wynosi od 34% do 17% całkowitego zapotrzebowania na wodę.

Godzinowa analiza z wykorzystaniem profili rozbioru wody pozwoliła obliczyć roczne zapotrzebowanie na wodę deszczową. Dla analizowanego roku, ze względu na rozkład opadów, zapotrzebowanie na wodę deszczową jest mniejsze niż wynikające z obliczeń przy przyjętych założeniach (rozdz. 4.1 rys. 4); i tak bilans godzinowy wskazuje na zapotrzebowanie na wodę do podlewania, prania i spłukiwania toalet w ilości 142610 l/rok i jest to o 32150 l mniejsze zapotrzebowanie niż obliczone, a w przypadku prania i spłukiwania toalet zapotrzebowanie wyznaczone z bilansu godzinowego jest mniejsze o 150 l. Bilans wody odzyskanej i zapotrzebowania na wodę deszczową wykazuje, że w przypadku podlewania procentowy udział odzyskanej wody deszczowej w całkowitym zapotrzebowaniu na wodę deszczową wzrasta z 66% do 83% wraz ze wzrostem pojemności zbiornika.

## Podsumowanie

Koncepcja gromadzenia i wykorzystania wody deszczowej jest zgodna z ideą zrównoważonego rozwoju miast i stanowi istotny punkt w strategiach implementowanych w celu ograniczenia niedoborów wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

Procentowy udział odzyskanej wody deszczowej w całkowitym zapotrzebowaniu na wodę deszczową na cele domowo-ogrodowe wzrasta od 66% do 83% wraz ze wzrostem pojemności zbiornika. Wskazuje to na niewątpliwą korzyść samego rozwiązania w analizowanym przypadku budynku jednorodzinne i ogromny potencjał w ograniczeniu zużycia wody do picia na potrzeby, dla których jej zużycie wydaje się marnotrawstwem.

Analiza godzinowego rozkładu opadów deszczu i profili rozbioru wody deszczowej

w poszczególne dni tygodnia okazała się szczególnie użyteczna do optymalizowania wielkości zbiornika wody deszczowej w instalacji bez funkcji podlewania terenów zielonych. Dla danych warunków i założeń pozwoliła określić pojemność zbiornika na poziomie 6000 l jako maksymalną racjonalną wielkość. W przypadku podlewania pojemność zbiornika do 12000 l przynosi widoczne korzyści.

Każde zwiększenie pojemności zbiornika wody deszczowej o 1000 litrów pozwala na zwiększenie uzysku wody deszczowej i średniego rocznego poziomu wody w zbiorniku oraz spadek ilości wody przelanej i pobranej z sieci wodociągowej. Niewątpliwie jednak cena zbiornika rośnie w sposób nieproporcjonalny do korzyści wynikających z większego zasobu magazynowanej wody. Analiza godzinowa pozwoliła określić liczbowo wielkości charakteryzujące pracę zbiorników w ciągu roku.

## LITERATURA

- [1] Amanowicz Ł., Wojtkowiak J., Comparison of single-and multipipe earth-to-air heat exchangers in terms of energy gains and electricity consumption: A case study for the temperate climate of central Europe, *Energies*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14248217>.
- [2] Bator M., Piechurski F., Analiza kosztów systemu odzysku wody deszczowej dla budynku biurowego. Cost analysis of rainwater recovery system for an office building, *Instal*. 3 (2019).
- [3] BS 8515:2009 Rainwater harvesting systems – Code of practice,
- [4] Canales F.A., Gwoździej-Mazur J., Jadwiszczak P., Struk-Sokołowska J., Wartalska K., Wdowikowski M., Kaźmierczak B., Long-term trends in 20-day cumulative precipitation for residential rainwater harvesting in Poland, *Water (Switzerland)*. 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/w12071932>.
- [5] DIN 1989-1:2002-04 Regenwassernutzungsanlagen Teil 1: Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung,
- [6] Dubicki A., Dubicka M., Szymanowski M., *Klimat Wrocławia, Środowisko Wrocławia – Informator* (2002) 9–25.
- [7] Dudkiewicz E., Ludwińska A., Family Dwelling House Localization in Poland as a Factor Influencing the Economic Effect of Rainwater Harvesting System with Underground Tank, *Sustainability* 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151310687>.
- [8] Kaczorowska Z., *Opady w Polsce w przekroju wieloletnim*, Prace Geograficzne IG PAN (1962) 33.
- [9] Kordana S., Słyś D., Decision criteria for the development of stormwater management systems in Poland, *Resources*. 9 (2020). <https://doi.org/10.3390/resources9020020>.
- [10] Kordana-Obuch S., Starzec M., A New Method for Selecting the Geometry of Systems for Surface Infiltration of Stormwater with Retention, *Water (Switzerland)*. 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/w15142597>.
- [11] Latośńska J., Gawdzik J., Honus S., Orman Ł.J., Rodek N., Waste for building material production as a method of reducing environmental load and energy recovery, *Front. Energy Res.* 11 (2023) 1–7. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1279337>.
- [12] Lejcuś K., Burszta-Adamiak E., Wróblewska K., Orzeszyna H., Szpitalniak M., Marczak D., Misiewicz J., Dobrzańska J., *Zasady zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi na obszarze zabudowanym*, (2021) 152. [https://www.wroclaw.pl/zielony-wroclaw/files/dokumenty/41756/zlap-deszcz-katalog-dobrych-praktyk-cz2\\_compressed.pdf](https://www.wroclaw.pl/zielony-wroclaw/files/dokumenty/41756/zlap-deszcz-katalog-dobrych-praktyk-cz2_compressed.pdf).
- [13] Madzia M., Reduction of treated water use through application of rainwater tanks in households, *J. Ecol. Eng.* 20 (2019) 156–161. <https://doi.org/10.12911/22998993/112495>.
- [14] *Mapy klimatu Polski*, <https://klimat.ingw.pl/pl/climate-maps/#Precipitation/Yearly/1991-2020/1/Winter>.
- [15] Milczarek M., *Analiza metod doboru objętości zbiornika wody deszczowej na przykładzie budynku jednorodzinnego zlokalizowanego we Wrocławiu*, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Wroclawska, 2023.
- [16] *Obliczanie pojemności zbiornika wody deszczowej*, <https://aquatechnika.com.pl/Poradnik/zbiorniki-na-wode-deszczowa/obliczanie-pojemnosci-zbiornika-wody-deszczowej>.
- [17] *Poradnik wykorzystania wody deszczowej – Broszura produktowa Wilo*, <https://cms.media.wilo.com/cndnoc/wilo418778/4542410/wilo418778.pdf>.
- [18] *Raport 2020. Polska na drodze zrównoważonego rozwoju*, Główny Urząd Statystyczny. (2020). <https://raportsdg.stat.gov.pl/2020/index.html>.
- [19] Sakson-Sysiak G., Zyzik P., Efektywność systemów wykorzystania wody deszczowej w budynkach handlowo-usługowych, *Instal*. (2024) 24–28. <https://doi.org/10.36119/15.2024.1.3>.
- [20] Słyś D., *Efekt ekonomiczny zastosowania instalacji do wykorzystania wód opadowych w budownictwie jednorodzinne*, *Instal* 6 (2006) 66–69.
- [21] Słyś D., Stec A., Centralized or decentralized rainwater harvesting systems: A case study, *Resources*. 9 (2020). <https://doi.org/10.3390/resources9010005>.
- [22] Starzec M., Kordana-Obuch S., Słyś D., Assessment of the Feasibility of Implementing a Flash Flood Early Warning System in a Small Catchment Area, *Sustainability*. 15 (2023) 8316. <https://doi.org/10.3390/su15108316>.
- [23] Stec A., Słyś D., *Analiza możliwości wykorzystania wody deszczowej na terenie miasteczka akademickiego w Polsce*, *Proc. ECOpole*. 11 (2017) 5–8. [https://doi.org/10.2429/proc.2017.11\(1\)031](https://doi.org/10.2429/proc.2017.11(1)031).
- [24] Suchorab P., Iwanek G., *Efektywność wybranej instalacji dualnej wykorzystującej wody deszczowe w warunkach rzeczywistych opadów*, *Instal*. 12 (2021) 41–45. <https://doi.org/10.36119/15.2021.12.6>.
- [25] Turski M., *Magazynowanie ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych*, *Instal* 10 (2023) DOI: 10.36119/15.2023.10.1
- [26] Wojciechowska E., Gajewska M., Żurkowska N., Surówka M., Obarska-Pempkowiak H., *Zrównoważone systemy gospodarowania wodą deszczową*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2015.