

ANALIZA STOSUNKÓW WODNYCH SUBSTRATÓW WYKORZYSTYWANYCH W SYSTEMACH ZIELONEGO DACHU

Anna Baryła¹, Agnieszka Karczmarczyk¹, Agnieszka Bus¹

¹ Katedra Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: anna_baryla@sggw.pl; agnieszka_karczmarczyk@sggw.p; agnieszka_bus@sggw.pl

STRESZCZENIE

Zielone dachy, jako odtworzenie powierzchni biologicznie czynnej, należą do dość powszechnych i efektywnych metod gospodarowania wodami opadowymi na terenach zurbanizowanych. W zależności od konstrukcji zielonego dachu i rodzaju materiału, z jakiego usypano warstwę wegetacyjną, możliwe jest zatrzymanie 50–90% wody opadowej. Celem pracy było określenie właściwości fizyko-wodnych dwóch substratów wykorzystywanych przy budowie zielonych dachów (intensywny i ekstensywny). Porównano retencyjność obu substratów przy zastosowaniu kruszonego gazobetonu jako warstwy drenażowej. W doświadczeniu, w którym zastosowano gazobeton jako warstwę drenażową, zaobserwowano większe przesuszanie wierzchniej warstwy substratu co może być związane dużą nasiąkliwością tego materiału. Odciek z substratu przy zastosowaniu gazobetonu jako warstwy drenażowej wyniósł średnio od 22–51% objętości dostarczonej wody dla substratu ekstensywnego, natomiast 19–46% objętości dostarczanej wody dla substratu intensywnego. Odciek, z substratu bez warstwy drenażowej wyniósł 40–48% objętości dostarczonej wody.

Słowa kluczowe: dach zielony, gazobeton, substrat dachowy, zapasy wody.

ANALYSIS OF WATER RELATIONS OF SUBSTRATES USED IN GREEN ROOF SYSTEMS

ABSTRACT

Green roofs, as the restoration of biologically active area, are fairly common and effective method of storm water management in urban areas. Depend on the design of the green roof and the type of substrate, they are able to retain 50–90% of rainwater. The aim of the study was to determine the physicochemical properties of two substrates used in the construction of green roofs (intensive and extensive). Water retention of substrates was compared to water retention of substrates undelined with the drainage layer made from crushed autoclaved aerated concrete. In the experiment, which uses drainage layer, higher drying the top layer of the substrate was observed, which may be related to high water absorption drainage material. The effluent from the substrate using aerated concrete as a drainage layer amounted to an average of 22–51% of the volume of water supplied to the extensive substrate, whereas 19–46% of the volume of water supplied to the intensive substrate. The effluent from the substrate without the drainage layer amounted 40–48% of the volume of water supplied.

Keywords: green roof, substrate, water retention, crushed autoclaved aerated concrete.

WSTĘP

Budowa zielonych dachów należy do efektywnych metod gospodarowania wodami opadowymi na terenach zurbanizowanych. W zależności od konstrukcji zielonego dachu i rodzaju materiału, z jakiego usypano warstwę wegetacyjną, możliwe jest zatrzymanie 50–90% wody opadowej [Kolb 2002a, Uhl i in. 2003, Szajda-Birnfeld i in. 2012]. Warstwa wegetacyjna stanowi kluczowy element zielonego dachu. Jest nią substrat dachowy, czyli specjalnie przygotowana mieszanka substancji mineralnych i organicznych odwzorowująca na zielonym dachu warunki glebowe. Wszystkie materiały i mieszanki użyte w podłożu dachowym powinny spełniać wytyczne określone przez Niemieckie Towarzystwo Naukowo-Badawcze Krajobrazu i Rolnictwa (FLL 2008). Są one zbiorem zaleceń stanowiących punkt odniesienia dla projektantów, wykonawców oraz osób zajmujących się pielęgnacją dachów zielonych nie tylko na terenie Niemiec, ale także w większości krajów Europy i świata [Bogacz i in. 2013]. Warstwa drenażowa zielonego dachu powinna być zbudowana z materiałów pozwalających na szybki i swobodny odpływ nadmiaru wody podczas opadów atmosferycznych. Materiały te powinny również posiadać zdolność do magazynowania wody dla roślin podczas suchych warunków klimatycznych. Szczególnie dotyczy to dachów o zazielenieniu ekstensywnym, które zazwyczaj nie posiadają systemu nawadniającego. Celem pracy była analiza właściwości fizyko-wodnych substratów dachowych oraz określenie ich zdolności retencyjnych przy zastosowaniu kruszonego gazobetonu jako warstwy drenażowej.

MATERIAŁ I METODYKA

W doświadczeniu wykorzystano dwa substraty: dla dachu intensywnego (IU) i ekstensywnego (EU). Wykonano analizę ich składu mechanicznego a na podstawie uzyskanych wyników obliczono wskaźnik uziarnienia. Określono współczynnik filtracji metodą deWita. Krzywą pF określono metodą bloku pyłowego, w którym pomiar ciśnienia ssącego jest mierzony w przedziale od pF 0,4 do pF 2,0 oraz metodą komory ciśnieniowej, w której dokonywany jest pomiar ciśnień ssących w przedziale 2,3 do 4,2 pF (Zawadzki 1973). Celem określenia parametrów retencyjności wodnej substratów otrzymane wyniki przeliczono wg Mocek i in. (1997). Przyjęto, że wilgotność przy sile ssącej pF = 0,0 odpowiada wartości pełnej pojemności wodnej (pPW), pF = 2,0 jest najbliższa połowej pojemności wodnej (PPW), wartość pF = 2,9 przyjęto jako dopuszczalną dolną granicę uwilgotnienia gleby, która odpowiada zapasom wody przy pojemności okresu suszy (POS), wilgotność przy pF=4,2 punktowi trwałego wędnięcia roślin (PTWR). Efektywną retencję użyteczną (ERU) wyliczono na podstawie wilgotności dla pF 1,8–3,7, a potencjalną retencję użyteczną (PRU) – dla wartości pF 1,8–4,2.

Substraty (intensywny i ekstensywny) umieszczono w kolumnach (ϕ 145 mm) w czterech powtórzeniach (fot. 1). Doświadczenie bez warstwy drenażowej prowadzono



Fot. 1. Doświadczenie z warstwą drenażową wykonaną z kruszonego gazobetonu

przez 71 dni w okresie od grudnia 2011 r. do marca 2012 r. W drugim doświadczeniu wykorzystano takie same substraty, natomiast jako warstwę drenażową zastosowano kruszony gazobeton. Doświadczenie z warstwą drenażową prowadzono przez 85 dni w okresie od lutego do maja 2013 r. Wypełnione substratem kolumniki były okresowo zalewane wodą wodociągową, symulując opady. Przed zastosowaniem dawki nawodnieniowej mierzono wilgotność substratów sondą WET-2. Pomiary objętości wody odpływającej z kolumniek umożliwiły obliczenie skuteczności retencyjnej, wyrażającej ilość zretencjonowanej dawki. Wartości wilgotności substratów były podstawą obliczenia zasobów wodnych w analizowanej warstwie o miąższości 0–6 cm, w przyjętym do analiz okresie badań wg poniższego wzoru:

$$z = \frac{h_0 \cdot W_0}{10} \text{ [mm]}$$

gdzie: z – zapas wody w warstwie gleby [mm],

h_0 – miąższość warstwy [cm],

W_0 – wilgotność sonda WET [%].

Ustalone zapasy wody przeanalizowano na tle zastosowanych dawek nawodnieniowych oraz porównano z zapasami odpowiadającymi charakterystycznym stanom retencji gleby.

WYNIKI BADAŃ

Analiza składu mechanicznego wykazała, że podłoże ekstensywne (EU) zawiera 29% frakcji żwirowej, 70% frakcji piasku, 1% frakcji pyłowej, podłoże intensywne (IU) zawiera 20% frakcji żwirowej, 77% frakcji piasku, 3% frakcji pyłowej. Obliczony wskaźnik niejednorodności uziarnienia wyniósł: dla podłoża intensywnego $U = 5,7$;

dla podłoża ekstensywnego $U = 6,9$. Otrzymane wartości określają te podłoża jako różnoziarniste. Współczynniki filtracji zawierały się w granicach $11\text{--}33 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ dla substratów intensywnych, natomiast dla substratu ekstensywnego od 17 do $68 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Zawartość materiałów obcych zawierała się w granicach wytyczonych przez FLL (tab. 1). Porównując wilgotności substratów przy określonych wartościach pF badanych próbek z wytycznymi FLL stwierdzono, iż maksymalna pojemność wodna ($pF = 0$) utrzymuje się w wyznaczonych granicach dla prawidłowo wykonanych substratów na dachy zielone (tab. 1). Napowietrzenie substratów jest prawidłowe, gdyż wartości wilgotności przy pF 1,8 przekraczają granicę ustaloną na poziomie 20% objętości substratów.

Tabela 1. Właściwości fizyczne substratów do ogrodów dachowych określone według FLL [2008]

Nr wytycznej FLL	Parametry fizyczne		Jednostki	Intensywny (wielowarstwowy)		Ekstensywny (wielowarstwowy)	
				granica lewej krzywej	granica prawej krzywej	granica lewej krzywej	granica prawej krzywej
10.2.1	Krzywa przesiewu i zawartość frakcji	mm	%	20	0	15	–
		0,06		36	10	30	–
		0,2		70	21	50	0
		0,6		100	28	62	11
		1,0		–	40	80	30
		2,0		–	58	100	50
		4,0		–	72	–	63
		6,0		–	92	–	81
		10,0		–	100	–	88
		12,0		–	–	–	100
16,0	–	–	–	–	100		
10.2.6	Przepuszczalność wodna		$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	0,2–30		0,6–70	
10.2.7	Pojemność wodna		obj. %	$\geq 45 \leq 65$		$\geq 35 \leq 65$	
10.2.8	Pojemność powietrzna przy maksymalnej pojemności wodnej		obj. % obj. %	≥ 10 (przy pF 1,8 ≥ 20)		≥ 10 (przy pF 1,8 ≥ 20)	
10.2.14	Materiały obce (średnice > 6 mm)						
	– płytki, szkło ceramika itp. – plastik, metal		masa % masa %	$\leq 0,3$ $\leq 0,1$		$\leq 0,3$ $\leq 0,1$	

Istotnym parametrem z punktu widzenia zaopatrzenia roślin w wodę jest potencjalna retencja użyteczna (PRU), czyli całkowita ilość wody dostępnej dla roślin, oraz efektywna retencja użyteczna (ERU), jest to ilość wody, która może zostać wykorzystana przez rośliny w procesach biologicznych [Bogacz i in. 2013]. Wartość wskaźnika PRU dla substratu ekstensywnego wyniosła 19,2%, dla substratu intensywnego 16,2% (tab. 2). Analiza wskaźnika ERU również wskazuje na nieco większą zawartość wody produktywnej dla substratu ekstensywnego. Odciekalność (ustalona jako różnica po-

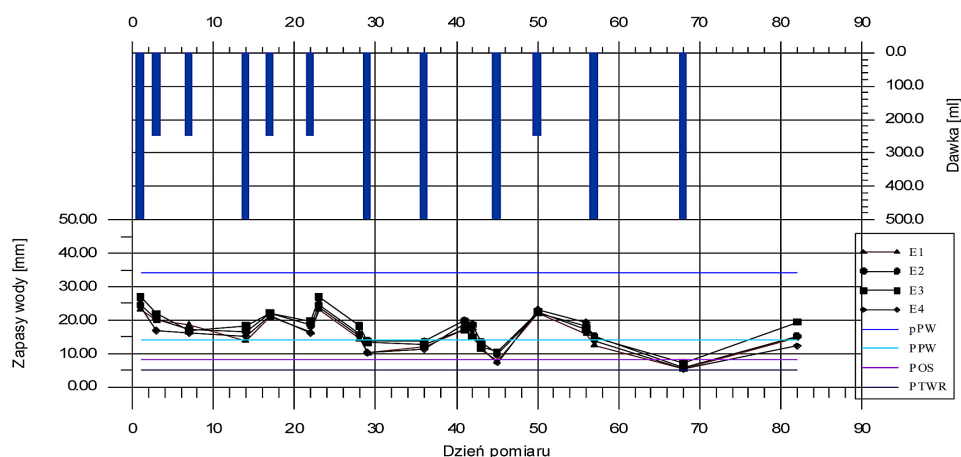
Tabela 2. Właściwości retencyjne substratów dachowych

Substrat	ERU	PRU	Odciekalność wody z warstwy wegetacyjnej [mm]	Wilgotność odpowiadająca wartości pF [% vol]					
				0	1	1,8	2,0	3,0	4,2
EU	16,0	19,2	24,9	56,8	46,9	27,8	23,4	13,9	8,6
IU	14,0	16,2	23,4	54,4	45,1	23,8	18,9	11,0	7,6

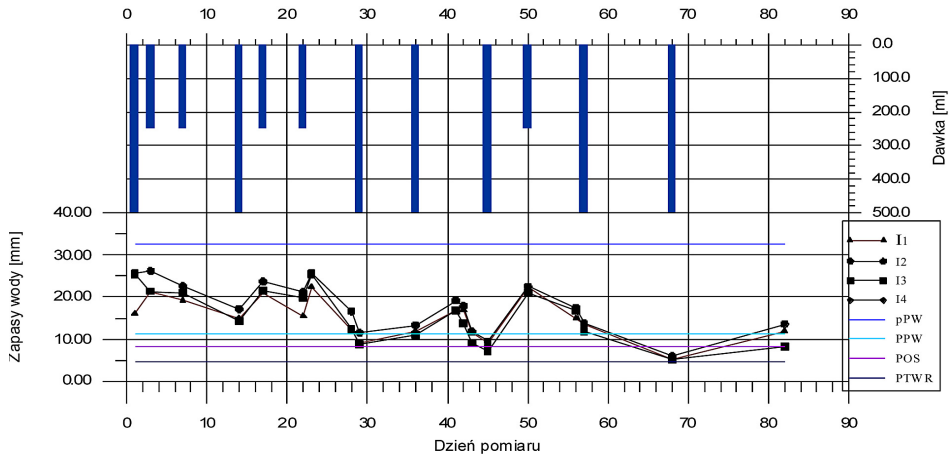
między pełną i połową pojemnością wodną) wyniosła dla substratu ekstensywnego 33,4 mm, dla substratu intensywnego 35,5 mm. Wilgotność warstwy wegetacyjnej dla pełnej pojemności wodnej (pPW) przy sile ssącej $pF = 0,0$ wyniosła średnio dla substratu intensywnego 54,4%, a dla substratu ekstensywnego 56,8% (tab. 2). Dla połowej pojemności wodnej (PPW) przy sile ssącej $pF = 2,0$ wilgotność wyniosła dla substratu intensywnego 18,9%, a substratu ekstensywnego 23,4%, a wilgotność odpowiadająca punktowi trwałego wędnięcia (PTWR) przy $pF = 4,2$ odpowiednio 7,6% dla substratu intensywnego i 8,6% dla substratu ekstensywnego.

Podczas doswiadczenia zaobserwowano, że przy zastosowaniu dawek co 2–3 dni zapasy wody zarówno w substracie intensywnym jak i ekstensywnym utrzymywały się powyżej połowej pojemności wodnej (rys. 1, 2). Natomiast przy przerwach powyżej 7 dni zapasy wody obniżały się poniżej połowej pojemności wodnej. Zaobserwowano również, że przy przerwie w nawodnieniu 11 dni zapasy wody spadły poniżej tzw. wilgotności trwałego wędnięcia.

W przypadku zapasów wody w substracie bez warstwy drenażowej (rys. 3, 4) tylko w początkowym okresie zapasy wody obniżyły się poniżej połowej pojemności wodnej, przy przerwie w nawodnieniu 12 dni osiągając punkt trwałego wędnięcia. W późniejszym okresie mimo znacznych przerw (13 dni) zapasy przekraczały połowę pojemność wodną. W obu doswiadczeniach zaobserwowano, że w przypadku sub-



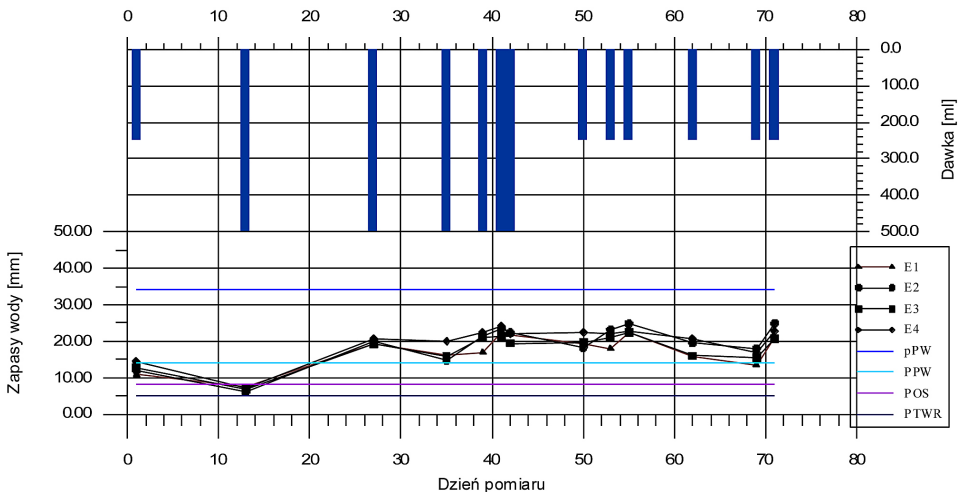
Rys. 1. Zapasy wody [mm] w 6 cm warstwie substratu ekstensywnego (EU) przy zastosowaniu warstwy drenażowej z kruszonego gazobetonu



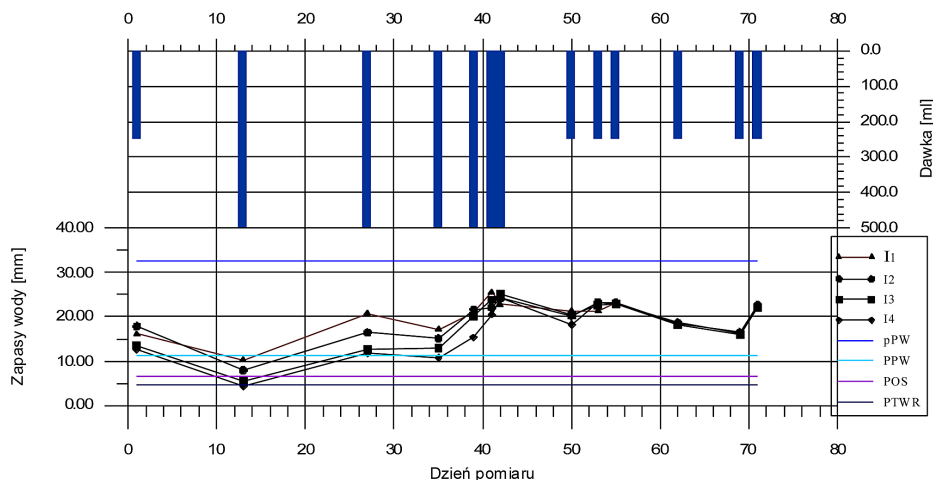
Rys. 2. Zapasy wody [mm] w 6 cm warstwie substratu intensywnego (IU) z warstwą drenażową z kruszonego gazobetonu

stratu ekstensywnego częściej wilgotność gleby obniżała się do wartości mniejszej niż pojemność okresu suszy (POS).

Przeprowadzone badania wykazały, że odciek z substratu przy zastosowaniu gazobetonu jako warstwy drenażowej wyniósł średnio od 22–51% objętości dostarczonej wody dla substratu ekstensywnego, natomiast 19–46% objętości dostarczanej wody dla substratu intensywnego. Badania odcieków prowadzone przez Karczmarczyk i in. (2012) bez warstwy drenażowej dla tych samych substratów wykazały, że odcieki wyniosły 40–48% objętości dostarczonej wody. Świadczy to o znacznych zdolnościach retencyjnych gazobetonu.



Rys. 3. Zapasy wody [mm] w 6 cm warstwie substratu ekstensywnego (EU) bez warstwy drenażowej



Rys. 4. Zapasy wody [mm] w 6 cm warstwie substratu intensywnego (IU) bez warstwy drenażowej

Niemieckie badania przeprowadzone przez Liesecke (1998) dowiodły, że warstwa substratu o grubości 2–4 cm jest w stanie zatrzymać do 45% wody opadowej rocznie. Przy zwiększeniu grubości substratu do 10–15 cm wzrasta również ilość zatrzymanej wody do 60% rocznych opadów. Badania przeprowadzone dla 18 różnych dachów wykazały, że średni współczynnik spływu oscyluje między 0,2 a 0,4, natomiast retencja wody opadowej w skali roku wynosi od 62% do 77% (Uhl i Schiedt 2008, Mrowiec 2008). Różnice te wynikały z różnych warunków atmosferycznych oraz klimatu, w jakich przeprowadzone zostały badania.

Analiza pomiarów prowadzonych przez Bursztę-Adamiak (2012) wykazała, że średnia retencja na zielonych dachach dla 153 analizowanych zdarzeń opadowych kształtowała się w granicach od 82,5% do 85,7%. Dla opadów, których wysokość dobowej warstwy opadu nie przekraczała 1 mm, retencja na zielonych dachach wynosiła blisko 100%.

WNIOSKI

1. Badane substraty spełniają wymagania zgodnie z FLL pod względem zdolności retencyjnych materiałów przeznaczonych na dachy zielone.
2. Badane substraty powinny cechować się mniejszą ociekalnością, co zapobiegałoby znacznym odpływom przy dużych opadach.
3. Zapasy wody w wierzchniej warstwie częściej przesychały przy wykorzystaniu kruszonego gazobetonu jako drenażu, co może być związane z dużą nasiąkliwością zastosowanego materiału.
4. Odciek z substratów bez warstwy drenażowej wyniósł 40–48% objętości dostarczonej wody, natomiast przy zastosowaniu gazobetonu jako warstwy drenażowej

od 19–51% objętości dostarczonej wody, co potwierdziło znaczne zdolności retencyjne gazobetonu.

5. Substrat ekstensywny wykazywał większe tendencje osiągnięcia wilgotności odpowiadającej wartości poniżej pojemności okresu suszy (POS).

Podziękowanie

Doświadczenie zostało zrealizowane dzięki wykorzystaniu zasobów oraz aparatury Pracowni Ekotechnologii oraz Pracowni Nawodnień i Odwodnień, Centrum Wodne SGGW.

PIŚMIENNICTWO

1. Bogacz A., Woźniczka P., Burszta-Adamiak E., Kolasińska K. 2013. Metody zwiększania retencji wodnej na terenach zurbanizowanych. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 59, 27–35.
2. Bousselot M.J., Klett J.E., Koski R.D. 2011. Moisture Content of Extensive Green Roof Substrate and Growth Response of 15 Temperate Plant Species during Dry Down. *Hortscience* 46(3), 518–522.
3. Burszta-Adamiak E. 2012. Analysis of the retention capacity of green roofs. *J. Water Land Dev.* 2012, No. 16 (I–VI), 3–9.
4. FLL (Hrsg.) 2008. Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Selbstverlag, Bonn.
5. Karczmarczyk A., Baryła A., Charazińska P., Bus A., Frąk M. 2012. Wpływ substratu dachu zielonego na jakość wody z niego odpływającej. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* nr 3/III, 7–15.
6. Kolb W. 1995a. Dachbegrünung-Aktuelle Versuchsergebnisse. *Neue Landschaft* 40 (10), 745–751.
7. Köhler M., Schmidt M. 1999. Landzeituntersuchungen an begrünten Dächern in Berlin. *Dach+Grün* 8(1), 12–17.
8. Köhler M., Poll P.H. 2010. Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. *Ecol. Engineering* 36, 722–729.
9. Liesecke, H.-J, 1998. Das Retentionsvermögen von Dachbegrünung. *Stand und Grün* 47(1), 46–53.
10. Mocek A., Drzymała S., Maszner P. 1997. *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*. Wyd. Akademii Rolniczej w Poznaniu. Poznań.
11. Mrowiec M. 2008. Zielone dachy jako element zrównoważonych systemów odprowadzania wód opadowych. [W:] J. Łomotowski (red.), *Problemy zagospodarowania wód opadowych*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Wrocław.
12. Szajda-Brinfeld E., Pływaczyk A., Skarżyński D. 2012. Zielone dachy. Zrównoważona gospodarka wodna na terenach zurbanizowanych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław.
13. Uhl M., Schiedt L. 2008. Green Roof Storm Water Retention – Monitoring Results. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK.