

## WŁAŚCIWOŚCI RETENCYJNE ZIELONYCH DACHÓW TYPU EKSTENSYWNEGO NA PRZYKŁADZIE BADAŃ MODELOWYCH

Grzegorz Pęczkowski, Wojciech Orzepowski, Ryszard Pokładek,  
Tomasz Kowalczyk, Romuald Żmuda, Rafał Wójcik

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**Streszczenie.** Koncepcja zielonych dachów i ich znaczenie dla krajobrazu miejskiego są zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju i gospodarowania wodami opadowymi. Aspekty te przyczyniają się do ciągłego poszukiwania rozwiązań w zakresie technologii tych systemów. W pracy dokonano oceny zdolności retencyjnych modelu zielonego dachu typu ekstensywnego opartego na profilach warstwy wegetacyjnej przygotowanej na bazie keramzytu oraz perlitu. Badania prowadzono od IV do IX w 2012 roku na obiekcie zlokalizowanym na terenie obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Wrocław-Swojec. Ocenie poddano efektywność retencyjną dachów. Badania modelowe wykazały, że dachy zielone retencjonowały wodę w zakresie od 22,9 do 77,8 mm, a wskaźniki retencji mieściły się w zakresie od 67 do 98% opadów atmosferycznych. Wskaźniki odpływów były stosunkowo niewielkie i wynosiły od 0,5 do 18 mm.

**Słowa kluczowe:** dachy zielone, retencja wód deszczowych, odpływ, bilans wodny zielonego dachu

### WSTĘP

Postępująca urbanizacja terenów powoduje wzrost objętości odpływu wód deszczowych. Zdolność systemów kanalizacyjnych do przejścia przepływów burzowych może być niewystarczająca, co w następstwie może prowadzić do występowania powodzi i problemów z jakością odpływającej wody. Rozwiązaniem może być zastosowanie tzw. zrównoważonych systemów odwadniających, za pomocą których można zmniejszyć prędkość i objętość odpływających wód. Podkreślić należy, że podstawowym kierun-

---

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr hab. inż. Grzegorz Pęczkowski, dr inż. Wojciech Orzepowski, dr hab. inż. Ryszard Pokładek, dr hab. inż. Tomasz Kowalczyk, dr hab. inż. Romuald Żmuda, prof. UP, inż. Rafał Wójcik, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, e-mail: [grzegorz.peczkowski@up.wroc.pl](mailto:grzegorz.peczkowski@up.wroc.pl).

kiem zagospodarowania wód deszczowych powinno być ich zatrzymywanie w części lub w całości na obszarach zurbanizowanych, spowolnienie ich odpływu, a także redukcja szczytowych wartości przepływów i zanieczyszczeń poprzez naturalne oczyszczanie [Szajda i in. 2008, Szajda i Pęczkowski 2010, Burszta-Adamiak i in. 2014]. Jedną z form zrównoważonych systemów pozwalających na realizację tych zadań są dachy zielone.

Koncepcja zielonych dachów i ich znaczenie estetyczne oraz ekologiczne dla krajobrazu miejskiego są zgodne z koncepcją zrównoważonego rozwoju. Szczególnie niebagatelne znaczenie ma ich pozytywny wpływ na poprawę jakości wód odpływających. Osiągnięcie tych celów jest możliwe do spełnienia przez właściwy dobór rodzaju substratu glebowego – warstwy wegetacyjnej, jak również wybór odpowiedniej roślinności dostosowanej do lokalnych warunków klimatycznych.

W pracy dokonano oceny zdolności retencyjnych modeli zielonych dachów typu ekstensywnego opartych na profilach warstwy wegetacyjnej przygotowanej na bazie keramzytu oraz perlitu. Badania przeprowadzono w 2012 roku w miesiącach od kwietnia do września na obiekcie zlokalizowanym na terenie obserwatorium Agri- i Hydrometeorologii Wrocław-Swojec (ryc. 1).



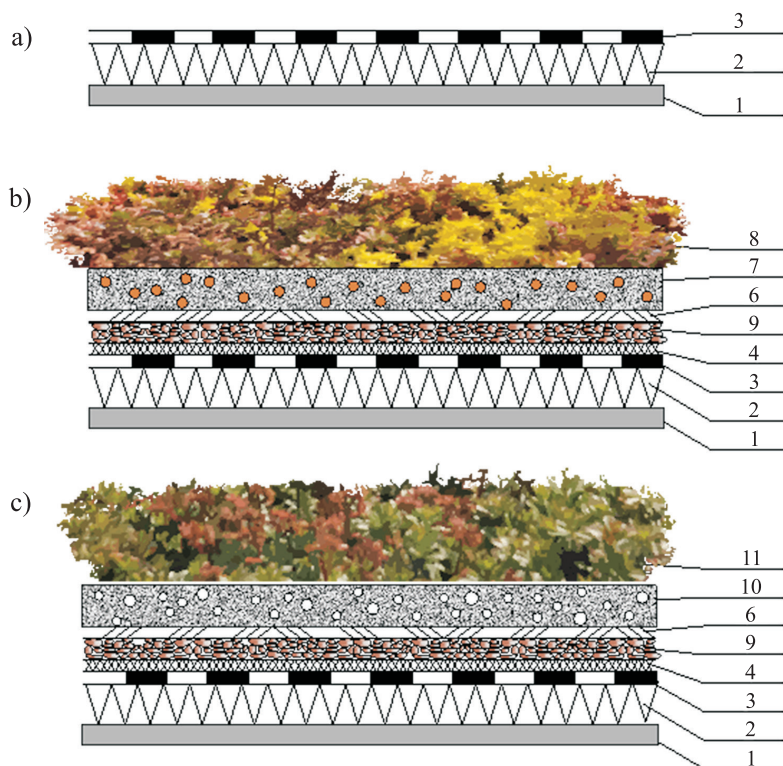
Ryc. 1. Obiekt doświadczalny  
Fig. 1. Experimental object

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Zakres doświadczenia obejmuje dwa modele dachów zielonych typu ekstensywnego o zróżnicowanych składach warstwy wegetacyjnej. Ocenie poddano efektywność retencyjną modeli oraz funkcjonalność wybranych systemów w lokalnych warunkach klimatycznych Wrocławia. Rodzaj zastosowanych materiałów pozwala, przy niewielkich nakładach inwestycyjnych, zrealizować omawiane funkcje w większej skali.

Na bazie odpowiedniej konstrukcji (stelaż metalowy – blacha i kształtowniki ocynkowane) wykonano modele o wymiarach  $660 \times 1000$  mm i nachyleniu w stosunku do powierzchni terenu 5%. Usytuowano je na wysokości 1 m nad powierzchnią terenu. Wysokość ta była również poziomem odniesienia dla innych przyrządów pomiarowych, m.in. pluwiometru oraz disdrometru laserowego. Dodatkowo, w celu zapewnienia termoizolacji profili w dolnej poziomej i pionowej części konstrukcji, umieszczono spieniony polistyren o grubości warstwy wynoszącej 5 cm.

Model zielonego dachu (ryc. 2) o łącznej grubości warstw wynoszącej 8 cm składa się z warstwy wegetacyjnej, agrowłókniny zapobiegającej przenikaniu cząstek ziemistych do odbiornika, warstwy drenażowej żwiru o frakcji 1–2 cm, włókniny chłonno-ochronnej zabezpieczającej hydroizolację dachu, w tym przypadku zastosowano RMS 300, oraz dodatkowo membrany uszczelniającej oraz warstwy termoizolacyjnej wykonanej z polistyrenu ekstrudowanego (XPS). Warstwa wegetacyjna przygotowana została na bazie ziemi ogrodniczej, frakcji piasku drobnego i średniego (15%) oraz keramzytu o frakcji



Ryc. 2. Przekrój przez modelowy profil dachu zielonego typu ekstensywnego: a) powierzchnia kontrolna, b) profil z substratem na bazie keramzytu, c) profil z substratem na bazie perlitu; 1 – konstrukcja modelu, 2 – izolacja termiczna – polistyren ekstrudowany (XPS), 3 – folia hydroizolacyjna, 4 – geowłóknina chłonno-ochronna, 6 – geowłóknina filtracyjna, 7 – substrat na bazie keramzytu, 8, 11 – warstwa wierzchnia (*Sedum spurium*, *Sedum telephium*, *Sedum sexangulare*, *Sedum floriferum*, *Sedum album*), 9 – warstwa drenażowa żwir 1–2 cm, 10 – substrat na bazie perlitu

Fig. 2. Construction details green roofs extensive model: a) reference roof, b) green roof substrate in expanded clay aggregate, c) green roof substrate in perlite; 1 – model construction, 2 – thermal insulation – extruded polystyrene (XPS), 3 – water proofing membrane, 4 – geotextile type RMS 300 (absorptive-protective), 6 – filtration geotextile, 7 – substrate in expanded clay aggregate, 8, 11 – planted on the substrate layer (*Sedum spurium*, *Sedum telephium*, *Sedum sexangulare*, *Sedum floriferum*, *Sedum album*), 9 – gravel layer of a granulation from 1 to 2 cm, 10 – substrate in perlite

drobnej (10%). Dla omawianych modeli substrat zmodyfikowano dodatkami z keramzytu kruszonego oraz perlitu. Skład substratu może być modyfikowany w dość szerokim zakresie, w zależności od regionu. Powinien on charakteryzować się odpowiednimi właściwościami, a w szczególności stabilną strukturą uniemożliwiającą osiadanie oraz właściwą pojemnością wodną. Do zazielenienia zastosowano mieszankę następujących gatunków rozchodnika (*Sedum* L.) z rodziny gruboszowatych (50 g materiału na 1 m<sup>2</sup>): *Sedum spurium* 'Fuldaglut', *Sedum sexangulare*, *Sedum telephium*, *Sedum floriferum* 'Weihenstephaner Gold'. Wybór gatunków roślin był podyktowany miąższością warstw modeli, ponadto rośliny z gatunku *Sedum* w okresach suszy atmosferycznej zwykle nie wymagają dodatkowych zabiegów m.in. takich jak nawadnianie [Bousselot i in. 2011]. W poddanych ocenie modelach dachów typu ekstensywnego ze względu na budowę i miąższość profili oraz rodzaj pielęgnacji, zasadne jest wykorzystanie roślin z gatunku *Sedum* [FLL 2008].

## WYNIKI I DYSKUSJA

Doświadczalny model zielonego dachu zlokalizowany jest na terenie zaliczanym do Nadodrzańskiego (wrocławsko-legnickiego) regionu pluwiotermicznego, w najcieplejszej dzielnicy klimatycznej Polski [Kondracki 1978]. Roczna suma opadów w rejonie nizinnym Dolnego Śląska kształtuje się na poziomie 560–600 mm. W analizowanym okresie sumy opadów miesięcznych wynosiły od 24 do 92 mm, przy średnich miesięcznych IV–IX z wielolecia (1961–2000) od 37 do 91 mm. Analizowany okres można zaliczyć pod względem opadowym do normalnych [Kozłmiński i Michalska 2001].

Materiał warstwy wegetacyjnej przygotowano na bazie ziemi ogrodniczej o pH obojętnym, frakcji piasku oraz dodatków kruszonego perlitu i keramzytu. Na podstawie wykonanej analizy granulometrycznej określono grupę mechaniczną substratu jako glinę piaszczystą. Gęstość właściwa substratu kształtowała się w granicach 1,81–1,85 g · cm<sup>-3</sup>, gęstość objętościowa od 0,39 do 0,43 g · cm<sup>-3</sup>, a porowatość całkowita wynosiła około 76%.

Zdolności retencyjne badanych substratów określono na podstawie charakterystyki retencji wodnej. Zasoby wody przy ciśnieniu odpowiadającym pF 0, czyli całkowitej pojemności wodnej, wynoszą 40,9 i 67,2 mm odpowiednio dla profili z keramzytem i perlitem, w punkcie pF 2,0 odpowiadającym połowej pojemności wodnej (PPW) 18,2 i 33,8 mm, w punkcie pF 2,9 odpowiadającym początkowi hamowania wzrostu roślin (POS) 16,3 i 31,2, a w punkcie pF 4,2 odpowiadającym trwałemu wędnięciu roślin (PTWR) 1,9 oraz 5,7 mm. Obliczona odciekalność wody z warstwy wegetacyjnej wynosi 22,7 i 21,6 mm odpowiednio dla warstwy wegetacyjnej z keramzytem i perlitem, a współczynnik odciekalności 41,3 i 39,2%. Przewierność gleby obliczona jako stosunek odciekalności i porowatości absolutnej wynosi odpowiednio 55,5 i 32,1% porowatości. Zarówno wartość współczynnika odciekalności, jak i przewierność substratu glebowego, z którego wykonana jest warstwa wegetacyjna modeli dachów, są wysokie.

Właściwości powietrzno-wodne substratów glebowych zastosowanych w warstwie wegetacyjnej cechują się znacznymi wartościami potencjalnej retencji użytecznej od 16,3 do 18,1 mm. Warstwy te mają jednak niewielką połowę pojemność wodną (PPW) oraz pojemność bliską początkowi hamowania wzrostu roślin (POS). Niewielka efektywna

retencja użyteczna wynosząca 1,6 i 1,9 mm odpowiednio dla warstw z keramzytem i perlitem może mieć niekorzystny wpływ na obniżenie jego zdolności dachu do retencjonowania wód opadowych. Natomiast duża odciekalność warstwy wegetacyjnej jest przyczyną odpływu znacznych ilości wody w nim zgromadzonej i niewykorzystywanej przez rośliny. Obliczony współczynnik odciekalności wynosi do 41,3% .

Pomiary opadów atmosferycznych wykonano za pomocą deszczomierza samorejestrującego, a odpływy pomierzono wykorzystując rejestratory impulsów Hobo (Onset Computers Corporation) wraz z systemem korytek wywrotnych o określonej objętości (w doświadczeniu 15 cm<sup>3</sup>). Dla zaprojektowanych modeli zielonych dachów oraz dodatkowo powierzchni kontrolnej analizie poddano wskaźniki odpływów ( $H$ ), współczynniki odpływów ( $\alpha$ ), oraz wskaźniki retencji ( $R$ ), względny wskaźnik retencji do opadów atmosferycznych ( $RPI$ ) i w stosunku do powierzchni referencyjnej ( $ASRPI$ ), a także ilość zretencjonowanej wody opadowej ( $r$ ). Uzyskane wyniki badań wykazały, że w okresie wegetacyjnym (IV–IX) 2012 roku odpłynęło odpowiednio z modeli z substratem na bazie keramzytu i perlitu 65,9 i 55,8 mm, co stanowi 19,1 i 16,1% opadów atmosferycznych. Wielkość miesięcznych wskaźników odpływu  $H$  wahała się w pierwszym modelu w przedziale od 1,2 do 18 mm, a współczynników odpływu od 0,05 do 0,22, odpowiednio w drugim 0,5 i 15,8 i współczynników odpływu 0,02 i 0,19. Na zielonym dachu w okresie wegetacyjnym zretencjonowane zostało odpowiednio dla warstwy z keramzytem i perlitem 279 oraz 289,1 mm wody, a skuteczność retencyjna wynosiła od 67 do 97% oraz od 71 do 98%. Miesięcznie dach retencjonował do 77 mm wody. Względny wskaźnik retencji uwzględniającej opad atmosferyczny na powierzchnię referencyjną ASRPI wynosił średnio w miesiącu okresu badawczego 80,1% i 83,5% (tab. 1). Prowadzony w Edynburgu 2-letni program [Uhl i Schiedt 2008] na powierzchniach testowych od 12 do 24,5 m<sup>2</sup> o różnej budowie warstw wykazał w zależności od miąższości profilu możliwość zmniejszania rocznych i sezonowych wartości odpływów, w okresie letnim od 16 do 31%. Przeprowadzone w USA w latach 2007–2009 badania na 11 powierzchniach modelowych [Van Seters i in. 2009] wykazały spowolnienie i redukcję odpływu średnio 63% w porównaniu z powierzchnią tradycyjną, a w miesiącach letnich wynosiły 70–93%. W przeglądzie 18 naukowych prac dotyczących odpływu z powierzchni zielonych dachów [Mentens i in. 2006] wykazano redukcję odpływu, szczególnie poprzez zwiększanie powierzchni zielonej. Badania Burszty-Adamiak [2012] wykazały wpływ powierzchni biologicznie czynnych na natężenie i objętość odpływów. Dla przeprowadzonych badań skuteczność powstrzymywania odpływu wynosiła od 82,5 do 85,7%, a w przypadku deszczu o niewielkim natężeniu, skuteczność była wysoka, do 100%. Badania Palla i in. [2010, 2012] wykazały, że zielony dach jest w stanie zredukować falę szczytową od 60 do 80%, niekiedy jednak więcej w zależności od systemu nawet do 98%. Badania Roehra i Konga [2010] dla lat normalnych wykazały, że profile zielonych dachów o miąższości 150 mm pozwalają na redukcję rocznego odpływu od 29 do 100% w zależności od natężenia opadów. Badania na zielonym dachu w Carnegie Mellon University Uniwersytecie Pittsburskim [Chen 2011] prowadzone w latach 2009–2011 wykazały, że system redukował odpływy nawet do 100% przy deszczach o wysokości 2,5 mm i do 45% przy deszczach powyżej 15 mm. Dostrzeżono także regulacyjne znaczenie dachu – opóźnienie kulminacyjnej fali, przy deszczach mniejszych od 15 mm zawierała się w granicach od 80 do 100%.



Tabela 1. Miesięczne i okresowe sumy opadów atmosferycznych  $P$  (mm), wskaźniki odpływu  $H$  (mm), współczynniki odpływu  $\alpha$  (%), względny wskaźnik retencji  $RPI$  (% zretencjonowanego opadu), względny wskaźnik retencji uwzględniającej opad na powierzchnię referencyjną  $ASRPI$  (%) oraz ilość zretencjonowanej wody opadowej  $r$  (mm) w okresie IV–IX 2012

Table 1. Monthly and periodical sum precipitations  $P$  (mm), coefficients runoff  $H$  (mm), ratio runoff  $\alpha$  (%), retention performance indicator to the precipitations  $RPI$ , relative to the rainfall depth and the additional stormwater retention performance indicator  $ASRPI$ , as well the quantity water retention  $r$  (mm) in vegetative period 2012 r.

Wartości i wskaźniki Quantity and coefficient	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	Profil na bazie keramzytu – Substrate in expanded clay aggregate					
$P$	24,1	45,1	81,7	92,1	61,6	40,3
$H$	1,2	14,7	18	16,7	1,9	13,4
$\alpha$	0,05	0,32	0,22	0,18	0,03	0,33
$RPI$	95	67	78	82	97	67
$ASRPI$	94,8	66,3	76,8	80,4	96,8	65,7
$r$	22,9	30,4	63,7	75,4	59,7	26,9
Profil na bazie perlitu – Substrate in perlite						
$P$	24,1	45,1	81,7	92,1	61,6	40,3
$H$	0,5	13,1	15,8	14,3	1,2	10,9
$\alpha$	0,02	0,29	0,19	0,16	0,02	0,27
$RPI$	98	71	81	84	98	73
$ASRPI$	97,8	70,0	79,6	83,2	98,0	72,1
$r$	23,6	32	65,9	77,8	60,4	29,4

## WNIOSKI

1. Modele zielonych dachów wykazywały się wskaźnikami retencji, od 67 do 98% opadów atmosferycznych, co zależało głównie od natężenia i sumy opadów. W tym czasie w zaprojektowanych profilach retencjonowane było od 22,9 do 77,8 mm wody. Wskaźniki odpływów z powierzchni modelowych dachów były niewielkie i wynosiły od 0,5 do 18 mm, a współczynniki odpływu wahały się w przedziale od 0,02 do 0,22.
2. Modelowe profile zielonych dachów typu ekstensywnego wykazywały się zbliżonymi właściwościami, jednak profil z dodatkiem perlitu wykazywał większą skuteczność retencyjną.
3. Wyniki obserwacji na modelach o profilu cienkowarstwowym wykazały, że zastosowane dodatki poprawiające właściwości retencyjne mogą mieć znaczący wpływ na ilość zatrzymanego opadu atmosferycznego i wydłużenie czasu koncentracji fali odpływu.

## PIŚMIENNICTWO

- Bousselot, J.M., 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. *Hort Sci.*, 46(3), 518–522.
- Burszta-Adamiak, E. (2012). Analysis of the retention capacity of green roofs. *J. Water Land Develop.*, 16(1), 3–9.
- Burszta-Adamiak, E., Łomotowski, J., Wiercik, P. (2014). Zielone dachy jako rozwiązania poprawiające gospodarkę wodami opadowymi w miastach. *Inż. Ekol.*, 39, 26–32.
- Chen, L. (2011). Hamerschlag Hall Green Roof Storm Water Retention and Runoff Reduction Performance. Pittsburgh, ss. 111.
- FLL (2008). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau – Wytyczne Niemieckiego Towarzystwa Naukowo-Badawczego Krajobrazu i Rolnictwa.
- Kondracki, J. (1978). *Geografia fizyczna Polski*. PWN, Warszawa.
- Koźmiński, C., Michalska, B. (2001). Atlas klimatyczny ryzyka upraw roślin w Polsce. AR, Szczecin, ss. 81.
- Liesecke, H.-J. (2007). Jährliche Wasserrückhaltung durch extensive Dachbegrünungen. *Cz. 2. Neue Landschaft*, 5, 42–46.
- Mentens, J., Raes, D., Hermly, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Landsc. Urban Plann.*, 77, 217–226.
- Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L.G. (2010). Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. *Water*, 2, 140–154.
- Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L.G. (2012). Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrolog. Process.*, 26(1), 73–84.
- Roehr, D., Kong, Y. (2010). Runoff Reduction Effects of Green Roofs in Vancouver, BC, Kelowna, BC, and Shanghai, P.R. China. *Canadian Water Res. J.*, 35(1), 53–68.
- Szajda, E., Pęczkowski, G. (2010). Zielone dachy jako jeden z elementów retencji wód opadowych terenów zurbanizowanych. *Gaz Woda Techn. Sanit.*, 7–8, 17–22.
- Szajda, E., Pływaczek, A., Pęczkowski, G. (2008). Wykorzystanie zielonych dachów do ograniczenia odpływu wód opadowych w aglomeracjach miejskich. [W:] *Problemy zagospodarowania wód opadowych*. Monografia. Red. J. Łomotowski. Seidel-Przywecki, Warszawa, 49–57.
- Uhl, M., Schiedt, L. (2008). Green Roof Storm Water Retention – Monitoring Results. 11th Intern Conf. on Urban Drainage, Edinburgh.
- Van Seters, T., Rocha, L., Smith, D., Mac Millan, G. (2009). Evaluation of Green Roofs for Runoff Retention, Runoff Quality and Leachability. *Water Qual. Res. J. Can.*, 44(1), 33–47.

## RETENTION PROPERTIES OF THE TYPE OF EXTENSIVE GREEN ROOFS AS AN EXAMPLE OF MODEL TESTS

**Abstract.** The concept of green roofs and their importance to the urban landscape is consistent with the concept of sustainable development and management of rainwater. These aspects contribute to the continuous search for solutions in terms of technology these systems. The study assessed the ability of retention model of extensive green roof type based on the profiles of vegetation layer prepared on the basis of expanded clay and perlite. The study was conducted in 2012 on property located in the observatory Agro- and Hydrometeorology Wrocław-Swojec on the type of extensive models of different composition of vegetation layer, which evaluated the effectiveness of retention and

reducing the amount of rainwater flowing. Modelling studies have shown that green roofs water retention in the range from 22,9 to 77,8 mm and retention rates ranged from 67 to 98% precipitation. Indicators outflows were relatively small, ranging from 0,5 to 18 mm.

**Keywords:** green roofs, retention of stormwater, runoff, water in the balance green roof

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 29.06.2016.*

Do cytowań – For citation: Pęczkowski, G., Orzepowski, W., Pokładek, R., Kowalczyk, T., Żmuda, R., Wójcik, R. (2016). Właściwości retencyjne zielonych dachów typu ekstensywnego na przykładzie badań modelowych. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(3), 113–120.