

**Ewa BURSZTA-ADAMIAK, Magdalena KĘSZYCKA,
Janusz ŁOMOTOWSKI**

*Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Katedra Budownictwa i Infrastruktury
Wrocław*

SKŁAD GRANULOMETRYCZNY ZAWIESIN WYSTĘPUJĄCYCH W WODACH OPADOWYCH

GRANULAR COMPOSITION OF SUSPENSIONS OCCURRING IN STORM WATER

Natural water have multilevel structure of suspended particle aggregates. Strong changeability of water components cause that suspensions occurring in natural water are almost always polydisperse with very wide range of particle sizes. Grain composition measurements evaluated for rain water, snow water and roof runoff using light-scattering technique are presented in this article.

1. Wprowadzenie

Zanieczyszczenia występujące w opadach deszczu i śniegu pochodzą bezpośrednio z atmosfery oraz są spłukiwane z powierzchni roślin i innych obiektów. Dotychczasowe badania przeprowadzane przez Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska (PIOŚ) w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska obejmują oznaczanie składu chemicznego opadów w tym stężenia siarczanów, chlorków, azotynów, azotanów itp. oraz wybrane wskaźniki np. suchą pozostałość, odczyn, przewodność elektrolityczną. Podobne oznaczenia prowadzone są w ramach indywidualnych badań publikowanych m.in. w pracach Förstera 1996, 1998; Viklandera 1999; Zobrista i in. 2000. Nie prowadzi się badań składu granulometrycznego zawiesin obecnych w tych wodach.

Zainteresowanie uziarnieniem cząstek pozostających w zawieszeniu wynika z potrzeby posiadania takich informacji na etapie projektowania urządzeń służących do infiltracji wód opadowych. Zanieczyszczenia wnoszone wraz z wodami opadowymi do urządzeń chłonnych przyczyniają się do zmiany parametrów pracy systemów infiltracyjnych i mogą przyczyniać się do zmniejszania się ich wydajności wraz z upływem czasu eksploatacji.

W pracy przedstawiono wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w opadach śniegu i deszczu oraz w spływach z dachów pobranych na stanowiskach badawczych zlokalizowanych w Strzelinie oraz we Wrocławiu. Badania wykonano przy użyciu granulometru laserowego.

2. Rozkłady wielkości cząstek zawiesin

Do pomiaru rozkładu wielkości cząstek zawiesin w cieczach służą przystawki dyspergujące zawiesinę na mokro – przystawki z grupy Hydro, w które wyposażone są współczesne granulometry laserowe. Przystawki te rozpraszają cząstki w cieczach (najczęściej w wodzie) w naczyniach o objętości 20-1000 ml. Przystawki homogenizują zawiesinę dzięki zespołowi pompy i mieszałki, których pracę można precyzyjnie regulować. Ponadto przystawki z grupy Hydro mają wbudowane sondy ultradźwiękowe (sterowane przez użytkownika) wspomagające rozbijanie aglomeratów cząstek. Analizy przy wykorzystaniu przystawek na mokro wykonywane są w ciągłym obiegu zawiesiny przez celę pomiarową.

Analizę rozpoczyna pomiar natężenia światła przez detektory optyczne przy przepływie dyspergenta, najpierw bez obecności zawiesiny (tzw. tło pomiaru), a w następnej kolejności właściwej zawiesiny (analizowanej próby). Natężenie rozszczepionego światła $I(\theta)$ określone jest z zależności (McCave I. N., Syvitski J.P.M., 1991):

$$I(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\infty} r^2 n(r) J_1^2(kr\theta) dr \quad (1)$$

gdzie: θ - kąt załamania się światła na cząstkach, r – średnica zastępcza cząstki, $n(r)$ – funkcja rozkładu wielkości cząstek, $k=2\pi/\lambda$, λ - długość fali światła lasera, J_1 – funkcja Bessela pierwszego rodzaju.

Pomiar natężenia rozszczepionego światła za pomocą detektorów wieloelementowych pozwala, po przekształceniu równania (1), na wyznaczenie funkcji rozkładu cząstek. Użytkuje się objętość całkowitą cząstek o umownych wymiarach oraz procentowy udział cząstek o danym zakresie średnic umownych w tej objętości.

Oprogramowanie umożliwia wielokrotne powtórzenie procedury pomiaru badanej próby, co eliminuje błędy wywołane ewentualnym przypadkowym dłuższym pobytem pojedynczych cząstek w celi pomiarowej w czasie trwania analizy. Zapobiega to powstawaniu grubych błędów pomiaru.

3. Średnie średnice zbioru cząstek

Rzeczywiste zawiesiny są układami polidispersyjnymi i wykazują dużą nieregularność tworzących je struktur. Układy polidispersyjne charakteryzują się szerokim zakresem rozmiarów cząstek stałych tworzących zawiesinę, dlatego do opisu całości układu za pomocą jednego rozmiaru mogą służyć średnie średnice zbioru cząstek. Mogą być ustalane bezpośrednio na podstawie składu granulometrycznego lub pośrednio w oparciu

o parametry rozkładu lognormalnego opisanego równaniem (2). Definicje sposobu ich obliczeń na podstawie składu granulometrycznego przedstawiono w tabeli 1.

$$dn(d_i) = 100\% \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp \left[-\frac{(\ln d_i - \ln X)^2}{2 \ln \sigma^2} \right] d(\ln d_i) \quad (2)$$

gdzie X jest średnią geometryczną zbioru cząstek, a σ geometrycznym odchyleniem standardowym.

Średnie średnice obliczone na podstawie liczby cząstek i ich długości $D(1,0)$ oraz liczby cząstek i ich powierzchni $D(2,0)$ można wyznaczyć tradycyjną metodą mikroskopową. Średnica $D(1,0)$ jest to arytmetyczna średnia ze zbioru cząstek. Średnica $D(2,0)$ pozwala na ocenę jak zmienia się aktywność cząstek zawiesin wraz ze wzrostem ich powierzchni. Średnia średnica $D(3,0)$ obliczana na podstawie masy i objętości cząstek może być wyznaczona z wykorzystaniem elektrycznego licznika cząstek. Wartość średniej średnicy oparta jest na wartościach masy cząstek występujących w systemie. W tym przypadku większe cząstki stanowią o wartości średnicy $D(3,0)$, gdyż we wzorze matematycznym wartość średnicy jaka brana jest pod uwagę podnoszona jest do trzeciej potęgi.

Średnia średnica obliczana na podstawie objętości i powierzchni cząstek to średnica $D(3,2)$. Średnica ta nazywana jest również w piśmiennictwie technicznym średnicą Sautera. Średnicę Sautera wykorzystuje się w obliczeniach hydro- i aerotransportu cząstek oraz w obliczeniach pieców fluidalnych (Heinrich i in., 2004). Średnica $D(3,2)$ ma wpływ na właściwości reologiczne zawiesin (Afoakwa i in., 2007).

Wartość średniej średnicy $D(4,3)$ pokazuje gdzie w danym układzie skoncentrowana jest masa. Stąd cząstki o dużych średnicach decydują o jej wartości, małe natomiast mogą zostać potraktowane w przenośni jako „kurz”. Przykładowo dla dwóch cząstek o średnicy $1 \mu\text{m}$ i $10 \mu\text{m}$ uzyskamy wynik średniej średnicy $D(4,3)$ może być zbliżony do wartości $9 \mu\text{m}$. Średnica $D(4,3)$ jest wykorzystywana do analizy składu ziarnowego miazgi węglowej i zmielonych rud metali.

W matematycznym opisie średnic $D(1,0)$, $D(2,0)$, $D(3,0)$ pojawia się wartość ogólnej liczby cząstek N , która nie jest brana pod uwagę przy opisie średnich średnic $D(3,2)$ oraz $D(4,3)$. Wyznaczenie tych średnic nie jest możliwe tradycyjną metodą mikroskopową. Oprogramowanie granulometru laserowego Mastersizer 2000 pozwala na wyliczanie wszystkich wyżej opisanych średnich średnic zbioru cząstek

Tab. 1. Sposoby wyznaczania wybranych średnich średnic zawiesiny polidispersyjnej (Allen, 1997)

Tab. 1. Definitions of mean diameters for polydisperse suspensions (Allen, 1997)

Średnia średnica	Dla cząstek sferycznych		Dla cząstek niesferycznych	
	Oznaczenia	Sposób wyliczenia	Oznaczenia	Sposób wyliczenia
Liczby cząstek i ich długości	$D(1,0)$	$\frac{\sum_i n_i d_i}{N}$	X_{NL}	$\frac{\sum_i n_i x_i}{N}$
Liczby cząstek i ich powierzchni	$D(2,0)$	$\sqrt{\frac{\sum_i n_i d_i^2}{N}}$	X_{NS}	$\sqrt{\frac{\sum_i n_i S_i}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_i n_i x_i^2}{N}}$
Liczby cząstek i ich objętości	$D(3,0)$	$\sqrt[3]{\frac{\sum_i n_i d_i^3}{N}}$	X_{NV}	$\sqrt[3]{\frac{\sum_i n_i V_i}{N}} = \sqrt[3]{\frac{\sum_i n_i x_i^3}{N}}$
Objętości i powierzchni	$D(3,2)$	$\frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2}$	X_{SV}	$\frac{\sum_i n_i V_i}{\sum_i n_i S_i} = \frac{\sum_i n_i x_i^3}{\sum_i n_i x_i^2}$
Moment masy Moment objętości	$D(4,3)$	$\frac{\sum_i n_i d_i^4}{\sum_i n_i d_i^3}$	$X_{VM} = X_{WM}$	$\frac{\sum_i n_i M_i}{\sum_i n_i V_i} = \frac{\sum_i n_i x_i^4}{\sum_i n_i x_i^3}$

Oznaczenia: n_i – liczba cząstek o średnicy d_i , (wymiarze x_i), powierzchni S_i , objętości V_i lub masie M_i ; N – całkowita liczba cząstek

4. Metodyka badań

Próby opadu deszczu i śniegu oraz spływów z dachów zbierano na stanowiskach badawczych zlokalizowanych w Strzelinie oraz we Wrocławiu w dzielnicy Zalesie. Do analizy pobierano próby z kilkugodzinnych opadów bez zachowania stałego kroku czasowego.

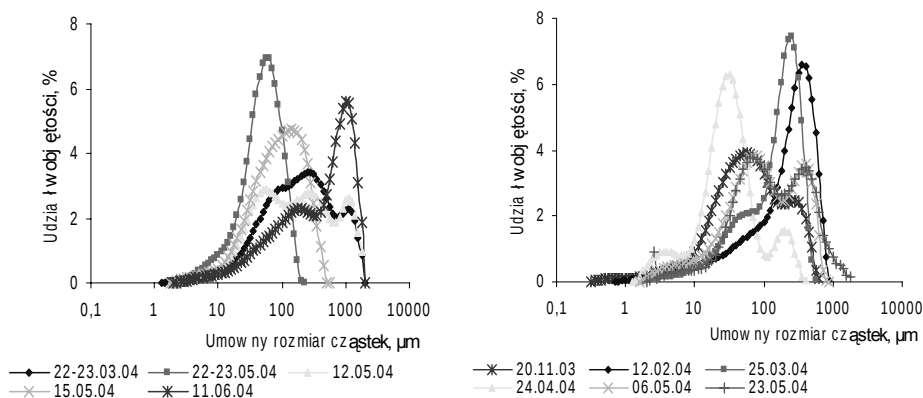
wego, co było związane z losowością występowania zjawisk opadowych. W Strzelinie okres poboru prób trwał od listopada 2003 r. do lipca 2004 r., a we Wrocławiu od lipca 2003 r. do lipca 2004 r. Pobór śniegu odbywał się, w miarę możliwości, na wysokości 4-5 cm nad ziemią, aby uchronić próbę przed obecnością zanieczyszczeń zebranych bezpośrednio z powierzchni ziemi. Deszcz był przechwytywany przez specjalnie przygotowane płaskie naczynia lub folie wyścielające zagłębienia terenu o dostatecznie dużej powierzchni, która umożliwiała zebranie próby o wymaganej objętości 700-800 dm³.

Wybór punktów pomiarowych zlokalizowanych w różnych miastach oraz pobór prób w różnych porach roku miał na celu określenie zmienności czasowej i przestrzennej składu granulometrycznego opadów atmosferycznych. Dodatkowo na miejsca poboru prób wybrano tereny o zróżnicowanym oddziaływaniu antropogenicznym. Punkt poboru prób w Strzelinie znajdował się na terenie prywatnej posesji w odległości 100 m od drogi dojazdowej. Punkt kontrolny we Wrocławiu usytuowany był w bezpośrednim sąsiedztwie Parku Szczytnickiego.

Rozkłady wielkości cząstek zawiesin oraz ich średnie średnice wyznaczono w granulometrze laserowym Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd. z zakresem pomiarowym od 0,02 do 2000 µm.

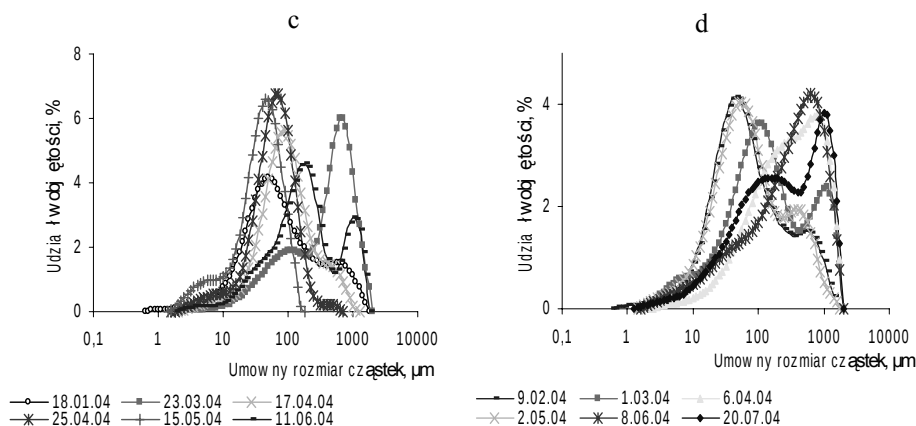
5. Wyniki badań

Wybrane rozkłady wielkości cząstek zawiesin występujące w opadach deszczu i spływach z powierzchni dachu przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2. Przedstawione rozkłady funkcji $V(d_i)$ przybierają zarówno formy rozkładów jedno jak i wielomodalnych.



Rys. 1. Rozkłady wielkości cząstek zawiesin w opadach deszczu zebranych na stanowisku pomiarowym w Strzelinie (a) i we Wrocławiu (b)

Fig. 1. Particle size distribution of suspensions occurring in rain water samples collected on measurement post in Strzelin (a) and Wrocław (b)



Rys. 2. Rozkłady wielkości cząstek zawiesin w spływach zebranych na stanowisku pomiarowym w Strzelinie (c) i we Wrocławiu (d)

Fig. 2. Particle size distribution of suspensions occurring in roof runoff samples collected on measurement post in Strzelin (c) and Wrocław (d)

W większości prób wód opadowych zauważono, że największe udziały procentowe w objętości wszystkich cząstek stanowią cząstki o zastępczych średnicach od 50 do 200 μm. W niektórych próbach udział tych frakcji stanowił nawet 40-45% objętości wszystkich cząstek zastępczych. Na stanowisku we Wrocławiu, zarówno w opadach deszczu jak i w spływach z dachu, wzrastała liczba cząstek o średnicach zastępczych większych od 500 μm. Taką tendencję obserwowano przede wszystkim w miesiącach wiosennych i letnich. Wzrost liczby cząstek o dużych średnicach należy wiązać z lokalizacją stanowiska pomiarowego. Miejsce to mogło przyczynić się do występowania zwiększonych ilości pyłów pochodzenia roślinnego w okresie wegetacji drzew, krzewów i roślin zielnych, które mogły przedostawać się do wód opadowych.

Wyniki badań składu granulometrycznego przedstawiające wartości najmniejszych i największych zidentyfikowanych zastępczych średnic sferycznych oraz wartości średnic odpowiadających medianie a także percentylowi 10% i 90% określonych na podstawie funkcji $V(d_i)$ zestawiono w tabeli 2 i 3.

Przedstawione na rysunkach 2 i 3 wielkości średnich średnic $D(3,2)$ i $D(4,3)$ ustalonych dla zawiesin w opadach i spływach zebranych w Strzelinie i Wrocławiu wykazywały dużą zmienność. Podobne wyniki uzyskano dla średnic $D(1,0)$, $D(2,0)$ i $D(3,0)$. Wartości median średnic $D(3,2)$ i $D(4,3)$ dla opadów i spływów z dachów były ze sobą porównywalne. Oznacza to, że skład granulometryczny zawiesin w opadach i spływach był zbliżony i zależał głównie od lokalizacji punktu pomiarowego. Natomiast z zestawionych w tabeli 4 danych przedstawiających parametry statystyczne zbiorów wyników badań objętości zawiesin w opadach deszczu, śniegu i spływach z dachów wynika, że obecność zawiesin w wodach opadowych zależy głównie od rodzaju opadu, z którego one powstają, a w mniej-

szym stopniu od charakterystyki stanowiska pomiarowego. W spływach z dachów obserwowano w porównaniu do opadów większą objętość zawiesin, głównie tych o większym wymiarze cząstek, które najprawdopodobniej pochodziły z zanieczyszczeń zlokalizowanych na powierzchni dachu w czasie pogody bezdeszczowej. Wartości obliczonych median objętości zawiesin w próbach wód opadowych wykazywały niewielkie różnice pomiędzy stanowiskami pomiarowymi.

Tab. 2. Wyniki badań składów granulometrycznych ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach deszczu i śniegu oraz w spływach z dachu zebranych we Wrocławiu

Tab. 2. Grain composition measurement results obtained on the base of $V(d_i)$ function for rain water, snow water and roof runoff collected in Wrocław

Kod próby	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek w μm , ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
W1	19.06.03	D	1,59	30,48	339,88	931,53	1782,50
W2	02.07.03	D	0,40	7,31	224,08	1061,77	1782,50
W5	12.02.04	D	0,80	46,16	321,49	623,16	893,37
W6	25.03.04	D	1,78	29,23	180,34	382,68	563,68
W7	24.04.04	D	1,42	27,41	123,97	323,30	399,05
W9	10.05.04	D	1,78	13,07	62,69	188,79	355,66
W12	02.06.04	D	2,00	23,98	126,39	1155,82	1782,50
W13	20.07.04	D	1,42	9,69	124,56	1093,23	1782,50
W15	28.02.04	Ś	1,59	11,14	92,73	483,45	1782,50
SW1	9.02.04	KS	1,00	19,81	66,89	299,84	1262,00
SW2	23.02.04	KS	1,59	13,30	43,37	115,10	317,00
SW5	24.03.04	KS	0,45	5,99	107,05	297,04	632,00
SW10	17.05.04	KS	1,59	20,83	121,39	253,67	502,00
SW11	2.06.04	PS	1,78	29,05	149,96	383,01	1782,50
SW12	2.06.04	KS	1,78	16,44	54,98	128,75	224,00
SW13	8.06.04	PS	1,78	27,11	334,93	1110,13	1782,50
SW14	9.06.04	PS	3,56	65,62	420,99	1148,52	1782,50

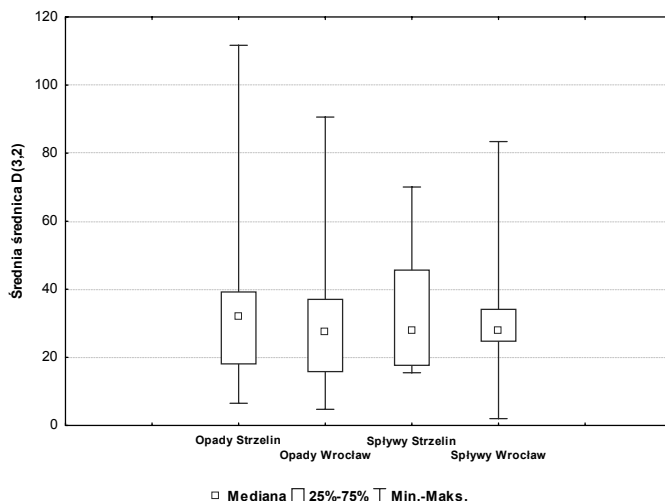
Oznaczenia: D-opady deszczu, Ś-opady śniegu, PS -pierwszy spływ, KS -kolejny spływ

Tab. 3. Wyniki badań składów granulometrycznych ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach deszczu i śniegu oraz w spływach z dachu zebranych w Strzelinie

Tab. 3. Grain composition measurement results obtained on the base of $V(d_i)$ function for rain water, snow water and roof runoff collected in Strzelin

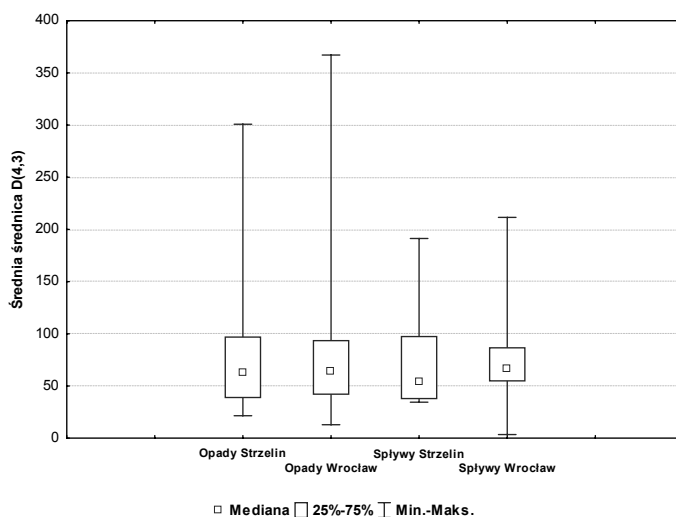
Kodpróby	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek w μm ., ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
ST1	22.03.04	D	1,46	30,76	159,21	528,50	1782,50
ST2	23.05.04	D	2,52	17,74	53,08	113,71	200,00
ST3	12.05.04	D	2,00	20,51	91,75	409,45	1782,50
ST4	15.05.04	D	2,00	25,07	107,87	313,52	502,00
ST5	11.06.04	D	2,24	54,84	767,67	1498,24	1782,50
ST6	18.01.04	Ś	0,63	13,60	52,01	230,82	632,00
ST7	30.01.04	Ś	2,52	90,99	526,34	1249,54	1782,50
ST8	09.02.04	Ś	0,63	15,77	53,57	238,16	796,00
ST9	11.02.04	Ś	1,59	35,86	240,95	577,44	1125,00
ST10	23.02.04	Ś	0,63	29,86	215,53	399,27	564,00
SS1	18.01.04	KS	0,79	17,47	61,91	329,58	1782,50
SS2	10.03.04	KS	0,56	19,83	115,44	492,84	632,00
SS3	23.03.04	KS	2,24	62,82	594,93	1235,51	1782,50
SS4	17.04.04	KS	2,24	28,93	94,12	390,88	1096,00
SS5	25.04.04	KS	1,78	20,54	63,09	142,09	632,00
SS6	12.05.04	KS	1,42	6,51	34,75	88,16	502,00
SS7	15.05.04	KS	1,59	8,45	39,07	87,56	159,00

Oznaczenia: D-opady deszczu, Ś-opady śniegu, KS -kolejny spływ



Rys.3. Porównanie wartości średnich średnic $D(3,2)$ dla opadów i spływów z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego w Strzelinie i we Wrocławiu

Fig.3. Comparison of mean diameter $D(3,2)$ values obtained for rain water and roof runoff results on measurement post located in Strzelin and Wrocław



Rys.4. Porównanie wartości średnich średnic $D(4,3)$ dla opadów i spływów z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego w Strzelinie i we Wrocławiu

Fig.4. Comparison of mean diameter $D(4,3)$ values obtained for rain water and roof runoff results on measurement post located in Strzelin and Wrocław

Tab. 4. Charakterystyka statystyczna zbiorów wyników badań objętości zawiesin w opadach deszczu, śniegu i spływach z dachów

Tab. 4. Statistic characterization of research results in relation to suspension's volume in rain water, snow, and roof runoff

Rodzaj próby	Objętość zawiesin w cm^3/dm^3				
	Mediana	Minimum	Maksimum	Percentyl 10%	Percentyl 90%
Opady deszczu-Strzelin	0,14	0,01	0,18	0,01	0,18
Opady deszczu-Wrocław	0,14	0,04	0,63	0,05	0,38
Opady śniegu-Strzelin	0,30	0,06	0,83	0,06	0,83
Opady śniegu - Wrocław	0,31	0,13	0,33	0,13	0,33
Spływy z dachów-Strzelin	0,23	0,05	2,27	0,05	2,27
Spływy z dachów-Wrocław	0,21	0,01	4,41	0,05	1,45

6. Podsumowanie

Skład granulometryczny zawiesin występujących w wodach opadowych charakteryzuje się dużą zmiennością. Na zróżnicowanie składu granulometrycznego ma wpływ przede wszystkim charakterystyka i położenie stanowiska pomiarowego, a w mniejszym stopniu pora roku, w której wody opadowe powstają. Natomiast występowanie w wodach opadowych danej objętości zawiesin zależy głównie od rodzaju opadu. Aby móc bardziej uogólnić ten wniosek potrzebna jest większa ilość badań wód opadowych pobranych na terenach o bardziej zróżnicowanym stopniu zagospodarowania, uprzemysłowienia i komunikacji. Takie badania częściowo już zostały zrealizowane przez autorów. Wyniki tych badań są tematem odrębnych publikacji.

Z uwagi na dużą zmienność składu granulometrycznego zawiesin w wodach opadowych, wyniki przeprowadzonych badań nie mogą być bezpośrednio przenoszone na inne tereny, dla których takie informacje są potrzebne. Wciąż najbardziej wiarygodną metodą oceny wielkości i ilości zawiesin w wodach opadowych w celu np. prawidłowego zaprojektowania urządzeń chłonnych, są badania wykonane dla danej lokalizacji.

Kontynuowanie badań składu granulometrycznego zawiesin występujących w wodach opadowych jest niezbędne, aby móc w przyszłości lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące z ich udziałem.

Bbliografia

- [1] Förster, J. Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water Science and Technology*, 1996, 33 (6) 39-48
- [2] Viklander, M. Dissolved and particle-bound substances in urban snow. *Water Science and Technology*, 1999, 39 (12) 27-32
- [3] Zobrist, J., Müller, S.R., Ammann, A., Mottier, V., Ochs, M., Schoenenberger, R., Eugster, J. Quality of roof runoff for groundwater infiltration. *Water Resources*, 2000, 34 (5) 1455-1462
- [4] McCave, I. N. and Syvitski, J.P.M. Principles and methods of geological particle size analysis. Principles, methods and application of particle size analysis. Cambridge University Press 1991
- [5] Heinrich, S., Mirko Peglow, M., Henneberg, M., Drechsler, J., Mörl, L. Fluidized bed spray granulation: analysis of dynamic particle populations and heat and mass transfers. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium, 22-25 August 2004, vol. A.* 121-128, São Paulo, Brazil 2004
- [6] Afoakwa, E.O., Paterson, A., Fowler, M. Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate. *European Food Research and Technology*, 2007, 102 (7) 1-10
- [7] Allen, T. Particle size measurement. Vol.1 - Powder sampling and particle size measurement. 5th ed. Chapman and Hall Ltd., London 1997

