

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (4), 457–469
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (4)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (4), 457–469
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.4.44

Ewa BURSZTA-ADAMIAK, Karolina URBAŃSKA, Piotr DRAGAŃSKI

Institut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Institute of Environmental Engineering, Wrocław University of Environmental and Life Sciences

Wpływ pokrycia dachu na ilość i wielkość zawiesin w spływach deszczowych

Influence of roofing material on quantity and size of suspended solids in roof runoff

Słowa kluczowe: wody opadowe, jakość spływów, teren zurbanizowany, pokrycie dachu, skład granulometryczny, zawiesiny
Key words: rainwater, runoff quality, urban area, roofing material, particle size distribution, total suspended solids

Wprowadzenie

Na terenach zurbanizowanych dachy stanowią znaczny udział powierzchni uszczelnionych. Najczęściej spotykanymi materiałami stosowanymi do ich pokrycia są dachówka, blachodachówka i papa. Głównie na budynkach gospodarczych można jeszcze spotkać dachy pokryte eternitem, zawierające azbest. Takie rozwiązania kiedyś dość powszechnie stosowano na terenach wiejskich. Współczesne realizacje techniczne i technologiczne budynków uwzględniają instalację dachów z roślinnością,

czyli tzw. zielone dachy, których wykonanie związane jest z aspektami środowiskowymi, głównie poprawą bilansu wodnego w miastach.

Dachy są powierzchniami spływu wód opadowych, które mogą być odprowadzane do systemów kanalizacyjnych i zagospodarowane lokalnie poprzez infiltrację do gruntu albo retencjonowane w celu dalszego ich wykorzystania. Dachy to także miejsca zatrzymywania się zanieczyszczeń, pochodzących z różnych źródeł, co nie pozostaje obojętne dla jakości spływów. Każde z zastosowanych rozwiązań materiałowych dachu może w odmienny sposób wpływać na jakość odprowadzanych wód opadowych. Jednym z istotnych zanieczyszczeń identyfikowanych w spływach są zawiesiny będące nośnikiem innych zanieczyszczeń, w tym jonów metali ciężkich i domieszek mikrobiologicznych (Brown, Stein,

Ackerman, Dorsey, Lyon i Carter, 2013). Wyniki badań Vaze'a i Chiewa (2004) wykazały, że transport mikrozanieczyszczeń odbywa się głównie z zawiesinami o średnicach mniejszych od 50 μm . Zawiesiny to nieregularne cząstki materialne, których skład i wielkość zależy od źródła ich pochodzenia (Łomotowski, Burszta-Adamiak, Kęszycka i Jary, 2008). Według rozporządzenia Ministra Środowiska (Dz.U. 2014, poz. 1800) stężenie zawiesin ogólnych, obok węglowodorów ropopochodnych, jest normowane przy wprowadzaniu spływów deszczowych do wód lub do gleby. Podczas procesu infiltracji wód opadowych następuje zatrzymanie zawiesin w strefie gruntu lub na dnie urządzeń retencyjno-rozsączających, co wywołuje zjawisko kolmatacji i wpływa na spadek prędkości infiltracji wody do gruntu w czasie eksploatacji tych systemów (Burszta-Adamiak, 2007; Burszta-Adamiak i Łomotowski, 2013). Znajomość składu granulometrycznego cząstek zawiesin pozwala oszacować intensywność zachodzenia kolmatacji, a także umożliwia wybór metody powierzchni chłonnej przed wgłębną kolmatacją. Wiedza o ilości i wielkości cząstek zawiesin w spływach jest także przydatna przy doborze urządzeń do podczyszczania wód opadowych (Sawicka-Siarkiewicz, 2011).

Dotychczas prowadzone analizy dotyczyły jakości spływów z dróg i autostrad (Aljazzar i Kocher, 2016) oraz z dachów o pokryciu tradycyjną dachówką lub papą (Lye, 2009). Rzadziej zajmowano się badaniami jakości spływów z dachów z roślinnością. Zakres tych analiz obejmował przede wszystkim ocenę parametrów fizykochemicznych zanieczyszczeń w odpływach, bez

uwzględnienia składu granulometrycznego transportowanych cząstek. Obecnie dostępność nowoczesnych metod do badania zawiesin umożliwia pomiar ich właściwości w szerszym kontekście.

Celem przeprowadzonych badań było poznanie wpływu pokryć dachowych na ilość i wielkość cząstek tworzących zawiesinę w wodach odpływających z dachów podczas opadów atmosferycznych. Kształtowanie się tych parametrów określono na tle charakterystyki opadów, tj. wielkości opadów i długości trwania okresów bezopadowych oraz pór roku.

Charakterystyka obiektów badawczych

Spływy z opadów pobierano z dachów o różnym pokryciu (dachówka ceramiczna, blachodachówka, papa, eternit) oraz z dwóch dachów zielonych ekstensywnych. Dach pokryty dachówką ceramiczną (D) jest na pięcioletnim domu jednorodzinnym zlokalizowanym w miejscowości Godzieszowa, pod Wrocławiem. Budynek jest usytuowany obok drogi o dużej intensywności ruchu pieszego i komunikacyjnego. Dach budynku jest nachylony pod kątem 45°. Stanowisko 2 znajduje się w miejscowości Siedlec, w promieniu 500 m od stanowiska 1 (D). Jest to dach pokryty blachodachówką (B) na 15-letnim domu jednorodzinnym usytuowanym pomiędzy dwoma mało uczęszczanymi ulicami. Kąt nachylenia dachu tego obiektu wynosi 45°. Stanowisko badawcze 3 jest zlokalizowane we Wrocławiu na budynku oddalonym o ok. 300 m od zielonych dachów (stanowisk Z-1 i Z-2). Jest to dach płaski pokryty papą (P), którego

wiek szacuje się na około 50 lat. Stanowisko badawcze 4 to dach eternitowy (E) budynku gospodarczego usytuowanego w miejscowości Siedlec. Dach tego obiektu nachylony jest pod kątem 30° i jest skierowany w stronę jednej z ulic. Stanowiska badawcze 5 i 6 (Z-1 i Z-2) to siedmioletnie zielone dachy ekstensywne wykonane techniką półtechniczną na dachu budynku Centrum Naukowo-Dydaktycznego Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Budynek ten jest usytuowany wzdłuż drogi o dużym natężeniu ruchu komunikacyjnego. Kąt nachylenia tych dachów wynosi 4° . Obiekty badawcze (Z-1 i Z-2) różnią się między sobą układem warstw. Zielony dach 1 (Z-1) jest rozwiązaniem systemowym z zastosowaniem drenażu żwirowego. Obsadzony jest rojnikami 'Othello'. Jego konstrukcja składa się (od góry) z substratu, geowłókniny filtracyjnej, warstwy żwiru, geowłókniny chłonno-ochronnej oraz warstwy nośnej. Stanowisko pomiarowe Z-2 jest ekstensywnym dachem, w którym w warstwie substratu zastosowano drenaż wewnętrzny. Wierzchnia warstwa pokryta jest roślinnością niskopienną, rozchodnikiem ostrym 'Golden Queen'. Kolejne warstwy to substrat o właściwościach drenażowych, geowłóknina chłonno-ochronna oraz warstwa nośna.

Metodyka badań

Badania jakości spływów prowadzono od czerwca 2016 do maja 2017 roku. Wodę do analiz starano się pobierać w regularnych, comiesięcznych odstępach, jednak ze względu na nieregularność występowania opadu nie zawsze

było możliwe zachowanie tej samej liczby dni między pomiarami. Spływy opadowe pobierano z przewodu spustowego po zakończeniu deszczu. Bezpośrednio po ich zebraniu w próbach oznaczano stężenie zawiesiny ogólnej oraz rozkłady wielkości cząstek zawiesin. Badania stężenia zawiesin ogólnych przeprowadzono metodą filtracji przez sączki z włókna szklanego (PN-EN 872:2002) w Wydziałowym Laboratorium Badań Środowiskowych Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Oznaczenia składu granulometrycznego zawiesin występujących w spływach dokonano w Laboratorium Geotechnicznym tej samej uczelni z wykorzystaniem granulometru laserowego Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd, którego działanie polega na metodzie dyfrakcji światła laserowego. Średnicę zastępczą cząstek (d_v) zawiesin określa się w zależności od objętości (V), powierzchni (A), obwodu (P) oraz prędkości opadania (v) (Łomotowski i in., 2008). W niniejszych badaniach wymiar cząstki liczony był na podstawie jej objętości i wyznaczany z zależności:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1)$$

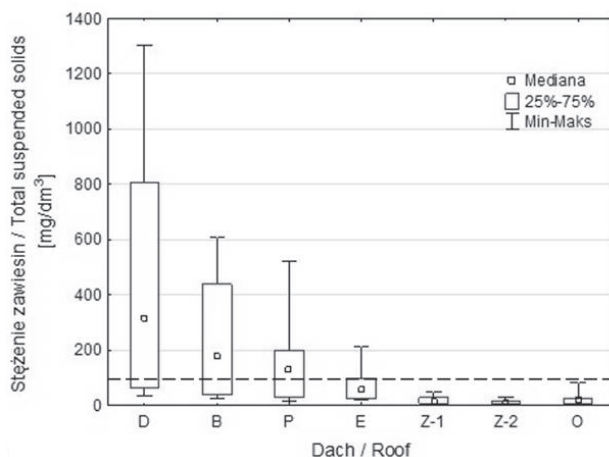
Charakterystyki opadów pozyskano z Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska we Wrocławiu ze stacji Wrocław – Korzeniowskiego oraz z pomiarów za pomocą disdrometru laserowego zamontowanego na dachu budynku Centrum Naukowo-Dydaktycznego (CND) Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Dodatkowo za każdym razem, w celu określenia jakości opadu, pobierana była próba deszczu (ozna-

czenie O), którą zbierano do specjalnie ustawionego pojemnika na dachu budynku CND. Warto nadmienić, że w okresie bezopadowym mogła dostawać się do pojemnika na opad tzw. depozycja sucha, dlatego też analizowany w pracy opad powinno traktować się jako sumę depozycji suchej oraz mokrej.

Wyniki i dyskusja

Okres badań pozwolił na pobranie spływów z różnych charakterystyk opadów. Wielkość dobową epizodów opadów generujących analizowane spływy kształtowała się w granicach od 1,80 do 25,21 mm, z czego połowa prób była zebrana po opadzie nieprzekraczającym 5 mm. Najkrótszy czas trwania opadu wynosił 30 min, a najdłuższy opad trwał prawie 12 h. Długości okresów bezopadowych mieściły się w szerokim zakresie (od 17 h do ponad 12 dni).

W analizowanych wynikach badań wyraźnie zaznaczała się różnica między ilością zawieszin odprowadzanych w spływach z powierzchni dachów, do wykonania których użyto tradycyjnych materiałów, a dachami zazielenionymi (rys. 1). Najwyższe stężenie zawiesziny ogólnej ($1304 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) zaobserwowano na dachu pokrytym dachówką ceramiczną i było ono ponad dwa razy wyższe niż w spływach odprowadzanych z dachów pokrytych blachodachówką (B) i papą (P), a nawet 30-krotnie wyższe w porównaniu do stężeń oznaczanych w spływach z zielonych dachów Z-1 i Z-2 (średnia odpowiednio 30 i $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Niskie stężenia zawieszin w odpływach z dachów z roślinnością były także zaobserwowane w badaniach Zhang, Wang, Hou, Wan, Li, Ren i Ouyang (2014). Stężenia zawiesziny ogólnej w odpływach z dachu pokrytego azbestem utrzymywały się na poziomie $154 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (wartość średnia). Ilość zawieszin zmagazynowanych na tradycyj-



RYSUNEK 1. Stężenie zawieszin ogólnych w odpływach w zależności od rodzaju dachu (linią przerywaną zaznaczono stężenie zawieszin ogólnych określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska, 2014)
 FIGURE 1. The concentration of total suspended solids in runoffs based on roof type (the dashed line denotes the concentration of suspended solids defined in the decree of the Ministry of the Environment, 2014)

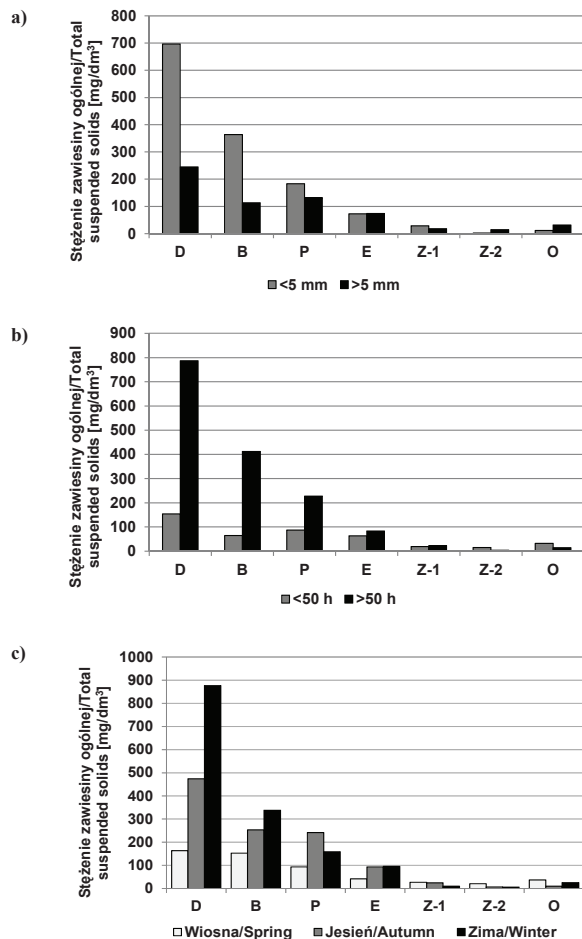
nych powierzchniach dachów może mieć różne pochodzenie, ale znaczna ich część jest nanoszona w formie suchej depozycji atmosferycznej (Hou, Ren, Zhang, Lu, Ouyang i Wang, 2012). Potwierdzają to także zaobserwowane ilości zawiesin w samym opadzie, które były stosunkowo małe i utrzymywały się na poziomie $24 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (wartość średnia). W przypadku zielonych dachów występowanie zawiesin w odpływach może wynikać z wyplukiwania drobnych cząstek substratów, które przedostały się w wyniku filtracji wraz z opadami przez kolejne warstwy konstrukcyjne. To zjawisko w dobrze wykonanych zazielenionych dachach powinno być ograniczone do minimum, gdyż w układach warstwowych stosowana warstwa filtracyjna w formie geowłóknin zapobiega przedostawaniu się cząstek w głąb układu, a ostatecznie do odpływu. Analizowane zielone dachy były dla zawiesin pewnego rodzaju buforem, który je zatrzymywał i nie transportował ich dalej do odpływu.

Ilość zawiesiny ogólnej malała wraz ze zwiększaniem się wielkości opadu. W analizie badań uwzględnione zostały dwa przedziały wysokości warstwy opadów, tzn. poniżej oraz powyżej 5 mm (rys. 2a). Zależność od wielkości opadów w największym stopniu była obserwowana dla dachów pokrytych dachówką oraz blachodachówką. Z kolei parametr ten nie wywierał większego wpływu na niskie stężenia zawiesiny występującej w spływach z zielonych dachów.

Długość trwania okresów bezopadowych w czasie badań mieściła się w zakresie od 17 h do ponad 12 dni, dlatego też okres między kolejnymi

opadami podzielono na dwie grupy, tj. trwający do 50 h oraz powyżej tej wartości. Wyraźny wpływ długości okresu bezopadowego na stężenia zawiesiny ogólnej zaobserwowano w spływach z dachów z pokryciem tradycyjnym. Na dachach z blachodachówką, dachówką i papą zarejestrowano trend wzrostowy ilości zawiesiny w odpływach wraz z wydłużającym się okresem bezopadowym. Stężenie zawiesin ogólnych w odpływach wzrastało kilkukrotnie przy okresie bezopadowym trwającym dłużej niż 50 h, a największe różnice wystąpiły w przypadku pokryć z dachówki ceramicznej i blachodachówki (rys. 2b). Gdy okres bezopadowy wynosił mniej niż 50 h, ilość zawiesin dla większości spływów z dachów o tradycyjnym pokryciu nie przekraczała $350 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. W zebranych opadach deszczu oraz w spływach z zielonych dachów ilości zawiesiny były znacznie mniejsze niż w spływach z pozostałych dachów (rys. 2b). Wydłużanie się okresu bezopadowego wpływało na obniżenie stężenia zawiesiny ogólnej w odpływach z zielonych dachów, a także dachu pokrytego eternitem.

Okres pomiarowy obejmował trzy pory roku (jesień, zimą i wiosną). Wzrost ilości zawiesin ogólnych obserwowano zimą w spływach z dachów tradycyjnych (rys. 2c). Wartości średnie dla stężeń zawiesin w odpływach z okresu zimy mieściły się w przedziale od około $100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (dla dachu pokrytego eternitem) do $876,7 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (dla dachu z dachówką) i były pięciokrotnie większe niż dla okresu wiosny. Wzrost stężeń zawiesin w odpływach w okresie jesienno-zimowym najprawdopodobniej zachodził wskutek zwiększonej emisji zanieczyszczeń naturalnych jesienią oraz

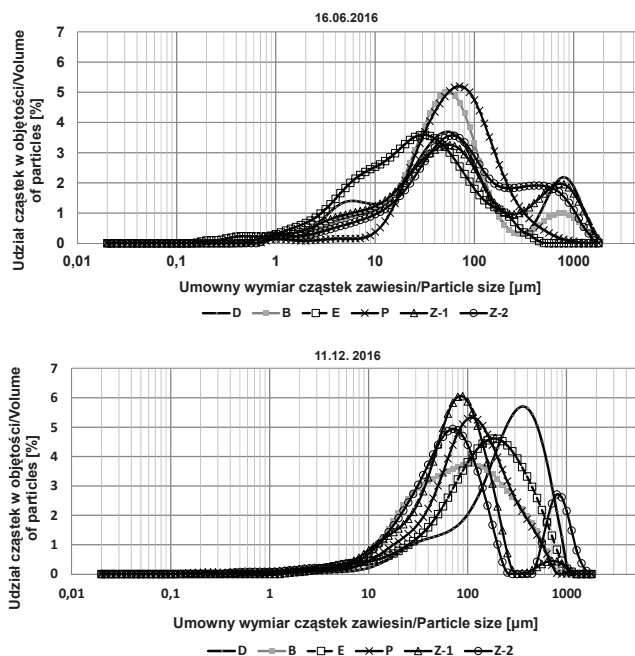


RYSUNEK 2. Średnie wartości stężeń zawiesiny ogólnej w zależności od: wielkości opadów (a), długości trwania okresu bezopadowego (b), pory roku (c)
 FIGURE 2. Average levels of total suspended solids concentration depending on rainfall depth (a), length of antecedent dry weather period (b), season (c)

zanieczyszczeń antropogenicznych nasilonych w sezonie grzewczym, podczas zimy. Do wzrostu stężeń zawiesiny ogólnej w tym okresie może dodatkowo przyczyniać się występowanie mniej intensywne opadów oraz dłuższych okresów bezopadowych. Odmienne parametry zarejestrowano na zielonych dachach. Dla obu dachów Z-1 i Z-2 stężenia zawiesin odprowadzanych

w odpływach nie przekraczały w zimie $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ i były prawie czterokrotnie niższe niż wiosną.

Badania składu granulometrycznego wykazywały duże zróżnicowanie w przebiegu rozkładów wielkości cząstek zawiesin w zależności od pokrycia dachu oraz okresu, w którym dokonywano pomiarów (rys. 3). W tabelach 1 i 2 zestawiono wartości średnic minimal-



RYSUNEK 3. Rozkłady wielkości cząstek zawiesin o średnicy zastępczej (d_v) w spływach odprowadzanych z dachów o różnym pokryciu 16 czerwca oraz 11 grudnia 2016 roku
 FIGURE 3. Particle size distribution of suspended solids with a substitute diameter (d_v) in roof runoffs for roofs made of different roofing materials on 16 June and 11 December 2016

nych, maksymalnych, median oraz percentyli 25 i 75%, ustalone na podstawie rozkładów udziału procentowego w objętości cząstek o danym zakresie średnic zastępczych.

Wymiar cząstek zawiesin występujący w spływach opadowych z dachów mieścił się w przedziałach od 0,07 do 1783 μm . Dla większości rodzajów pokryć dachowych udział cząstek powyżej 500 μm był do siebie zbliżony i kształtował się na poziomie 15%. Różnica w składzie granulometrycznym była widoczna w zakresie najmniejszych rozmiarów cząstek. Znajomość wielkości cząstek zawiesin zawartych w spływach ma znaczenie podczas doboru urządzeń do infiltracji wód opado-

wych, zagospodarowanych w miejscu swojego powstawania. Większość systemów podczyszczających dobieranych w układach rozsączających pozwala na zatrzymanie cząstek o średnicy powyżej 75 μm . Cząstki o tym rozmiarze stanowią w analizowanych spływach około 50% wszystkich cząstek. Pozostałą część stanowią cząstki najmniejsze (średnica od 0,07 μm), które nie są usuwane ze spływów tradycyjnym podczyszczaniem w osadnikach czy separatorach. Cząstki o tej wielkości mogą zatem przedostawać się wgłąb gruntu oraz na dno systemów chłonnych, co prowadzi do kolmatacji systemów i w konsekwencji do obniżenia projektowanej wydajności wraz z upływem

TABELA 1. Podstawowe statystyki opisowe wielkości cząstek zawieszonych [µm] występujących w spływach odprowadzanych z dachu pokrytego dachówką ceramiczną (D), blachodachówką (B) i papą (C)

TABLE 1. Basic descriptive statistics of particle size of suspended solids [µm] discharged from roof covered with clay roof tiles (D), metal roofing tiles (B) and tarpaper (C)

Data pomiaru	Minimum	Percentyl 25%	Mediana	Percentyl 75%	Maksimum
Dachówka – Clay roof tiles (D)					
16.06.2016	0,50	3,77	29,97	238,09	1782,50
19.10.2016	1,78	8,93	44,77	224,40	1124,68
15.11.2016	2,24	11,25	56,37	282,51	1415,89
11.12.2016	2,24	10,02	47,51	224,40	1002,37
05.02.2017	1,78	8,45	42,34	212,20	1002,37
18.02.2017	0,56	3,56	25,18	178,25	1124,68
18.03.2017	0,56	3,99	31,70	251,79	1782,50
21.03.2017	0,40	3,00	23,81	189,13	1415,89
22.04.2017	1,42	7,53	42,34	238,09	1261,92
26.04.2017	0,89	5,64	35,57	224,40	1415,89
Blachodachówka – Metal roofing (B)					
16.06.2016	0,56	3,99	31,70	251,79	1782,50
19.10.2016	2,24	10,02	47,51	224,40	1002,37
15.11.2016	0,50	3,77	29,97	238,09	1782,50
11.12.2016	0,45	2,83	20,00	141,59	893,37
05.02.2017	0,45	3,00	21,22	150,23	1002,37
18.02.2017	0,40	3,00	23,81	189,13	1415,89
18.03.2017	0,40	3,17	26,72	224,40	1782,50
21.03.2017	0,40	2,52	15,89	100,24	632,46
22.04.2017	1,59	7,96	44,77	251,79	1261,92
26.04.2017	0,71	4,48	31,70	224,40	1415,89
Papa – Tarpaper (P)					
16.06.2016	0,71	4,48	29,97	200,00	1261,92
19.10.2016	224,40	355,66	598,07	1002,37	1588,66
15.11.2016	0,45	3,17	25,18	200,00	1415,89
11.12.2016	1,42	6,71	33,63	168,56	796,21
05.02.2017	0,56	3,99	31,70	251,79	1782,50
18.02.2017	1,78	7,53	33,63	150,23	632,46
18.03.2017	1,42	6,33	31,70	158,87	709,63
21.03.2017	0,40	2,38	15,02	94,79	563,68
22.04.2017	0,56	3,56	25,18	178,25	1124,68
26.04.2017	0,71	4,48	31,70	224,40	1415,89

TABELA 2. Podstawowe statystyki opisowe wielkości cząstek zawiesin [μm] występujących w spływach odprowadzanych z dachu pokrytego eternitem (E) oraz z zielonych dachów (Z-1, Z-2)
 TABLE 2. Basic descriptive statistics of particle size of suspended solids [μm] discharged from roof covered with asbestos (E) tiles and green roofs (Z-1, Z-2)

Data pomiaru	Minimum	Percentyl 25%	Mediana	Percentyl 75%	Maksimum
Eternit – Asbestos (E)					
16.06.2016	0,16	1,13	8,93	70,96	502,38
19.10.2016	1,00	6,33	39,91	251,79	1588,66
15.11.2016	2,00	8,93	42,34	200,00	893,37
11.12.2016	1,42	7,10	39,91	224,40	1124,68
05.02.2017	1,59	8,93	50,24	282,51	1588,66
18.02.2017	2,24	11,25	59,81	316,98	1588,66
18.03.2017	1,78	10,02	56,37	316,98	1782,50
21.03.2017	0,40	1,89	9,48	47,51	224,40
22.04.2017	2,83	12,62	59,81	282,51	1261,92
26.04.2017	0,80	5,02	33,63	224,40	1415,89
Zielony dach – Green roof (Z-1)					
16.06.2016	0,40	3,17	26,72	224,40	1782,50
19.10.2016	0,71	2,83	11,25	44,77	178,25
15.11.2016	0,18	1,78	17,83	178,25	1782,50
11.12.2016	0,13	1,19	11,93	119,33	1124,68
18.02.2017	0,08	0,89	11,25	158,87	1782,50
18.03.2017	0,07	0,67	6,71	67,10	1782,50
26.04.2017	0,71	4,48	31,70	224,40	1415,89
Zielony dach – Green roof (Z-2)					
16.06.2016	0,71	4,75	33,63	238,09	1588,66
19.10.2016	1,78	10,02	56,37	316,98	1782,50
15.11.2016	0,25	2,24	21,22	200,00	1782,50
11.12.2016	0,36	2,52	18,91	141,59	1588,66
18.02.2017	1,59	8,93	53,30	316,98	1782,50
18.03.2017	5,02	21,22	94,79	423,40	1782,50
26.04.2017	0,71	4,48	31,70	224,40	1415,89

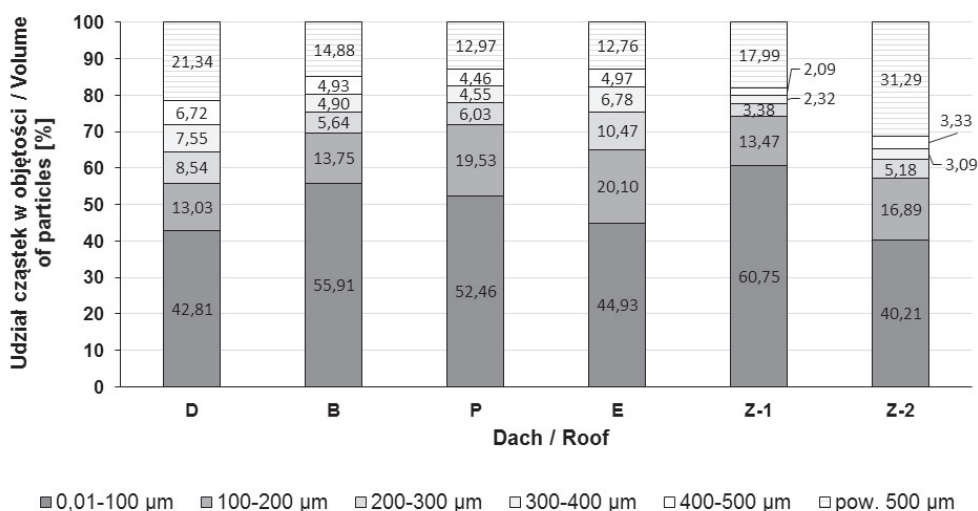
okresu eksploatacji. Z tych względów należałoby już na etapie projektowania systemów rozsączających, uwzględniających również dachowe spływy odprowadzane, przewidzieć okresowe przeprowadzenie zabiegów pielęgnacyjnych

i dekolmatacyjnych w okresie funkcjonowania systemów.

W spływach z zielonych dachów były obserwowane cząstki o średnicy 0,07–0,18 μm , których nie odnaleziono w spływach z pozostałych dachów.

Największy udział (ok. 65%) w objętości spływów ze wszystkich rodzajów dachów stanowiły cząstki o rozmiarze do 200 μm (rys. 4). Różnice w udziale poszczególnych wielkości cząstek były obserwowane nie tylko między pokryciami wykonanymi z materiałów tradycyjnych, ale także między dwoma analizowanymi zielonymi dachami. Zakres wielkości zawiesin na stanowisku pomiarowym Z-1 osiągnął wartości

nią się liczbą i rodzajem poszczególnych poziomów konstrukcyjnych (Z-1 to dach ekstensywny z zastosowaniem drenażu żwirowego, a Z-2 ma drenaż wewnętrzny w substracie). Z uzyskanych wyników badań można wnioskować, że brak wydzielenia dodatkowej warstwy drenażowej w układzie (stanowisko Z-2) może skutkować łatwiejszym wypłukiwaniem z układu zawiesin o większej średnicy zastępczej cząstek (rys. 4).



RYSUNEK 4. Udział cząstek o danej średnicy zastępczej (d_v) w objętości cząstek zawiesin występujących w spływach z poszczególnych dachów
 FIGURE 4. The share of particles with a substitute diameter (d_v) in the volume of individual roof run-offs

0,07–1782,5 μm . Wartości mediany rozmiarów cząstek charakteryzowały się dość dużą zmiennością w poszczególnych dniach pomiarowych, ale przyjmowały mniejsze wartości (w zakresie 6,71–31,7 μm) niż w przypadku zielonego dachu Z-2 (zakres median dla wielkości cząstek wynosił 18,91–94,79 μm). Prawdopodobną przyczyną obserwowanych różnic jest budowa zielonych dachów. Oba dachy to układy wielowarstwowe, ale róż-

Wnioski

Zagospodarowanie lokalne lub podczyszczanie wód opadowych odprowadzanych do odbiornika wymaga wiedzy w zakresie ilości i wielkości zawiesin w odpływach z połaci dachowych. Przeprowadzone badania spływów z czterech dachów tradycyjnych (dachówka ceramiczna, blachodachówka, papa, eternit) oraz dwóch zielonych dachów eksten-

sywnych pozwalają na wysunięcie następujących wniosków końcowych:

1. Na ilość i wielkość zawiesin odprowadzanych w spływach wpływa nie tylko pokrycie dachu, ale również charakterystyka opadu oraz pora roku. Stężenia zawiesin ogólnych w odpływach z dachów przyjmowały większe wartości po mało intensywnych opadach (do $5 \text{ mm} \cdot 25 \text{ h}^{-1}$), po dłuższych okresach bezopadowych (w analizowanym przypadku powyżej 50 h) oraz w okresie zimowym. Zależności te były najsilniej obserwowane w spływach z dachu pokrytego dachówką i blachodachówką, a w najmniejszym stopniu w odpływach z zielonych dachów.
2. Oznaczane stężenia zawiesin ogólnych w odpływach z dachów o pokryciu tradycyjnym często przekraczały wartość $100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (uregulowaną prawnie normę w Polsce). W okresie jesienno-zimowym rozmiar cząstek zawiesin przyjmował większe zakresy wartości, często osiągające maksymalny próg wykrywalności przez urządzenie (do $2000 \text{ } \mu\text{m}$). Istnieje więc konieczność podczyszczania spływów przed dalszym odprowadzeniem ich do odbiorników. Dzięki znajomości składu granulometrycznego zawiesin występujących w spływach można dobrać odpowiednie urządzenia podczyszczające.
3. Dla większości spływów z dachów największy procentowy udział (ponad 60%) w całkowitej objętości cząstek stwierdzono dla przedziału wielkości od $0,01$ do $200 \text{ } \mu\text{m}$. W odpływach z obu analizowanych zielonych dachów ekstensywnych obserwowano podobieństwa w stężeniach

zawiesin w odpływie, ale różnice w zakresach wielkości cząstek. Przyczyną tych różnic dla zielonych dachów ekstensywnych zlokalizowanych w tych samych uwarunkowaniach geograficznych i meteorologicznych najprawdopodobniej była ich budowa. Zastosowanie dodatkowej warstwy konstrukcyjnej w układzie dachu Z-1, w formie wydzielonej warstwy drenażowej, mogło wpłynąć na zmniejszenie udziału cząstek większych (powyżej $500 \text{ } \mu\text{m}$) w wodach opadowych.

Literatura

- Aljazzar, T. i Kocher, B. (2016). Monitoring of contaminant input into roadside soil from road runoff and airborne deposition. *Transportation Research Procedia*, 14, 2714-2723. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.451.
- Brown, J.S., Stein, E.D., Ackerman, D., Dorsey, J.H., Lyon, J. i Carter, P.M. (2013). Metals and bacteria partitioning to various size particles in Ballona Creek storm water runoff. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32(2), 320-328. doi: 10.1002/etc.2065.
- Burszta-Adamiak, E. (2007). Ocena przydatności geowłóknin do ochrony gruntu przed kolmatacją. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 16, 3(37), 90-98.
- Burszta-Adamiak, E. i Łomotowski, J. (2013). Modelling of percolation rate of stormwater from underground infiltration systems. *Water Science and Technology*, 68(10), 2144-2150. doi: 10.2166/wst.2013.467.
- Hou, P., Ren, Y., Zhang, Q., Lu, F., Ouyang, Z. i Wang, X. (2012). Nitrogen and Phosphorous in Atmospheric Deposition and Roof Runoff. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(6), 1621-1627.
- Lye, D.J. (2009). Rooftop runoff as a source of contamination: A review. *Science of the Total Environment*, 407(21), 5429-5434. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.07.011

- Lomotowski, J., Burszta-Adamiak, E., Kęszycska, M. i Jary, Z. (2008). *Metody i techniki optyczne w badaniach zawiesin*. Warszawa: Wydawnictwo PAN Instytut Badań Systemowych.
- PN-EN 872: 2002. Jakość wody. Oznaczanie zawiesin. Metoda z zastosowaniem filtracji przez sączi z włókna szklanego.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz.U. 2014, poz. 1800.
- Sawicka-Siarkiewicz, H. (2011). Oczyszczanie wód opadowych w separatorach i osadnikach w kontekście wymagań określonych w przepisach prawnych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 20, 2(52), 140-152.
- Vaze, J. i Chiew, F.H.S. (2004). Nutrient loads associated with different sediment sizes in urban stormwater and surface pollutants. *Journal of Environmental Engineering*, 130(4), 391-396. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:4(391).
- Zhang, Q., Wang, X., Hou, P., Wan, W., Li, R., Ren, Y. i Ouyang, Z. (2014). Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China. *Journal of Environmental Management*, 132, 178-187. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.11.009.

Streszczenie

Wpływ pokrycia dachu na ilość i wielkość zawiesin w spływach deszczowych. Do lokalnego zbierania i zagospodarowania wód opadowych często wykorzystuje się powierzchnie dachów. Dzieje się tak dlatego, że stanowią one duży udział powierzchni uszczelnionych w miastach, a spływy z nich są traktowane jako potencjalnie czyste. Wyniki licznych badań naukowych dowodzą jednak, że dachy są miejscem gromadzenia zanieczyszczeń, które mają wpływ na jakość odprowadzanych wód. Najliczniejszą grupę zanieczyszczeń występujących w spływach

stanowią zawiesiny. To od ich stężenia, a niekiedy także wielkości cząstek warunkowany jest dobór urządzeń służących do podczyszczania wody deszczowej, a w kolejnym etapie możliwości dalszego jej wykorzystania. W artykule przedstawiono wyniki badań spływów odprowadzanych z dachów wykonanych z materiałów tradycyjnych oraz z zielonych dachów, zlokalizowanych na terenach zurbanizowanych. Oceny dokonano w zakresie ilości i wielkości cząstek zawiesin w odniesieniu do charakterystyki opadów, tj. wielkości opadów i długości okresów bezopadowych oraz pór roku. Wyniki badań wykazują zróżnicowanie stężeń i wielkości zawiesin w odpływach w zależności od pokrycia dachu, charakterystyki opadów i sezonu. Najwyższe stężenia zawiesiny w odpływach z dachów tradycyjnych obserwowano w czasie opadów o wysokości mniejszej niż 5 mm na dobę, po okresie bezopadowym trwającym dłużej niż 50 h oraz w zimie. Parametry te nie wywierały większego wpływu na niskie stężenia zawiesin występujących w spływach z zielonych dachów. Największy udział w spływach ze wszystkich analizowanych dachów stanowiły cząstki zawiesin o wielkości do 200 μm .

Summary

Influence of roofing material on quantity and size of suspended solids in roof runoff. Among various drainage surfaces which allow rainwater to be utilised locally, roofs are frequently chosen solution. This is because they represent a big share of all sealed surfaces in cities and discharged liquids are considered potentially clean. Scientific reports confirm that pollutants accumulate on roofs and influence the quality of discharged water. Suspended solids are the biggest group of pollutants which occur in runoffs. The selection of rainwater pre-treatment installation and further use of the water depends on the concentration of suspended

solids and their particle size. This article describes results of a research concerning suspended solids discharged from roofs made of traditional materials as well as green roofs located in urban areas. The quantity and size of particles were assessed against rainfall characteristics: rainfall depth, length of antecedent dry weather periods and season. Results of the research show diversity of concentration levels and size of suspended solids within runoffs in reference to roofing materials, rainfall characteristics and season. The highest concentrations of suspended solids in runoff from traditional roofs were observed during rainfall depth less than 5 mm per 24 h, after antecedent dry weather

periods more than 50 h and in winter. These parameters did not have significantly influence on the low concentrations of suspended solids in runoff from green roofs. Suspended solids particles with the size of up to 200 μm constitute the biggest share of all roof runoffs.

Authors's address:

Ewa Burszta-Adamiak, Karolina Urbańska,
Piotr Dragański
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Plac Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
Poland
e-mail: ewa.burszta-adamiak@upwr.edu.pl