



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

BADANIA SYSTEMOWE
Inżynieria Środowiska

METODY I TECHNIKI OPTYCZNE W BADANIACH ZAWIESIN



Janusz Łomotowski
Ewa Burszta-Adamiak
Magdalena Kęszycka
Zdzisław Jary

Warszawa 2008



**METODY I TECHNIKI OPTYCZNE
W BADANIACH ZAWIESIN**

**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Seria: BADANIA SYSTEMOWE, tom 58

Redaktor naukowy: prof. Jakub Gutenbaum

Podseria: Inżynieria Środowiska

Warszawa 2008

METODY I TECHNIKI OPTYCZNE W BADANIACH ZAWIESIN

**Janusz Łomotowski
Ewa Bursza-Adamiak
Magdalena Kęszycka
Zdzisław Jary**

Publikacja wydana ze środków projektu badawczego MINISTERSTWA NAUKI i SZKOLNICTWA WYŻSZEGO: nr R 11 001 01.

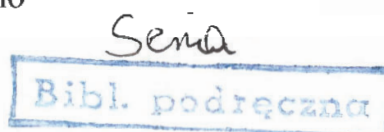
W pracy przedstawiono podstawy działania przyrządów stosowanych do badania zawiesin opartych o dyfrakcję światła. Zaprezentowano sposoby opracowywania wyników badań uzyskiwanych z granulometru laserowego. Praca zawiera oryginalne wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin w wodach opadowych, powierzchniowych, ściekach surowych i oczyszczonych oraz osadach czynnych. Wykazano, że instrumentalne badania zawiesin z wykorzystaniem dyfrakcji światła zwiększają zasób informacji o tych, tak ważnych, a rzadko badanych analitycznie domieszkach wód naturalnych i ścieków. Granulometry laserowe pozwalają poznać skład cząsteczkowy zawiesin oraz ich budowę przestrzenną, dzięki identyfikacji wymiaru fraktalnego. Badania z użyciem granulometrów laserowych powinny w większym stopniu być prowadzone przy monitoringu jakości wód naturalnych i technologicznych, badaniach ścieków surowych i oczyszczonych oraz osadów ściekowych.

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Metzger

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Dr inż. hab. Maria Żygadło



45903

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2008

Instytut Badań Systemowych PAN
Newelska 6, PL 01-447 Warsaw

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw IBS PAN
e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl

ISBN 978-83-89475-14-5

ISSN 0208-8029

Druk i oprawa: ARTPRESS, tel. 052 354 95 10

WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

5.1. Skład granulometryczny zawiesin w opadach deszczu i śniegu

5.1.1. Cel badań

Podczas opadów atmosferycznych odbiorniki naturalne (grunt, cieki wodne lub zbiorniki) oraz systemy kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej są obciążane zanieczyszczeniami wnoszonymi wraz z wodami opadowymi. Zanieczyszczenia występujące w opadach deszczu i śniegu pochodzą bezpośrednio z atmosfery oraz są spłukiwane z powierzchni roślin i innych obiektów. Zmiany ilościowe i jakościowe tych zanieczyszczeń zależą m.in. od stopnia zanieczyszczenia atmosfery, charakterystyki zjawiska opadowego (czas trwania opadu, jego intensywność, długość okresu suszy poprzedzającego opad), zjawisk meteorologicznych (temperatura powietrza, prędkość i kierunek wiatru, pora roku, klimat) oraz od położenia miejsca pomiarowego. Dotychczasowe badania przeprowadzane przez Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska (PIOŚ) w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska wykazują, że stopień zanieczyszczenia opadów charakteryzuje się dużą sezonowością, szczególnie widoczną dla zanieczyszczeń powstających w znacznym stopniu podczas spalania paliw do celów grzewczych (od października do marca). W okresie pozagrzewczym opady są zanieczyszczane zawiesinami organicznymi, np. pyłkami roślin, pojawiającymi się w większych stężeniach w okresie wegetacji roślin. Badania opadów najczęściej obejmują ich skład chemiczny: stężenia siarczanów, chlorków, azotynów, azotanów, itp. oraz wybrane wskaźniki, np. suchą pozostałość, odczyn, przewodność elektrolityczną (Förstera 1996, 1998; Viklandera 1999; Zobrista i in. 2000). Nie prowadzi się badań składu granulometrycznego zawiesin obecnych w tych wodach.

Wzrost zainteresowania uziarnieniem cząstek pozostających w zawieszeniu jest podyktowany potrzebą posiadania takich informacji na etapie projektowania urządzeń służących do infiltracji wód opadowych.

Brak powszechnie dostępnych informacji o składzie granulometrycznym zanieczyszczeń występujących w wodach opadowych zachęcił autorów tej publikacji do przeprowadzenia tego typu analiz.

5.1.2. Lokalizacja punktów poboru prób

Próby opadu deszczu i śniegu zbierano na dziesięciu stanowiskach badawczych zlokalizowanych na terenie województwa dolnośląskiego, opolskiego i śląskiego w miejscowościach: Bielawa, Strzelin, Wrocław (w dzielnicach: Zalesie, Złotniki, Strachowice i Kuźniki), Kietrzu i Raciborzu. Do analizy pobierano próby z kilkugodzinnych opadów deszczu lub śniegu bez zachowania stałego kroku czasowego, co było związane z losowością występowania zjawisk opadowych. We Wrocławiu okres poboru prób trwał od lipca 2003 r. do lipca 2004 r. na stanowisku pomiarowym położonym w dzielnicy Zalesie oraz od kwietnia 2004 r. do marca 2005 r. w pozostałych dzielnicach miasta, w Bielawie i Strzelinie od listopada 2003 r. do lipca 2004 r., a w Kietrzu i Raciborzu od stycznia do maja 2004 r. W ramach badań wykonywano także oznaczenia składu granulometrycznego zawieszin deszczówki odprowadzanej rynnami z dachów w Strzelinie i Wrocławiu w dzielnicy Zalesie w tych samych okresach badawczych, w których pobierano do analizy opad atmosferyczny.

Wybór kilku punktów pomiarowych zlokalizowanych w różnych miastach lub ich częściach 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.

Stanowisko pomiarowe w Bielawie było zlokalizowane na terenie osiedla mieszkaniowego z zabudową blokową, w odległości ok. 500 m od zakładu przemysłu maszynowego. Punkt poboru prób w Strzelinie znajdował się na terenie prywatnej posesji, w odległości 100 m od drogi dojazdowej.

Punkt kontrolny na wrocławskim osiedlu Zalesie usytuowany był w bezpośrednim sąsiedztwie Parku Szczytnickiego. Brano pod uwagę możliwość występowania w okresie wegetacji drzew, krzewów i roślin zielnych zwiększonych ilości pyłów pochodzenia roślinnego. Następny wrocławski punkt kontrolny zlokalizowany był na osiedlu Złotniki, w odległości około 10 km od centrum miasta, w pobliżu domków jednorodzinnych, które są ogrzewane w większości kotłami do spalania węgla, koksu i drewna. Trzeci punkt zlokalizowany był w dzielnicy Starachowice, gdzie istnieje rozproszona zabudowa jednorodzinnych domków, brak jest zakładów przemysłowych

mogących bezpośrednio wpływać na zawartość pyłów w powietrzu, ale w pobliżu wrocławskiego lotniska, które mogło mieć wpływ na ilość pyłów w powietrzu. Ostatni z punktów pomiarowych we Wrocławiu znajdował się na osiedlu Kuźniki, w pobliżu domów mieszkalnych, w sąsiedztwie ulic o dużym obciążeniu ruchem samochodowym oddalonym od centrum miasta o około 5 km.

Kolejne punkty pomiarowe były zlokalizowane w województwie opolskim w powiecie głubczyckim w mieście Kietrz. Na terenie miasta i w jego okolicy brak jest dużych obiektów przemysłowych emitujących zanieczyszczenia do atmosfery. Głównym źródłem pyłów są użytki rolne. Jeden z punktów poboru wód opadowych znajdował się na terenie osiedla domków jednorodzinnych, z gęstą zabudową mieszkalną. Znaczący jest tutaj fakt, iż mieszkania opalane są przy wykorzystaniu pieców węglowych, które emitują pokaźne ilości zanieczyszczeń gazowych, tj. dwutlenku i tlenku węgla, tlenków siarki oraz zanieczyszczeń pyłowych. Drugi punkt umiejscowiono poza miastem, na terenach użytkowanych rolniczo, położonych w odległości około 1,5 km od szlaków komunikacyjnych i zabudowań mieszkalnych. Na rozpatrywanym obszarze dominują wiatry południowe i południowo-zachodnie, które przynoszą zanieczyszczenia transgraniczne z ośrodków przemysłowych zlokalizowanych na terytorium Czech, co mogło mieć wpływ na skład granulometryczny wód opadowych.

Dwa punkty poboru prób znajdowały się w Raciborzu, w województwie śląskim. W Raciborzu znajduje się szereg zakładów o znacznej uciążliwości dla środowiska naturalnego. Pierwszy punkt znajdował się na terenie parku miejskiego w pobliżu centrum Raciborza o zwartej zabudowie budynków mieszkalnych w bliskim sąsiedztwie głównych ulic miasta. Ostatni punkt poboru prób znajdował się w odległości 600 m od Zakładów Chemii Gospodarczej „Henkel” i około 2 km od centrum miasta, z dala od głównych arterii komunikacyjnych, na terenie z luźną zabudową domów jednorodzinnych, działkami pracowniczymi oraz obiektami handlowymi.

Na Rysunku 41 przedstawiono fotografie wykonane w miejscach poboru opadów deszczu i śniegu oraz spływów z dachów.



Rysunek 1. Fotografie wykonane w punktach poboru prób opadów deszczu i śniegu a) Bielawa, osiedle XXV-lecia; b) Strzelin, ul. Jana Pawła II c) Wrocław-Zalesie d) Wrocław-Złotniki; e) Wrocław-Strachowice; f) Wrocław-Kuźniki, g) Kietrz, prywatna posesja; h) Kietrz, teren łąki; i) Racibórz, centrum, j) Racibórz w pobliżu Zakładów Chemicznych Henkel

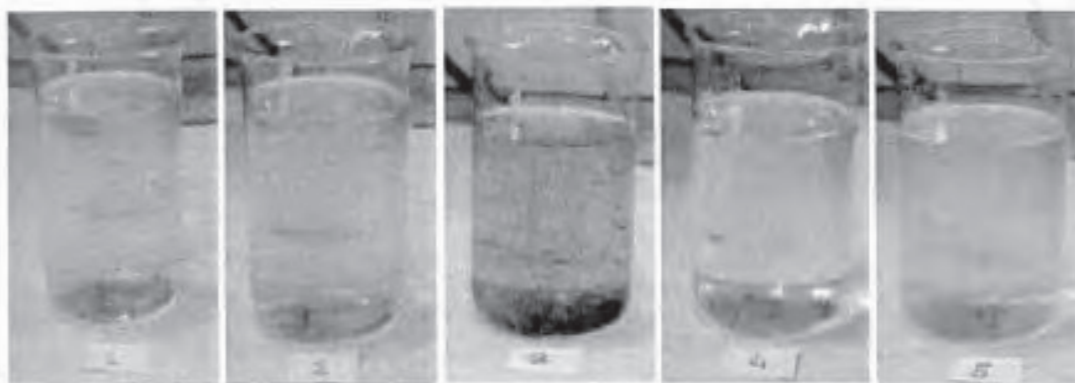
5.1.3. Sposób poboru i przechowywania próbek

Każdorazowo do analiz granulometrycznych zbierano 700-800 ml wody. Niejednokrotnie zebranie takiej objętości próby pociągało za sobą konieczność zbierania opadów przez okres kilku dni, gdyż nie zawsze opady były tak intensywne, aby można było w krótkim czasie pozyskać zadowalającą ilość wody.

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.

Wody opadowe po zebraniu zlewane były do plastikowych pojemników uprzednio wypłukanych i wyparzonych. Śnieg roztapiano w temperaturze pokojowej. Zebrane próby przechowywane były w lodówce w temperaturze 5°C przez okres nie dłuższy niż dwa dni i transportowane w zamkniętych pojemnikach termoizolacyjnych. Takie zabiegi miały na celu maksymalną ochronę próbek przed zanieczyszczeniami obcego pochodzenia. Wygląd przykładowych prób przedstawiono na Rysunku 42.



Rysunek 2. Wygląd wybranych prób deszczu i spływów z dachów
Od lewej: próba deszczu z dnia 11.06.2004 ze Strzelina z ul. Jana Pawła II;
spływ z rynny z dachu pokrytego dachówką z dnia 11.06.2004 ze Strzelina
z ul. Jana Pawła II; spływ z rynny z dachu pokrytego papą pobrany w dniu
9.06.2004 we Wrocławiu na ul. Dicksteina; deszcz z dnia 9.06.2004 pobrany
w Bielawie na Oś. XXV-lecia; deszcz pobrany w dniu 10.04.2004 w Raciborzu
niedaleko zakładów chemicznych „Henkel”

5.1.4. Wyniki badań opadów deszczu i śniegu

W Tabelach 12-31 przedstawiono zbiorcze wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin w opadach deszczu i śniegu.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Złotniki

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
L1	20.04.04	deszcz	2,52	32,33	103,94	1266,07	1782,50
L2	10.07.04	deszcz	0,45	13,72	103,48	387,38	1782,50
L3	16.10.04	deszcz	1,78	27,13	654,33	1344,10	1782,50
L4	05.01.05	deszcz	0,55	10,60	47,44	132,94	275,00
L5	12.02.05	deszcz	1,26	22,33	138,29	299,44	399,05
L6	16.02.05	deszcz	0,40	9,54	67,06	136,15	208,00
L7	21.02.05	śnieg	1,26	4,24	184,55	286,61	417,00
L8	24.02.05	śnieg	0,95	3,37	46,33	194,65	479,00
L9	07.03.05	śnieg	0,36	23,20	176,99	270,76	363,00

Tabela 2. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Złotniki oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
L1	5,29	8,18	12,66	13,92	22,59	40,32	72,70	2,06
L2	0,88	1,12	1,41	1,96	2,91	6,00	21,80	1,69
L3	3,49	4,30	5,29	6,39	8,65	14,15	39,13	1,44
L4	1,05	1,62	2,49	3,21	5,62	12,67	29,34	1,90
L5	2,74	4,06	6,02	7,96	13,56	30,54	82,01	1,89
L6	0,99	1,43	2,06	2,73	4,52	9,92	29,91	1,71
L7	2,54	2,82	3,13	3,50	4,10	5,37	14,63	2,91
L8	2,40	2,81	3,29	3,88	4,94	7,42	23,67	2,86
L9	0,52	0,72	1,01	1,36	2,19	4,77	13,98	2,86

Tabela 3. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Zalesie

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
W1	19.06.03	deszcz	1,59	30,48	339,88	931,53	1782,50
W2	02.07.03	deszcz	0,40	7,31	224,08	1061,77	1782,50
W3	03.07.03	deszcz	1,59	51,32	483,29	1224,81	1782,50
W5	12.02.04	deszcz	0,80	46,16	321,49	623,16	893,37
W6	25.03.04	deszcz	1,78	29,23	180,34	382,68	563,68
W7	24.04.04	deszcz	1,42	27,41	123,97	323,30	399,05
W8	06.05.04	deszcz	1,78	18,48	96,00	406,75	893,37
W9	10.05.04	deszcz	1,78	13,07	62,69	188,79	355,66
W10	15.05.04	deszcz	1,78	29,24	182,49	879,64	1782,50
W11	23.05.04	deszcz	2,24	53,70	192,31	495,38	1782,50
W12	02.06.04	deszcz	2,00	23,98	126,39	1155,82	1782,50
W13	20.07.04	deszcz	1,42	9,69	124,56	1093,23	1782,50
W15	28.02.04	śnieg	1,59	11,14	92,73	483,45	1782,50

Tabela 4. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Zalesie oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny D
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	
W1	3,33	4,59	6,32	7,85	12,05	22,99	63,59	2,18
W2	0,80	1,09	1,47	1,78	2,65	4,75	12,81	2,04
W3	3,63	5,23	7,54	9,75	15,98	33,87	93,45	2,07
W5	2,26	3,17	4,45	5,85	9,42	19,97	59,40	1,69
W6	3,90	6,01	9,25	11,66	20,16	43,94	112,10	2,17
W7	3,81	5,52	8,00	10,42	17,22	37,04	91,28	1,96
W9	4,41	6,26	8,90	10,26	15,66	27,52	64,41	1,84
W10	4,46	6,40	9,17	10,79	16,77	30,68	67,71	1,93
W11	6,12	9,91	16,04	20,72	38,12	90,60	237,00	2,07
W12	4,47	6,51	9,50	12,85	21,80	50,02	367,12	1,93
W13	3,04	3,87	4,93	6,02	8,48	14,57	42,09	2,61
W14	1,41	2,11	3,16	3,71	6,02	11,47	25,16	1,92
W15	2,90	3,99	5,48	6,31	9,31	15,82	31,93	1,90

Tabela 5. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Strachowice

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
S1	20.04.04	deszcz	1,59	63,33	777,98	1464,75	1782,50
S2	02.07.04	deszcz	0,36	19,85	77,69	194,60	1124,68
S3	10.08.04	deszcz	0,40	21,19	100,52	1190,05	1782,50
S4	12.08.04	deszcz	0,55	19,63	89,68	937,40	1782,50
S5	17.08.04	deszcz	1,13	39,30	184,57	1117,54	1588,65
S6	20.08.04	deszcz	1,13	14,01	87,44	574,80	1588,65
S7	25.08.04	deszcz	1,42	32,59	118,15	389,46	1782,50
S8	27.08.04	deszcz	0,71	17,57	68,45	229,04	563,68
S9	19.11.04	deszcz	0,50	8,91	41,21	156,88	1588,65
S10	23.11.04	deszcz	0,45	8,21	31,80	109,01	251,79
S11	06.01.05	deszcz	1,00	5,30	69,87	189,53	251,79
S12	21.02.05	śnieg	1,00	2,29	29,88	113,01	251,79
S13	24.02.05	śnieg	1,00	2,41	17,23	80,58	251,79
S14	08.03.05	śnieg	0,25	6,13	49,55	227,51	355,66

Tabela 6. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Strachowice oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny D
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	
S1	3,57	4,64	6,03	7,15	10,11	16,95	41,99	1,58
S2	0,73	1,09	1,63	2,47	4,56	12,72	34,26	1,92
S3	0,74	1,04	1,47	2,20	3,81	9,87	28,46	1,85
S4	1,11	1,74	2,73	3,72	6,79	16,89	42,63	1,91
S5	3,19	5,08	8,09	9,98	17,65	38,49	81,09	1,98
S6	2,66	3,92	5,80	7,01	11,38	22,36	55,47	1,99
S7	3,02	4,48	6,64	9,36	16,48	40,91	93,59	1,91
S8	1,85	2,96	4,74	6,42	11,96	30,17	97,38	1,94
S9	1,28	2,18	3,72	4,44	8,27	18,41	64,42	2,18
S10	1,08	1,91	3,37	3,88	7,33	15,94	47,62	2,22
S11	3,28	3,99	4,85	6,52	9,20	17,44	83,96	1,25
S12	2,15	2,36	2,59	2,87	3,31	4,23	13,54	2,62
S13	2,18	2,47	2,80	3,19	3,85	5,29	15,88	2,61
S14	0,54	0,65	0,78	1,07	1,50	2,91	11,77	1,63

Tabela 7. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Kuźniki

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
K1	20.04.04	deszcz	2,50	27,01	82,43	1050,13	1782,50
K2	02.07.04	deszcz	1,78	36,98	279,92	787,06	1782,50
K3	09.07.04	deszcz	0,40	13,62	74,89	373,29	1782,50
K4	22.07.04	deszcz	0,40	6,66	107,68	761,66	1782,50
K5	29.07.04	deszcz	0,36	8,30	60,12	490,89	1782,50
K6	11.08.04	deszcz	1,13	28,07	175,35	1145,88	1782,50
K7	16.08.04	deszcz	0,40	4,24	33,09	326,45	1262,00
K8	22.08.04	deszcz	1,26	8,69	167,69	736,66	1782,50
K9	07.09.04	deszcz	0,32	15,29	57,44	333,26	1588,60
K10	16.09.04	deszcz	1,59	40,90	151,72	457,93	1416,00
K11	16.10.04	deszcz	0,40	7,15	174,50	861,82	1782,50
K12	28.10.04	deszcz	0,32	5,19	50,00	165,92	355,66
K13	10.11.04	deszcz	1,59	7,24	76,80	161,60	355,66
K14	18.11.04	deszcz	1,78	68,94	1082,70	1501,62	1782,50
K15	19.11.04	deszcz	1,26	4,32	94,04	132,20	251,79
K16	23.11.04	deszcz	0,36	29,30	134,22	336,55	502,38
K17	20.12.04	deszcz	0,50	14,71	69,10	144,04	251,79
K18	4.01.05	deszcz	0,50	11,84	91,30	185,65	251,79
K19	21.02.05	śnieg	0,32	0,89	47,80	98,27	224,40
K20	24.02.05	śnieg	0,32	10,81	65,09	220,21	355,66
K21	01.03.05	śnieg	0,36	14,47	66,54	325,38	632,46
K22	08.03.05	śnieg	0,30	11,61	63,33	152,22	316,98

W próbach deszczu ze Złotnik stwierdzono obecność cząstek zawiesin o wymiarach z przedziału 0,36 – 2000 μm . Cząstki zawiesiny w jesiennych, wiosennych i letnich opadach deszczu charakteryzowały się strukturą o niskiej wytrzymałości mechanicznej. W trakcie wykonywania pomiarów ulegały one rozbiciu, co uwidaczniało się wzrostem liczebności cząstek o małych średnicach. W śniegu stwierdzono cząstki o zastępczych średnicach sferycznych od 0,36 μm do 479 μm , przy czym największą część stanowiły cząstki o wymiarze do 200 μm . Cząstki obecne w śniegu były bardziej odporne na mechaniczne rozbijanie w czasie wykonywania pomiarów niż zawarte w opadach deszczu.

Tabela 8. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku Wrocław-Kuźniki oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
K1	5,72	8,49	12,61	15,22	24,84	48,93	285,59	2,03
K2	3,88	6,67	11,47	15,37	30,59	81,63	351,23	2,06
K3	0,72	1,04	1,52	2,75	5,37	19,01	138,53	1,87
K4	0,79	1,18	1,75	2,87	5,47	17,07	264,99	2,31
K5	0,63	0,88	1,24	2,21	4,14	13,90	159,85	1,76
K6	3,36	5,19	8,01	11,62	21,60	58,23	410,59	2,00
K7	0,84	1,12	1,49	2,16	3,47	8,10	100,85	1,89
K8	2,64	3,21	3,90	6,40	9,97	25,51	288,20	2,99
K9	0,61	0,96	1,53	2,68	5,64	20,76	116,67	1,98
K10	3,16	5,33	8,97	12,43	24,63	67,63	208,10	1,98
K11	0,64	0,86	1,14	2,19	4,05	14,39	330,75	1,91
K12	2,63	3,33	4,22	5,65	8,29	16,29	69,66	2,57
K13	3,24	4,11	5,22	7,14	10,61	21,54	80,26	2,99
K14	3,34	3,95	4,66	10,20	17,83	68,23	936,98	2,71
K15	2,61	3,10	3,68	5,40	7,77	16,41	79,70	1,41
K16	0,59	0,91	1,39	3,01	6,82	33,37	161,98	1,79
K17	1,19	1,97	3,25	4,58	8,97	24,75	74,37	1,97
K18	2,31	3,27	4,63	6,57	11,10	26,58	95,29	2,34
K19	0,41	0,47	0,54	0,93	1,40	3,67	49,51	0,97
K20	0,61	0,85	1,18	2,20	4,17	14,77	92,23	1,81
K21	0,65	0,99	1,51	2,69	5,48	19,90	119,72	1,91
K22	0,60	0,78	1,00	1,95	3,50	12,26	73,69	1,72

W opadach deszczu zebranych do badań we Wrocławiu w dzielnicy Zalesie przy ulicy Dicksteina zaobserwowano, że w okresie zimowym największy udział w objętości zawiesin stanowiły cząstki do 300 μm , natomiast w okresie wiosennym znaczną część objętości prób stanowiły zawiesiny o średnicach zastępczych od 700 do 1000 μm . Najprawdopodobniej było to związane z obecnością pyłków roślinnych uwalnianych w czasie kwitnienia przez florę pobliskiego Parku Szczytnickiego w pobliżu którego był zlokalizowany punkt poboru opadów deszczu.

W punkcie kontrolnym we Wrocławiu-Strachowicach duży udział miały pyły pochodzenia naturalnego. W większości prób najmniejsze cząstki miały wymiar średnicy zastępczej bliski 1 μm , natomiast największe były bliskie granicy oznaczalności przyrządu, tj. 1783-2000 μm . W każdej z prób

zebranych na tym obszarze, cząstki większe od 1000 μm ulegały rozbiciu i zmniejszała się ich objętość w czasie trwania pomiarów. W wiosennych opadach struktura cząstek zawiesin o dużych średnicach zastępczych była bardziej trwała. Najmniejsze zmiany składu granulometrycznego w czasie wykonywania badań zaobserwowano w próbach deszczów jesiennych. W opadach z tego okresu największy udział w objętości wszystkich cząstek stanowiły cząstki o średnicach z przedziału 10-100 μm . Podobnie zachowywały się zawiesiny w próbkach śniegu.

W próbach deszczu pobieranych na stanowisku pomiarowym znajdującym się na osiedlu Kuźniki we Wrocławiu największą zawartość stanowiły cząstki o zastępczych średnicach sferycznych 70-100 μm . W kilku próbach nie stwierdzono cząstek o średnicach zastępczych powyżej 360 μm . W próbach, stwierdzono rozkłady dwumodalne o maksimach występujących przy średnicach 100 i 1000 μm . Opady zebrane na tym stanowisku, w przypadku gdy miały jednomodalny skład, charakteryzowały się cząstkami powyżej 1000 μm rozpadającymi się na mniejsze cząstki w czasie ich homogenizacji. W przypadku prób śniegu pobieranych na osiedlu Kuźniki we Wrocławiu najwięcej w objętości próby było zawiesin o rozmiarze do 100 μm , a cząstki o wielkości powyżej 550 μm nie były w tych opadach identyfikowane. Objętość cząstek najmniejszych, do 10 μm , nie przekraczała 2%.

Tabela 9. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku w Strzelinie

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
ST1	22.03.04	deszcz	1,46	30,76	159,21	528,50	1782,50
ST2	23.05.04	deszcz	2,52	17,74	53,08	113,71	200,00
ST3	12.05.04	deszcz	2,00	20,51	91,75	409,45	1782,50
ST4	15.05.04	deszcz	2,00	25,07	107,87	313,52	502,00
ST5	11.06.04	deszcz	2,24	54,84	767,67	1498,24	1782,50
ST6	18.01.04	śnieg	0,63	13,60	52,01	230,82	632,00
ST7	30.01.04	śnieg	2,52	90,99	526,34	1249,54	1782,50
ST8	09.02.04	śnieg	0,63	15,77	53,57	238,16	796,00
ST9	11.02.04	śnieg	1,59	35,86	240,95	577,44	1125,00
ST10	23.02.04	śnieg	0,63	29,86	215,53	399,27	564,00
ST11	28.02.04	śnieg	0,53	15,61	66,95	324,33	710,00
ST12	09.03.04	śnieg	0,40	19,24	85,40	253,14	1782,50

Tabela 10. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku w Strzelinie oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
ST1	3,24	5,04	7,83	9,66	16,69	35,54	79,37	1,99
ST2	6,62	9,60	13,92	14,58	21,65	33,65	58,83	2,10
ST3	4,22	6,18	9,05	10,46	16,47	29,96	65,90	1,98
ST4	4,84	7,53	11,72	13,45	22,44	42,96	95,79	2,05
ST5	5,85	8,30	11,78	14,25	22,25	42,01	99,77	1,97
ST6	1,42	2,34	3,87	4,59	8,24	17,54	36,49	2,04
ST7	8,23	12,64	19,43	26,14	46,59	111,68	300,80	1,92
ST8	1,33	2,33	4,07	4,77	9,03	20,05	39,03	2,07
ST9	3,34	4,96	7,36	9,64	16,37	36,44	97,94	1,84
ST10	1,75	2,59	3,84	5,00	8,44	18,57	45,30	1,76
ST11	1,32	2,14	3,48	4,32	7,82	17,61	38,80	1,92
ST12	0,64	0,84	1,11	1,67	2,69	6,52	21,48	1,78

W próbach deszczu zebranych w Strzelinie największy udział stanowiły cząstki do 300 μm w całym okresie badawczym, za wyjątkiem próby z dnia 23.05.04, w której przeważały cząstki o wymiarze średnic zastępczych mniejszych od 100 μm .

W próbach opadu śniegu pochodzących ze Strzelina największy udział procentowy w objętości zawiesin miały cząstki o rozmiarze do 400 μm . W kilku próbach deszczu i śniegu funkcja $V(d_i)$ była funkcją dwumodalną o maksimach dla zastępczych średnic sferycznych z przedziałów 100-200 μm i 800-1000 μm .

Tabela 11. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku w Bielawie

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
B1	24.04.04	deszcz	1,30	7,51	33,11	183,57	417,00
B2	25.04.04	deszcz	1,30	5,97	71,23	1425,20	2000,00
B3	02.05.04	deszcz	1,42	13,49	38,31	99,63	317,00
B4	12.05.04	deszcz	1,59	20,17	87,13	186,44	356,00
B5	09.06.04	deszcz	0,36	8,48	51,47	907,28	1782,50
B6	10.06.04	deszcz	0,40	9,99	53,00	185,73	399,00
B7	11.06.04	deszcz	0,36	4,71	70,71	306,74	1782,50
B8	12.06.04	deszcz	0,36	24,47	683,45	1471,06	1782,50
B9	02.07.04	deszcz	0,36	2,78	18,66	110,44	200,00
B10	03.04.04	deszcz	0,45	6,42	115,75	835,18	1416,00
B11	12.07.04	deszcz	0,40	6,14	47,14	170,21	356,00
B12	13.02.04	śnieg	0,56	10,23	53,83	188,85	1782,50
B13	11.03.04	śnieg	0,36	12,08	53,71	182,23	632,00

Tabela 12. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku w Bielawie oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
B1	3,08	4,07	5,37	6,25	8,89	14,72	30,21	1,75
B2	2,99	3,62	4,37	5,26	6,98	11,15	30,12	1,37
B3	4,73	7,03	10,45	10,66	16,00	24,52	42,69	2,03
B4	3,48	5,34	8,18	10,09	17,17	36,08	79,67	1,87
B5	0,82	1,26	1,93	2,42	4,16	8,95	21,13	1,80
B6	0,79	1,22	1,87	2,48	4,38	10,27	25,80	1,93
B7	0,72	0,96	1,29	1,61	2,40	4,46	13,71	1,50
B8	0,73	0,96	1,25	1,62	2,41	4,64	14,05	1,57
B9	0,75	1,01	1,37	1,66	2,46	4,44	11,29	1,23
B10	0,94	1,20	1,54	1,95	2,80	5,09	16,40	1,47
B11	0,81	1,15	1,62	2,14	3,47	7,43	21,22	1,65
B12	1,14	1,68	2,46	3,19	5,35	11,61	28,88	1,72
B13	0,66	1,05	1,69	2,31	4,34	11,14	27,36	1,85

Tabela 13. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych w Kietrze na stanowisku zlokalizowanym na łące

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
Ki5	19.03.04	deszcz	0,40	11,07	84,82	202,93	356,00
Ki6	26.03.04	deszcz	1,00	20,20	70,40	197,16	1782,50
Ki7	11.04.04	deszcz	2,00	31,22	130,16	567,02	1782,50
Ki8	20.04.04	deszcz	1,78	22,30	79,26	540,85	1782,50
Ki9	24.04.04	deszcz	2,00	20,30	174,66	982,39	1782,50
Ki15	16.02.04	śnieg	0,56	13,26	90,27	281,25	632,00
Ki16	23.02.04	śnieg	0,40	7,51	45,39	199,59	632,00
Ki17	01.03.04	śnieg	0,40	3,53	17,35	101,44	632,00
Ki18	06.03.04	śnieg	1,78	27,21	131,39	390,68	632,00
Ki19	13.03.04	śnieg	1,30	12,71	56,99	267,36	632,00

Tabela 14. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych w Kietrze na stanowisku zlokalizowanym na łące oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
Ki5	0,75	1,16	1,81	2,29	4,01	8,89	21,36	2,06
Ki6	2,23	3,64	5,94	7,23	13,01	28,47	59,29	2,01
Ki7	4,67	7,45	11,88	13,69	23,43	46,20	97,30	2,02
Ki8	4,12	6,12	9,11	10,60	17,00	31,75	63,82	1,97
Ki9	4,16	5,86	8,25	9,70	14,81	26,60	65,89	2,03
Ki15	1,13	1,62	2,32	3,06	5,03	10,89	28,26	1,75
Ki16	0,81	1,19	1,74	2,25	3,75	8,06	19,87	1,72
Ki17	0,88	1,20	1,66	2,03	3,08	5,74	13,50	1,68
Ki18	3,71	5,40	7,86	10,32	17,20	37,64	93,63	1,87
Ki19	3,00	4,12	5,68	6,88	10,42	19,12	43,79	2,05

Tabela 15. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych w Kietrze na stanowisku zlokalizowanym na prywatnej posesji

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
Ki1	19.03.04	deszcz	0,45	5,56	35,20	82,37	200,00
Ki2	26.03.04	deszcz	0,28	3,63	43,32	189,34	564,00
Ki3	07.04.04	deszcz	1,78	27,41	123,97	323,30	632,00
Ki4	20.04.04	deszcz	1,59	10,53	63,63	439,64	893,00
Ki10	12.02.04	śnieg	1,78	38,86	561,98	1227,24	1782,50
Ki11	23.02.04	śnieg	0,50	10,69	67,84	444,09	632,00
Ki12	01.03.04	śnieg	1,42	7,26	79,57	375,95	2000,00
Ki13	06.03.04	śnieg	2,24	28,77	151,45	425,68	796,00

Tabela 16. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych w Kietrze na stanowisku zlokalizowanym na prywatnej posesji oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny D
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	
Ki1	0,94	1,48	2,33	2,84	4,95	10,48	25,19	1,69
Ki2	0,58	0,74	0,95	1,18	1,70	3,04	8,26	1,90
Ki3	3,81	5,52	8,00	10,42	17,22	37,04	91,28	1,91
Ki4	3,38	4,49	5,97	7,23	10,59	18,76	45,07	1,72
Ki10	3,49	4,20	5,06	6,18	8,22	13,38	40,15	2,55
Ki11	1,16	1,76	2,69	3,28	5,53	11,35	26,84	1,85
Ki12	3,06	3,81	4,73	5,82	8,03	13,64	38,25	2,75
Ki13	4,79	7,30	11,14	13,17	21,84	42,81	99,84	2,11

Tabela 17. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych w Raciborzu na stanowisku w pobliżu Zakładów Chemicznych „Henkel”

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
Ra1	22.03.04	deszcz	0,28	7,38	51,03	174,07	399,00
Ra2	26.03.04	deszcz	0,36	5,97	55,69	256,78	564,00
Ra3	07.04.04	deszcz	1,59	21,96	96,65	246,24	632,00
Ra4	11.04.04	deszcz	1,78	28,99	161,79	966,92	1782,50
Ra5	24.04.04	deszcz	1,78	20,29	71,79	167,88	356,00
Ra9	16.02.04	śnieg	0,56	8,61	47,53	121,40	252,00
Ra10	23.02.04	śnieg	0,36	3,91	53,00	232,90	632,00
Ra11	01.03.04	śnieg	0,71	11,08	54,30	308,24	632,00
Ra12	06.03.04	śnieg	0,71	13,10	45,27	104,20	159,00
Ra13	13.02.04	śnieg	1,59	21,45	265,45	539,60	710,00

Tabela 18. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych w Raciborzu na stanowisku w pobliżu Zakładów Chemicznych „Henkel” oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
Ra1	0,57	0,80	1,11	1,53	2,51	5,65	16,43	1,72
Ra2	0,66	0,89	1,20	1,59	2,48	5,12	15,40	1,68
Ra3	3,03	4,47	6,60	8,44	14,09	30,06	69,80	1,77
Ra4	4,06	6,08	9,10	11,12	18,41	37,24	87,84	1,90
Ra5	4,21	6,48	9,99	11,42	18,83	35,48	71,90	1,99
Ra9	1,20	1,77	2,63	3,41	5,76	12,64	32,86	1,75
Ra10	0,75	1,11	1,65	1,83	2,86	4,97	12,26	2,31
Ra11	1,81	2,69	4,01	4,62	7,38	13,58	28,64	1,94
Ra12	1,55	2,52	4,12	5,01	9,01	19,74	42,27	2,09
Ra13	3,25	4,40	5,97	7,33	11,02	20,35	46,88	1,95

Tabela 19. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku w centrum Raciborza

Kod	Data poboru	Rodzaj opadu	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
			Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
Ra6	19.03.04	deszcz	0,45	6,30	35,81	101,36	2000,00
Ra7	26.03.04	deszcz	0,40	21,46	95,40	218,69	317,00
Ra8	07.04.04	deszcz	1,78	25,62	159,99	542,66	1782,50
Ra15	23.02.04	śnieg	1,42	37,24	186,82	417,85	2000,00
Ra16	01.03.04	śnieg	1,12	5,78	52,17	162,82	317,00
Ra17	06.03.04	śnieg	0,79	20,28	80,83	349,74	632,00
Ra18	14.03.04	śnieg	1,26	20,46	108,17	487,06	709,00

Tabela 20. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w opadach zebranych na stanowisku w centrum Raciborza oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
Ra6	1,07	1,75	2,86	3,32	5,85	11,98	27,56	1,76
Ra7	2,59	3,95	6,03	7,74	13,38	29,70	70,70	1,94
Ra8	4,75	7,17	10,83	12,60	20,53	38,93	92,98	2,01
Ra15	2,63	3,68	5,13	7,56	12,82	32,02	93,49	1,80
Ra16	2,88	3,57	4,42	5,49	7,58	12,97	37,21	1,55
Ra17	1,56	2,52	4,05	5,10	9,21	20,95	45,53	1,99
Ra18	2,63	4,14	6,54	7,53	12,75	24,86	52,25	2,06

Wysoki udział zawiesin o małych zastępczych średnicach stwierdzono w opadach deszczu w Bielawie, Kietrze i Raciborzu. Objętość cząstek o średnicach zastępczych do 200 μm dochodziła do 82% ogółu cząstek znajdujących się w próbach. W opadach śniegu z Bielawy najwięcej cząstek miało średnicę do 100 μm , przy czym cząstki o średnicy zastępczej do 50 μm stanowiły około 50%. We wszystkich analizowanych próbach opadów śniegu pobranych na stanowiskach pomiarowych w Raciborzu oraz Kietrze największy udział miały cząstki poniżej 200 μm . Stanowiły one wraz z cząstkami mniejszymi 70 – 80% objętości wszystkich cząstek.

W okresie wiosennym i letnim można było zaobserwować w opadzie znaczne ilości pyłów pochodzenia roślinnego. W okresie zimowym, uwi-

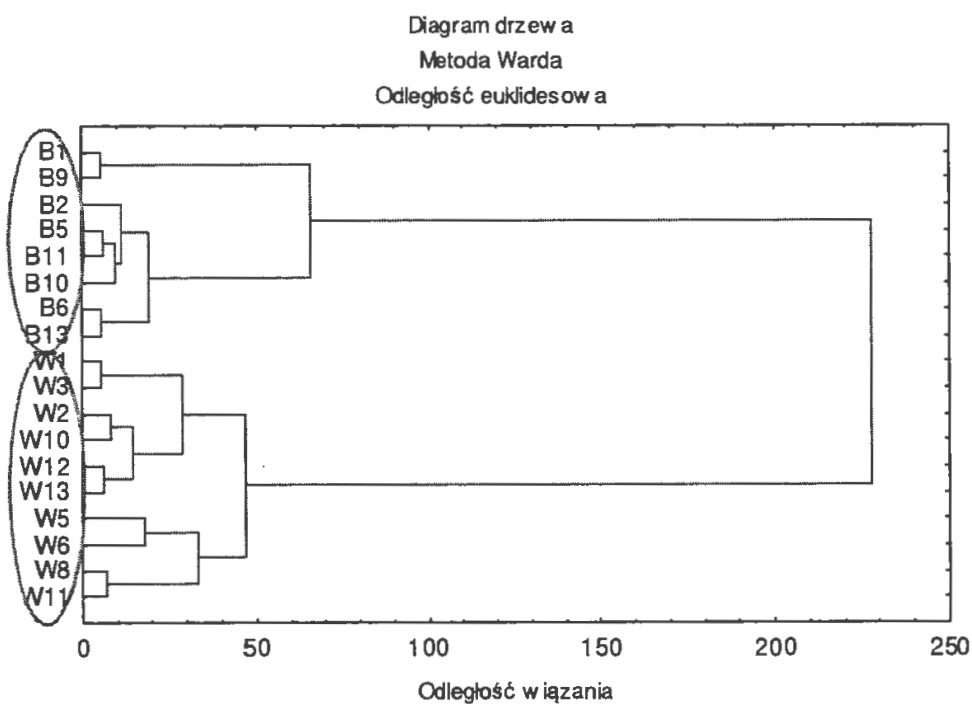
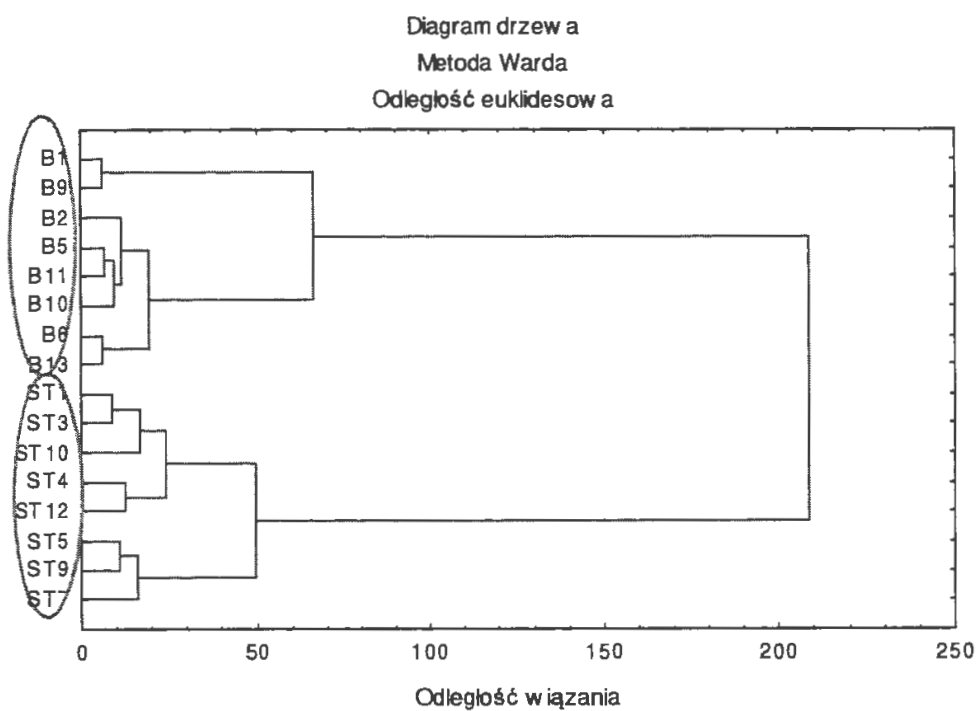
daczniał się wpływ okresu grzewczego na skład pyłów. W tym czasie do atmosfery emitowane są sadze i pyły kominowe. Duży wpływ tych pyłów zaobserwowano na stanowiskach Kuźniki i Złotniki we Wrocławiu. W dzielnicach Wrocławia Strachowice i Zalesie oraz w Kietrze na stanowisku zlokalizowanym na terenie łąki wpływ ten był znacznie mniejszy.

We wszystkich próbach wód opadowych (zarówno deszczu i śniegu) zauważono, że najmniejsze udziały procentowe w objętości wszystkich cząstek stanowią cząstki o zastępczych średnicach od 300 do 500 μm . W niektórych próbach udział tej frakcji stanowił zaledwie 3-4% objętości wszystkich cząstek zastępczych.

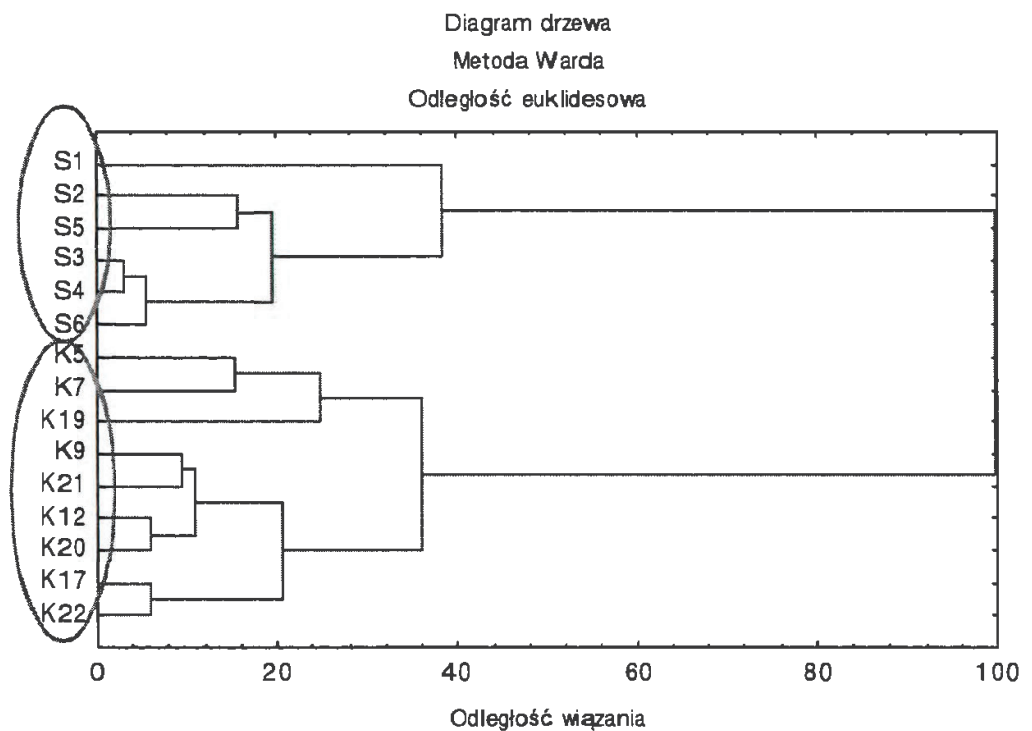
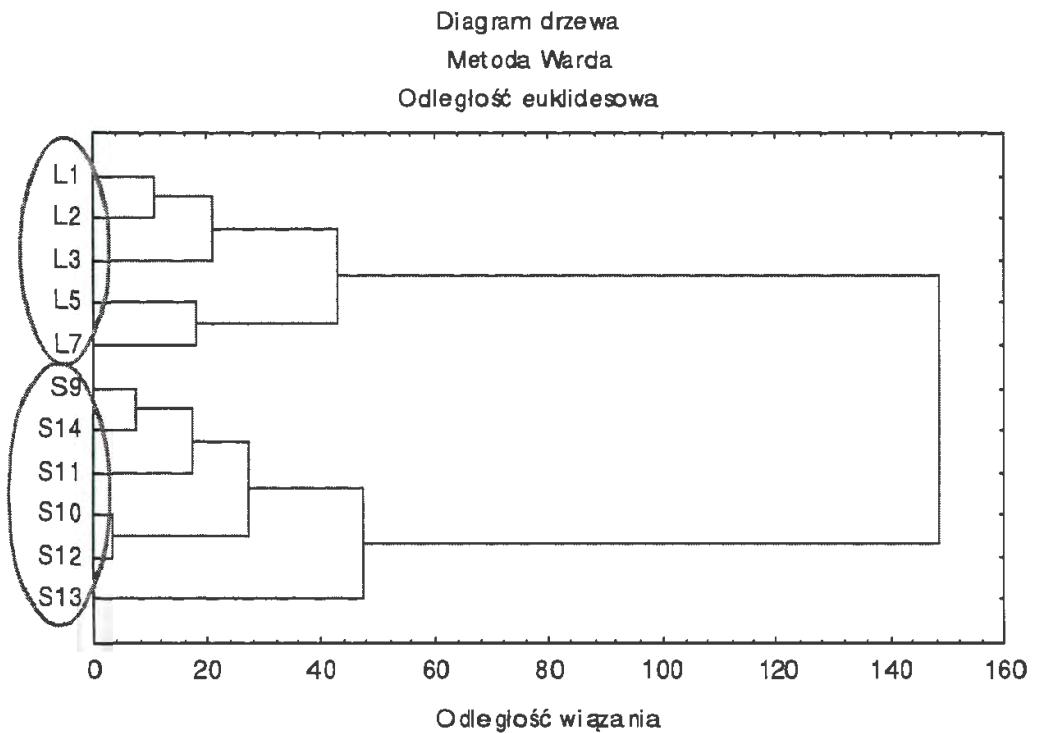
Na Rysunkach 44-46 przedstawiono wybrane wyniki analiz porównawczych składu granulometrycznego zawiesin zawartych w różnych próbach deszczu i śniegu z wykorzystaniem analizy skupień.

Analiza skupień wykazała, że skład granulometryczny zawiesin był zależny od miejsca poboru prób (Rysunek 43 i 44). W mniejszym stopniu zależał od pory roku. Jedynie dla opadów pochodzących ze Strzelina ten czynnik miał istotny wpływ na skład granulometryczny zawiesin (Rysunek 44). Na stanowisku we Wrocławiu-Zalesie istotnym czynnikiem był sezon grzewczy (Rysunek 45).

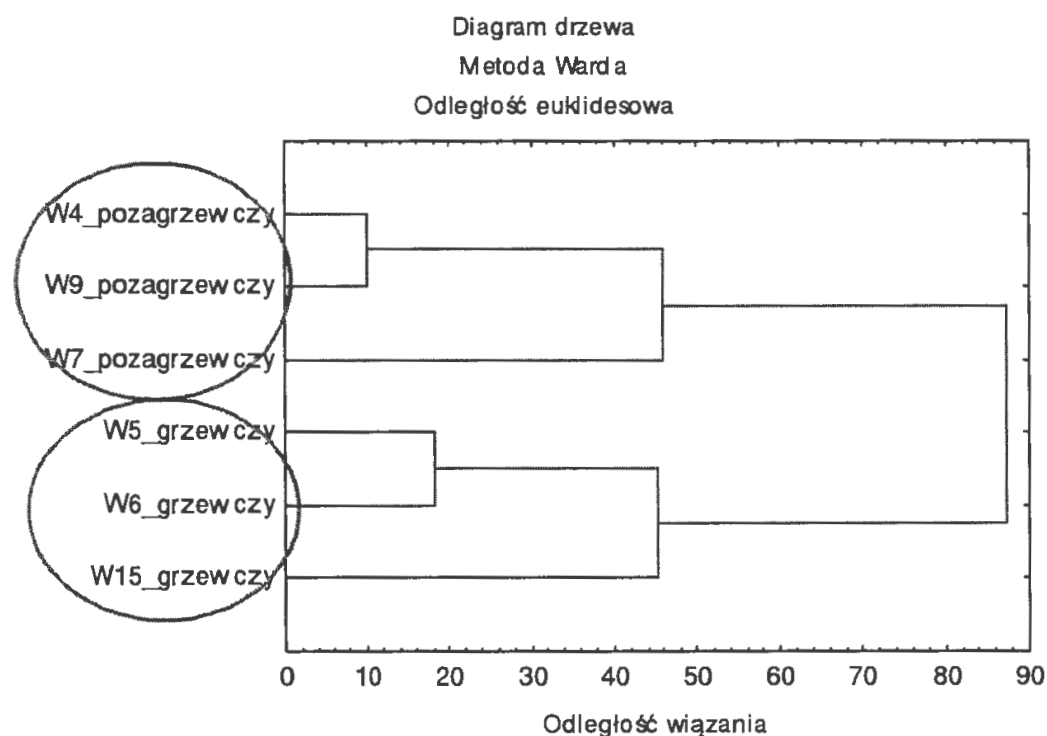
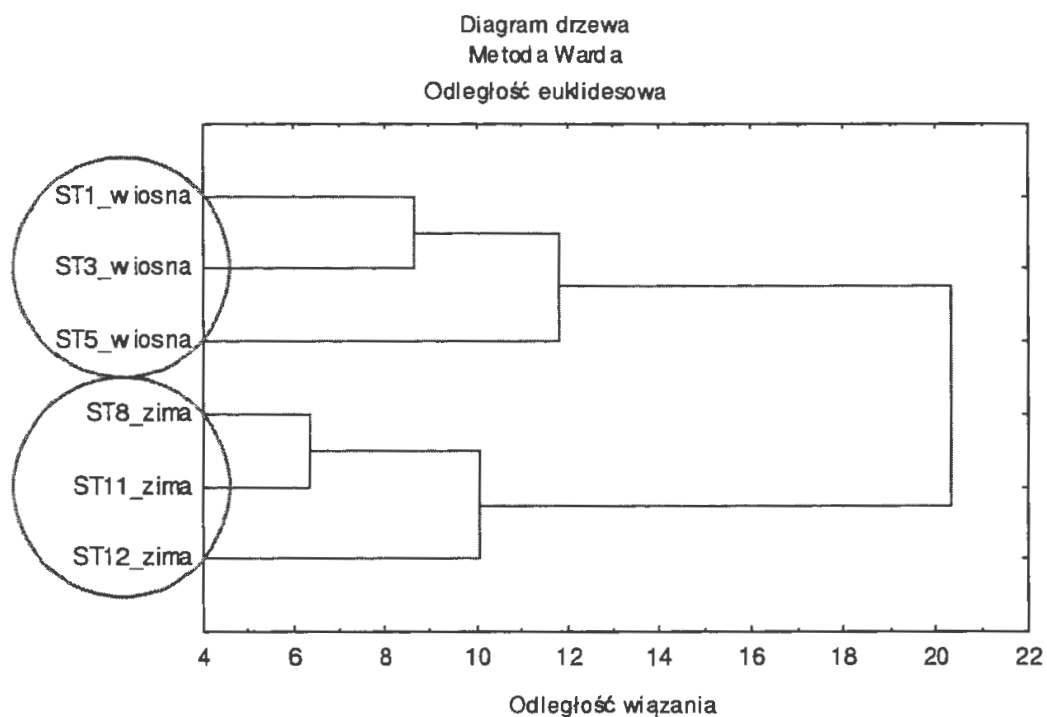
Wyniki wskazują, że wielkość cząstek zawiesin zawartych w wodach opadowych jest zależna od położenia punktu poboru prób, a w mniejszym stopniu od rodzaju opadu czy pory roku (sezonu), w którym powstają. Wpływ punktu poboru prób na skład granulometryczny zawiesin zawartych w opadach potwierdziła analiza porównawcza średnich średnic zastępczych zbioru cząstek identyfikowanych w opadach deszczu i śniegu. Na Rysunku 46 porównano wartości $D(1,0)$ dla zawiesin w opadach ze wszystkich punktów kontrolnych, a na Rysunku 47 wartości $D(3,2)$. Wartości $D(1,0)$ i $D(3,2)$ wykazywały dużą zmienność w zależności od miejsca poboru prób. Podobne wyniki uzyskano dla średnic $D(2,0)$, $D(3,0)$, $D(2,1)$, $D(3,1)$ i $D(4,3)$.



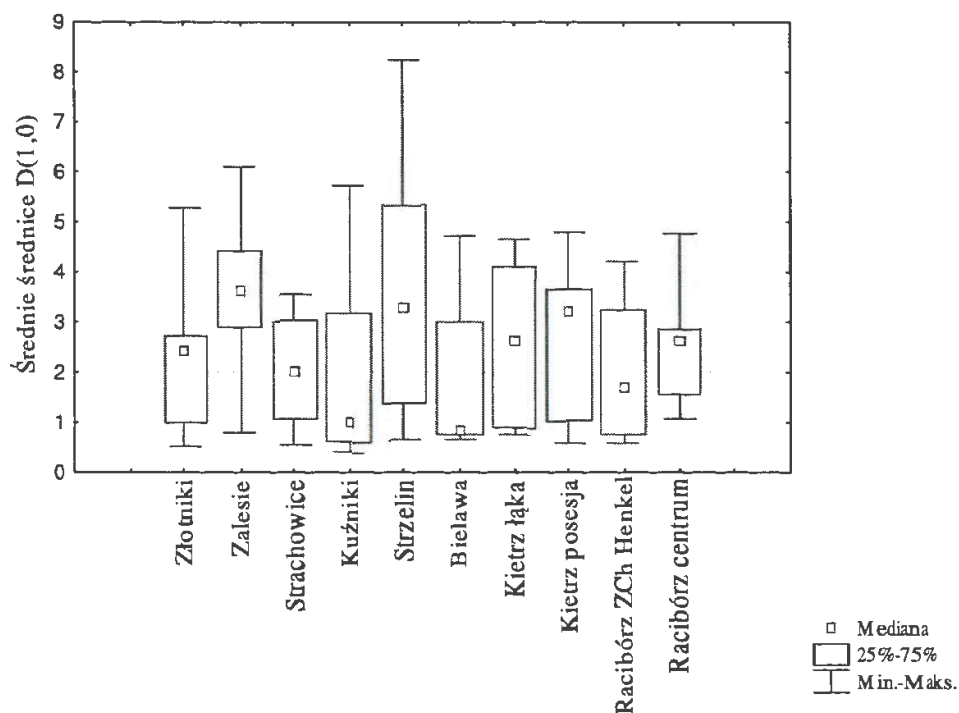
Rysunek 1. Dendrogramy klasyfikacji opadów deszczu i śniegu pochodzących ze Strzelina (ST) i Bielawy (B) (rycina górna) oraz Bielawy (B) i Wrocław-Zalesie (W) (rycina dolna)



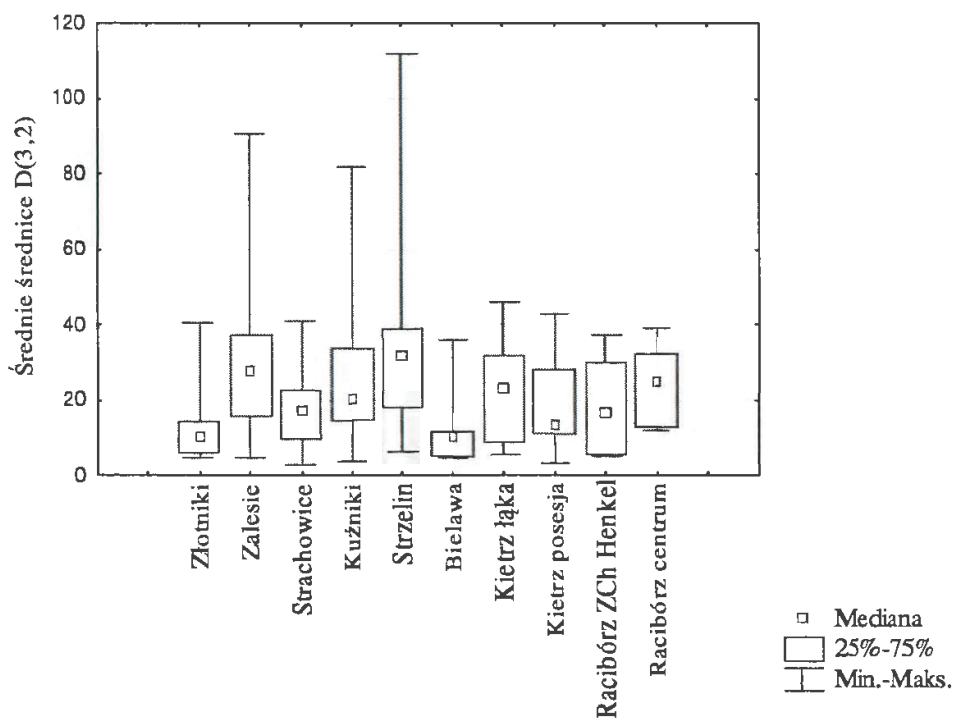
Rysunek 2. Dendrogramy klasyfikacji opadów deszczu i śniegu pochodzących z Wrocławia- Strachowice (S) i Wrocławia-Złotniki (L) (rycina górna) oraz Wrocławia-Strachowice (B) i Wrocławia-Kuźniki (S) (rycina dolna)



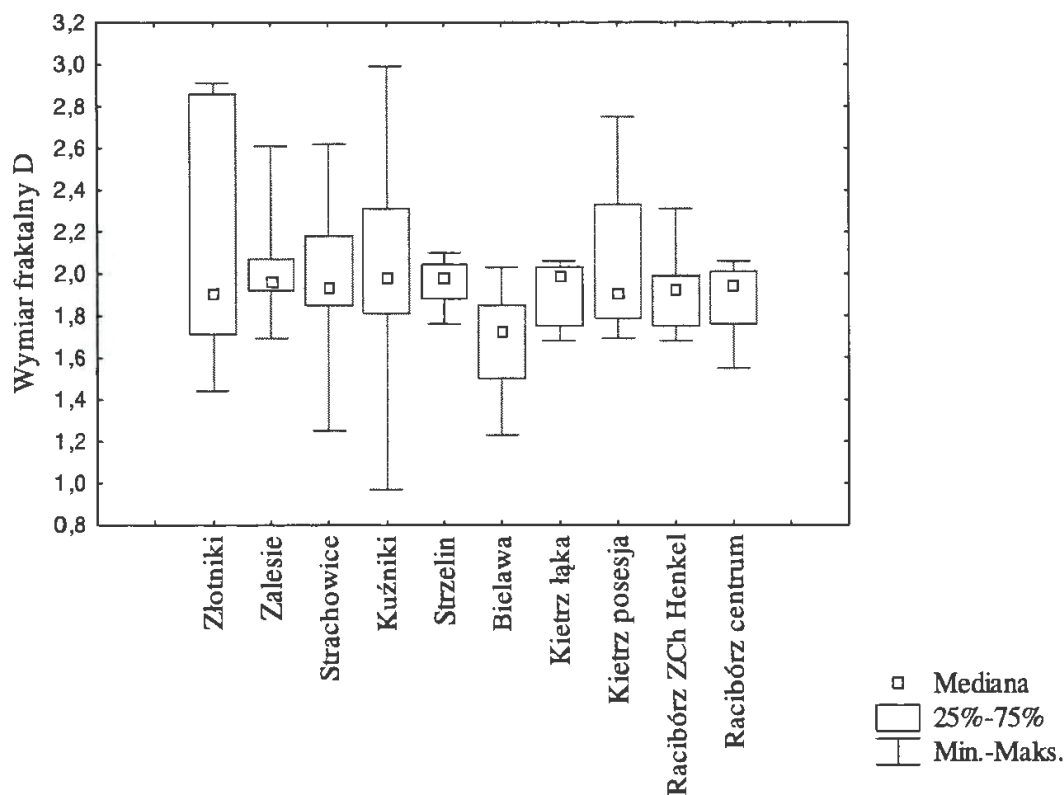
Rysunek 3. Dendrogram klasyfikacji opadów pochodzących ze Strzelina (ST), pobranych w zimie i na wiosnę (rycina górna) oraz pochodzących z Wrocławia-Zalesie (W) pobranych w sezonie grzewczym i poza nim (rycina dolna)



Rysunek 4. Porównanie wartości D(1,0) uzyskanych dla poszczególnych punktów badawczych



Rysunek 5. Porównanie wartości D(3,2) uzyskanych dla poszczególnych punktów badawczych



Rysunek 6. Porównanie wartości wymiarów fraktalnych D dla zawiesin w opadach atmosferycznych

Na Rysunku 48 przedstawiono ustalone wartości optycznego wymiaru fraktalnego D. Dla poszczególnych punktów wymiar fraktalny D przyjmował wartości z przedziału od 0,97 do 2,99. Największy rozrzut wartości wymiaru fraktalnego zaobserwowano w punkcie kontrolnym Wrocław-Kuźniki. Na uwagę zasługuje fakt, że wartości mediany zbioru wyników w poszczególnych punktach mieściły się w stosunkowo wąskim przedziale od 1,90 do 1,99 oprócz punktu kontrolnego w Bielawie, dla którego wartość mediany wyniosła 1,76. Można wyciągnąć stąd wniosek, że budowa przestrzenna zawiesin zawartych w opadach atmosferycznych jest zmienna w czasie, ale wykazuje duże podobieństwo do struktur o płaskiej budowie.

5.1.5. Wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin w spływach z dachów

W Tabelach 32-35 przedstawiono skład granulometryczny zawiesin w wodach opadowych odprowadzanych rynnami.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w spływach z dachu zebranych w Strzelinie

Kod	Data poboru	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
		Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
SS1	18.01.04	0,79	17,47	61,91	329,58	1782,50
SS2	10.03.04	0,56	19,83	115,44	492,84	632,00
SS3	23.03.04	2,24	62,82	594,93	1235,51	1782,50
SS4	17.04.04	2,24	28,93	94,12	390,88	1096,00
SS5	25.04.04	1,78	20,54	63,09	142,09	632,00
SS6	12.05.04	1,42	6,51	34,75	88,16	502,00
SS7	15.05.04	1,59	8,45	39,07	87,56	159,00
SS8	11.06.04	2,24	35,54	187,82	1047,85	1782,50

Tabela 2. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w spływach z dachu zebranych w Strzelinie oraz wyliczone wymiary fraktalne

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
SS1	1,57	2,72	4,71	5,52	10,35	22,74	44,63	2,05
SS2	1,03	1,69	2,77	3,58	6,68	16,11	34,51	2,00
SS3	7,37	11,27	17,25	20,73	34,76	70,05	191,40	2,04
SS4	4,82	7,44	11,48	13,26	22,01	42,18	83,35	2,07
SS5	4,35	6,57	9,92	11,26	18,12	33,11	62,73	2,05
SS6	3,35	4,43	5,84	6,72	9,52	15,50	34,79	1,69
SS7	3,53	4,79	6,51	7,62	11,19	19,24	41,07	1,87
SS8	4,47	7,00	10,97	13,40	23,20	49,10	111,34	2,05

Tabela 3. Zestawienie wyników badań składu granulometrycznego ustalonych na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$ w spływach z dachu zebranych we Wrocławiu na osiedlu Zalesie

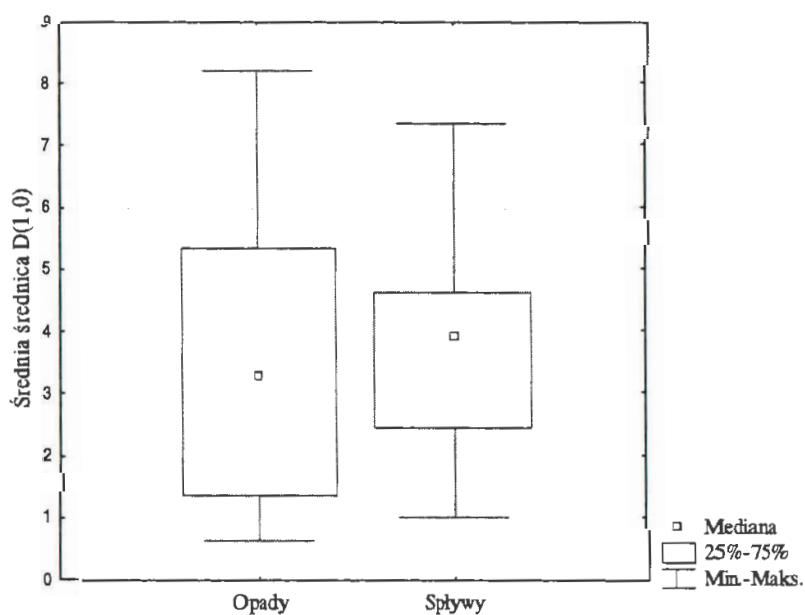
Kod	Data poboru	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
		Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
SW1	09.02.04	1,00	19,81	66,89	299,84	1262,00
SW2	23.02.04	1,59	13,30	43,37	115,10	317,00
SW3	01.03.04	1,59	16,69	105,87	432,82	1782,50
SW4	09.03.04	1,59	28,82	107,86	336,61	710,00
SW5	24.03.04	0,45	5,99	107,05	297,04	632,00
SW6	06.04.04	2,52	57,23	443,85	1296,93	1782,50
SW7	02.05.04	1,90	17,88	82,56	828,96	1905,00
SW8	10.05.04	2,00	9,41	84,18	345,99	632,00
SW9	13.05.04	1,59	7,65	47,98	213,85	632,00
SW10	17.05.04	1,59	20,83	121,39	253,67	502,00
SW11	02.06.04	1,78	29,05	149,96	383,01	1782,50
SW12	02.06.04	1,78	16,44	54,98	128,75	224,00
SW13	08.06.04	1,78	27,11	334,93	1110,13	1782,50
SW14	09.06.04	3,56	65,62	420,99	1148,52	1782,50
SW15	28.06.04	1,59	22,26	471,31	1375,20	1782,50
SW16	20.07.04	1,42	27,82	221,52	1147,07	1782,50
SW17	23.05.04	2,83	25,87	98,75	430,99	1782,50

W porównaniu do opadów, zarówno na stanowisku we Wrocławiu, jak i w Strzelinie, w spływach z dachów wzrastała liczba cząstek o średnicach zastępczych większych od 300 μm , ale nie miało to wpływu na wartości średnich średnic zastępczych (Rysunki 49-52). Wzrost liczby cząstek o dużych średnicach należy wiązać ze spłukiwaniem zanieczyszczeń z powierzchni dachu.

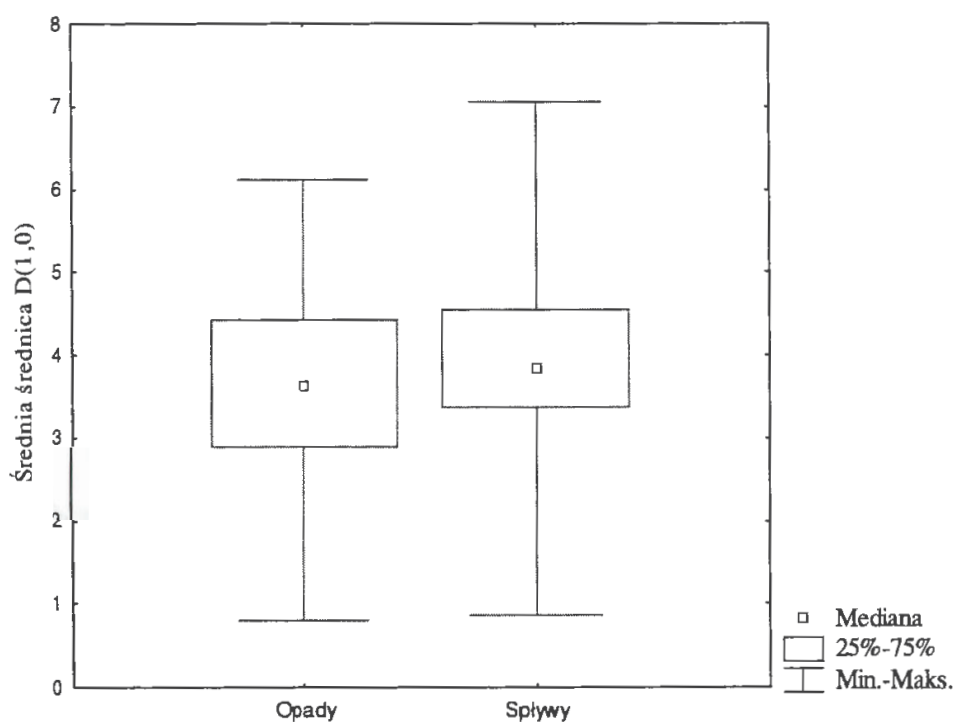
Wartości median średnic $D(1,0)$ i $D(3,2)$ dla spływów z dachów i opadów były ze sobą porównywalne. Oznacza to, że skład granulometryczny zawiesin w opadach i spływach był zbliżony i zależał głównie od miejsca punktu pomiarowego. W spływach z dachów obserwowano w porównaniu do opadów większą objętość zawiesin. Obrazują to dane przedstawione w Tabelach 36 i 37.

Tabela 4. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian liczebności cząstek zawiesiny $n(d_i)$ w spływach z dachu zebranych we Wrocławiu na osiedlu Zalesie oraz wyliczone wymiary fraktalne

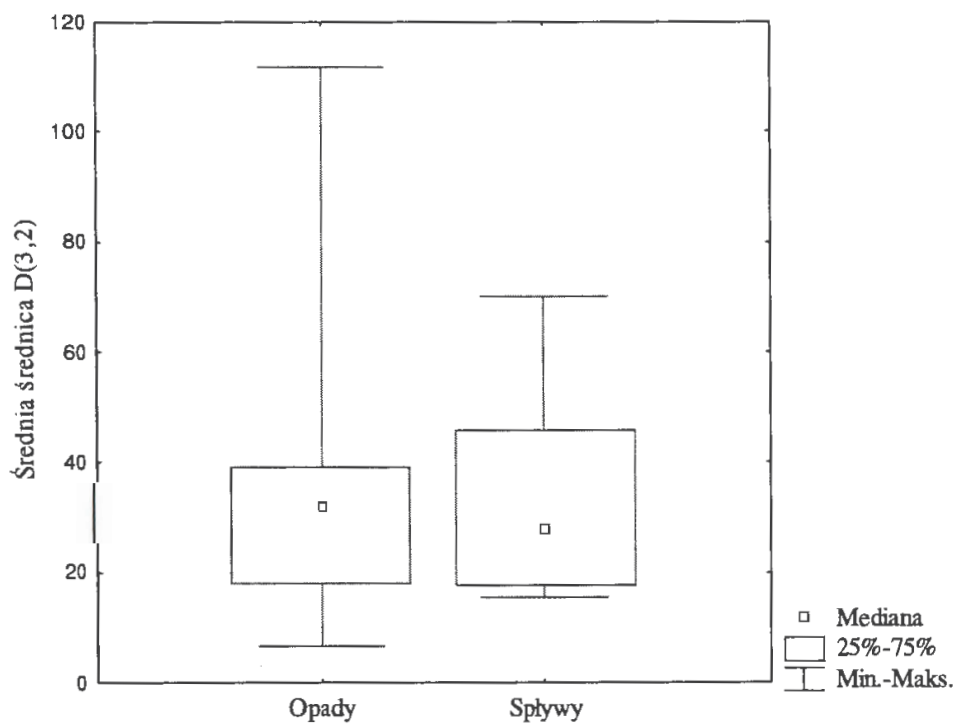
Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
SW1	2,30	3,77	6,17	7,34	13,11	27,87	57,02	2,05
SW2	5,68	7,63	10,26	11,30	15,93	24,75	45,86	2,03
SW3	3,71	5,13	7,08	8,81	13,58	26,03	66,36	2,37
SW4	3,50	5,67	9,18	11,06	19,66	42,10	89,25	2,04
SW5	0,86	1,01	1,19	1,27	1,55	2,01	3,42	1,14
SW6	6,14	9,49	14,67	17,59	29,78	60,45	138,73	1,98
SW7	4,21	6,17	9,05	10,05	15,54	26,68	54,95	1,98
SW8	4,76	6,00	7,55	9,05	12,47	20,60	57,37	2,35
SW9	3,76	4,86	6,27	7,42	10,43	17,34	41,56	2,51
SW10	3,37	4,68	6,50	8,83	14,31	31,50	86,55	1,72
SW11	3,88	5,69	8,35	10,84	18,12	39,30	97,32	1,86
SW12	4,07	5,94	8,68	10,03	15,75	28,58	57,73	2,03
SW13	3,84	5,22	7,08	8,79	13,29	24,95	71,17	2,17
SW14	7,05	10,92	16,89	21,50	37,53	83,40	211,51	2,00
SW15	3,34	4,31	5,56	6,91	9,95	17,79	50,91	2,03
SW16	3,31	4,89	7,20	8,93	14,67	29,87	74,67	1,92
SW17	4,54	6,62	9,66	11,44	18,16	34,11	71,65	2,06



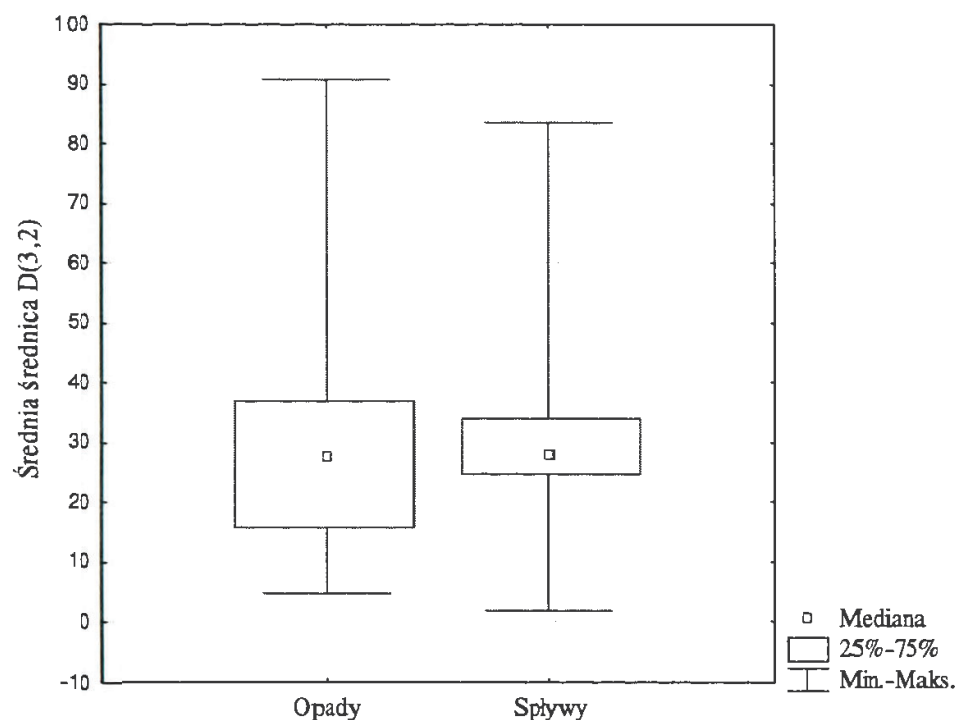
Rysunek 1. Porównanie wartości średnich średnic $D(1,0)$ dla opadów i spływów z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego w Strzelinie



Rysunek 2. Porównanie wartości średnich średnic $D(1,0)$ dla opadów i spływów z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego we Wrocławiu-Zalesiu



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



Rysunek 4. Porównanie wartości średnich średnic $D(3,2)$ dla opadów i spływów z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego we Wrocławiu-Zalesiu

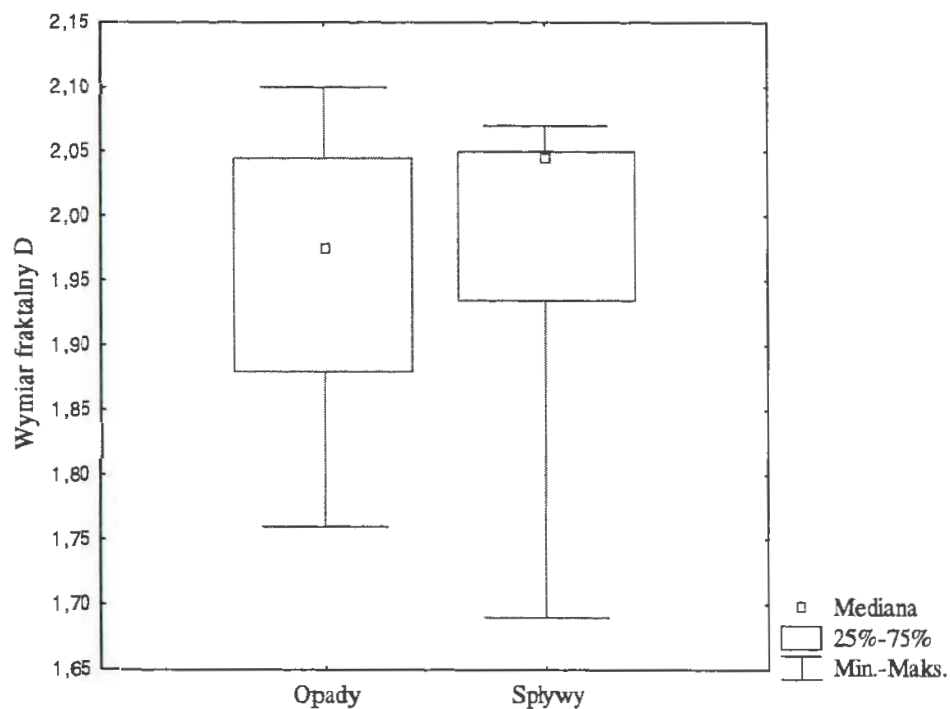
Tabela 5. Przykładowe objętości zastępczych cząstek sferycznych zawieszin w opadach i spływach z dachu pobranych do badań w Strzelinie

Kod próby	Data poboru	Ilość zawieszin w cm^3/dm^3
Opady		
ST1	22.03.04	0,140
ST2	23.05.04	0,082
ST3	12.05.04	0,180
ST4	15.05.04	0,090
ST5	11.06.04	0,179
Spływy z dachów		
SS3	23.03.04	2,270
SS4	17.04.04	0,450
SS5	25.04.04	0,220
SS6	12.05.04	0,650
SS7	15.05.04	0,054
SS8	11.06.04	0,230

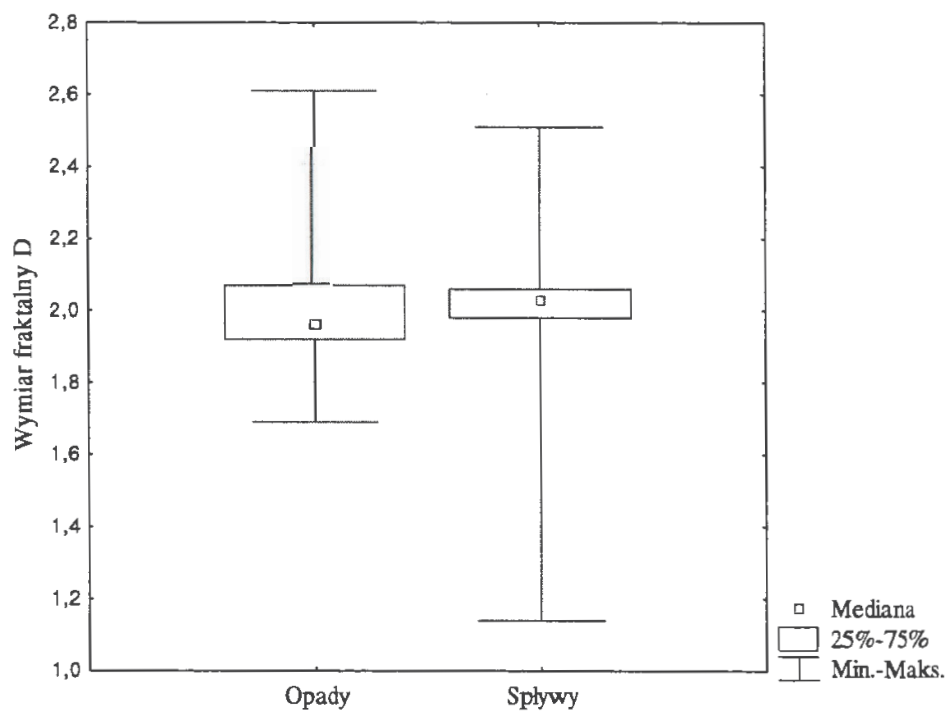
Tabela 6. Przykładowe objętości zastępczych cząstek sferycznych zawiesin w opadach i spływach z dachu pobranych do badań we Wrocławiu na osiedlu Zalesie

Kod próby	Data poboru	Ilość zawiesin w cm^3/dm^3
Opady		
W2	02.07.03	0,051
W3	03.07.03	0,133
W5	12.02.04	0,136
W6	25.03.04	0,091
W8	06.05.04	0,230
W9	10.05.04	0,044
W10	15.05.04	0,218
W11	23.05.04	0,629
W12	02.06.04	0,380
W13	20.07.04	0,250
Spływy z dachów		
SW1	09.02.04	0,048
SW2	23.02.04	0,074
SW3	01.03.04	0,091
SW4	09.03.04	0,120
SW5	24.03.04	0,011
SW6	06.04.04	1,410
SW7	02.05.04	4,410
SW8	10.05.04	0,210
SW9	13.05.04	0,190
SW10	17.05.04	0,090
SW11	02.06.04	0,837
SW12	02.06.04	0,365
SW13	08.06.04	0,180
SW14	09.06.04	0,990
SW15	28.06.04	1,450
SW16	20.07.04	0,480
SW17	23.05.04	1,090

Spływy pobrane w pierwszych fazach opadu charakteryzowały się większą objętością cząstek niż w trakcie jego trwania. Objętości cząstek w pierwszych spływach z powierzchni dachów wynosiły 0,84-4,41 cm^3/dm^3 podczas, gdy po kilku godzinach stwierdzano objętość cząstek zastępczych w przedziale 0,011-1,09 cm^3/dm^3 .



Rysunek 5. Porównanie wymiarów fraktalnych zawiesin w opadach i splywach z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego w Strzelinie



Rysunek 6. Porównanie wymiarów fraktalnych zawiesin w opadach i splywach z dachów dla wyników ze stanowiska badawczego we Wrocławiu-Zalesiu

Na Rysunkach 53 i 54 porównano wartości wymiaru fraktalnego zawiesin w opadach i spływach. Mediany uzyskanych zbiorów wyników dla obu punktów badawczych były porównywalne i mieściły się w przedziale od 1,98-2,05.

2.2 Skład granulometryczny zawiesin w wodach powierzchniowych

Wodę do badań pobierano z rzeki Odry przy wrocławskich mostach: Szczytnickim, Zwierzynieckim, Grunwaldzkim, Pokoju, Piaskowym oraz Uniwersyteckim (Rysunek 55) oraz ze stawów zlokalizowanych na terenie wrocławskich ujęć infiltracyjnych.



Rysunek 7. Punkty poboru prób wód powierzchniowych zlokalizowane przy moście: a) Szczytnickim; b) Zwierzynieckim; c) Grunwaldzkim; d) Pokoju; e) Piaskowym; f) Uniwersyteckim

Wodę pobierano do pojemników z tworzywa sztucznego o pojemności $1,5 \text{ dm}^3$, w miejscach pozbawionych intensywnie rozwiniętej roślinności wodnej, w niewielkim oddaleniu od brzegu, z głębokości około 15 cm pod powierzchnią zwierciadła wody.

W Tabelach 38 i 39 przedstawiono uzyskane wyniki badań składu granulometrycznego wody odrzańskiej, a w Tabelach 40 i 41 wybrane wyniki badań wody pobranej ze stawów zlokalizowanych na wrocławskich ujęciach infiltracyjnych.

Zawiesiny obecne w próbach wód powierzchniowych charakteryzowały się nietrwałą strukturą. W czasie prowadzenia homogenizacji prób obserwowano rozbijanie dużych aglomeratów (Rysunku 56). Rozpad dużych cząstek zawiesiny zachodził najczęściej w czasie do dwóch minut od rozpoczęcia homogenizacji próby. Podobne zjawisko obserwowano w czasie badań składu granulometrycznego wód opadowych i śniegu.

Obserwowano również, podczas mieszania prób, zjawisko łączenia się i wzrostu objętości cząstek o dużych średnicach (Rysunek 57) oraz rozpadu cząstek dużych i ponownego ich tworzenia (Rysunek 58).

Wykresy zmian funkcji $\Delta V(d_i)$ w czasie mieszania mogą posłużyć do określenia dopuszczalnej dyssypacji energii ze względu na wytrzymałość cząstek zawiesin. Było to wykorzystywane przez Govoreanu (2004) w badaniach osadu czynnego. Można zastosować tę metodę w badaniach zachodzenia koagulacji i flokulacji oraz wytrzymałości kłaczków pokoagulacyjnych na działanie sił hydrodynamicznych i mechanicznych.

Na Rysunku 59 przedstawiono horyzontalny diagram skupień opracowany na podstawie wyników badań składu granulometrycznego wody odrzańskiej pobranej do analizy w dniach 26.03.2006 i 5.04.2006. Pomimo różnic w składzie granulometrycznym zawiesin w poszczególnych punktach, wyniki badań tworzą skupiska związane z datą poboru prób. Podobnie można było uporządkować inne wyniki badań. Na krótkich odcinkach rzek składy granulometryczne zawiesin mogą różnić się liczbą cząstek o danych wymiarach, ale wykazują statystyczne podobieństwo. Wniosku tego nie można tak szybko wyciągnąć w oparciu o wykresy funkcji $V(d_i)$.

Na Rysunku 60 przedstawiono diagram skupień dla wyników badań składu wód powierzchniowych i wód opadowych, a na Rysunku 61 dla wód powierzchniowych opadowych i spływających rynnami z dachów. Widać, że wody te tworzą oddzielne skupienia. Uwidacznia to celowość stosowania analizy skupień przy porównywaniu składu granulometrycznego różnych zawiesin.

Tabela 7. Składy granulometryczne zawiesin w wodzie z rzeki Odry ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$

Kod próby	Data poboru	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
		Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
Most Szczytnicki						
MSz1	26.03.06	0,36	8,33	31,43	101,23	282
MSz2	05.04.06	0,28	2,94	22,51	1099,36	1783
MSz3	11.04.06	0,28	3,60	18,20	80,04	1783
MSz4	19.04.06	0,40	3,19	13,10	47,06	1783
MSz5	26.04.06	0,40	4,03	12,90	79,12	1589
Most Zwierzyniecki						
MZ1	26.03.06	0,36	9,47	36,09	124,28	282
MZ2	05.04.06	0,28	2,16	13,56	86,51	709
MZ3	11.04.06	0,28	2,58	13,69	37,49	224
MZ4	19.04.06	0,28	4,96	23,92	91,92	200
MZ5	26.04.06	0,36	3,73	12,33	52,84	1002
Most Grunwaldzki						
MG1	26.03.06	0,36	6,56	35,38	128,22	563
MG2	05.04.06	0,28	2,26	16,31	90,42	710
MG3	11.04.06	0,28	5,70	30,17	108,10	317
MG4	19.04.06	0,28	5,55	26,89	96,74	317
MG5	26.04.06	0,36	4,68	17,51	56,90	356
Most Pokoju						
MPo1	26.03.06	0,36	7,09	29,18	97,06	563
MPo2	05.04.06	0,28	2,26	15,53	71,70	1252
MPo3	11.04.06	0,36	11,21	60,04	257,60	710
MPo4	19.04.06	0,36	5,99	30,10	116,34	709
MPo5	26.04.06	0,36	4,13	29,18	57,98	399
Most Piaskowy						
MP1	26.03.06	0,40	7,62	46,56	131,54	252
MP2	05.04.06	0,28	1,75	11,01	46,73	317
MP3	11.04.06	0,28	4,03	21,74	79,51	178
MP4	19.04.06	0,28	7,76	40,44	276,62	159
MP5	26.04.06	0,36	5,91	46,56	122,73	1783
Most Uniwersytecki						
MU1	26.03.06	0,36	8,67	34,71	107,69	356
MU2	05.04.06	0,28	1,82	10,89	53,29	502
MU3	11.04.06	0,28	4,17	20,36	76,29	356
MU4	19.04.06	0,28	4,17	20,36	76,29	356
MU5	26.04.06	0,36	5,65	21,76	82,78	1125

Tabela 8. Średnie średnice zawieszin w wodzie odrzańskej ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$ oraz wyliczone wymiary fraktalne

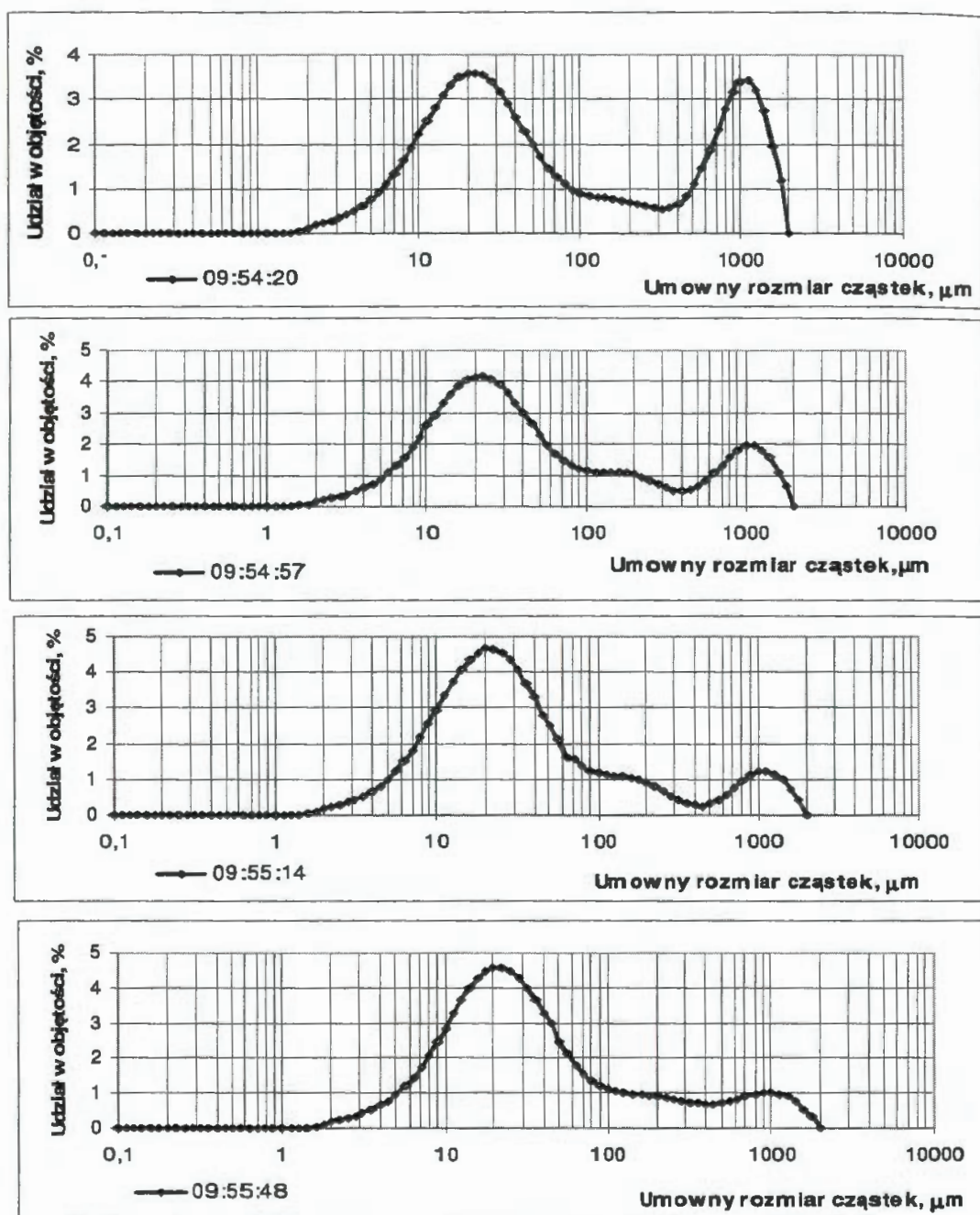
Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	D
Most Szczytnicki								
MSz1	0,661	1,028	1,6	2,162	3,911	9,56	21,922	2,00
MSz2	0,641	0,867	1,172	1,424	2,121	3,841	9,623	1,81
MSz3	0,614	0,862	1,21	1,554	2,474	5,059	12,575	1,84
MSz4	0,726	1,045	1,505	1,798	2,828	5,315	11,547	1,80
MSz5	0,912	1,392	2,125	2,298	3,648	6,262	11,808	2,22
Most Zwierzyniecki								
MZ1	0,648	1,013	1,583	2,164	3,955	9,886	22,569	2,01
MZ2	0,641	0,862	1,159	1,401	2,071	3,7	9,325	1,81
MZ3	0,622	0,86	1,19	1,496	2,32	4,521	10,934	1,85
MZ4	0,681	0,993	1,447	1,838	3,019	6,301	14,923	1,93
MZ5	0,819	1,258	1,93	2,118	3,405	6,004	11,282	2,19
Most Grunwaldzki								
MG1	0,701	1,021	1,487	1,953	3,262	7,156	17,89	1,87
MG2	0,624	0,83	1,105	1,364	2,017	3,68	9,756	1,67
MG3	0,606	0,858	1,214	1,641	2,7	6,004	15,761	1,87
MG4	0,855	1,306	1,995	2,39	3,996	8,004	18,469	1,99
MG5	0,753	1,183	1,859	2,181	3,71	7,403	15,695	2,03
Most Pokoju								
MPo1	0,66	0,977	1,446	1,956	3,367	7,839	18,766	1,94
MPo2	0,63	0,841	1,124	1,384	2,052	3,747	9,8	1,71
MPo3	0,645	0,973	1,468	2,041	3,63	8,972	22,497	1,96
MPo4	0,716	1,086	1,646	2,056	3,486	7,38	17,103	1,99
MPo5	0,878	1,34	2,046	2,315	3,761	6,912	14,46	2,13
Most Piaskowy								
MP1	0,864	1,442	2,406	2,875	5,246	11,437	27,51	1,99
MP2	0,629	0,83	1,095	1,321	1,915	3,352	8,328	1,77
MP3	0,601	0,839	1,171	1,536	2,454	5,142	13,215	1,84
MP4	0,673	1,024	1,556	2,015	3,485	7,807	18,199	1,99
MP5	0,736	1,171	1,861	2,222	3,861	8,007	16,987	2,06
Most Uniwersytecki								
MU1	0,65	1,01	1,55	2,13	3,84	9,50	22,32	1,99
MU2	0,64	0,85	1,13	1,34	1,95	3,36	8,14	1,78
MU3	0,61	0,86	1,22	1,59	2,56	5,36	13,20	1,89
MU4	0,62	0,88	1,24	1,61	2,59	5,39	13,20	1,99
MU5	0,73	1,17	1,86	2,21	3,84	7,92	16,62	2,17

Tabela 9. Składy granulometryczne zawiesin w wodzie stawów infiltracyjnych na wrocławskich terenach wodonośnych ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$

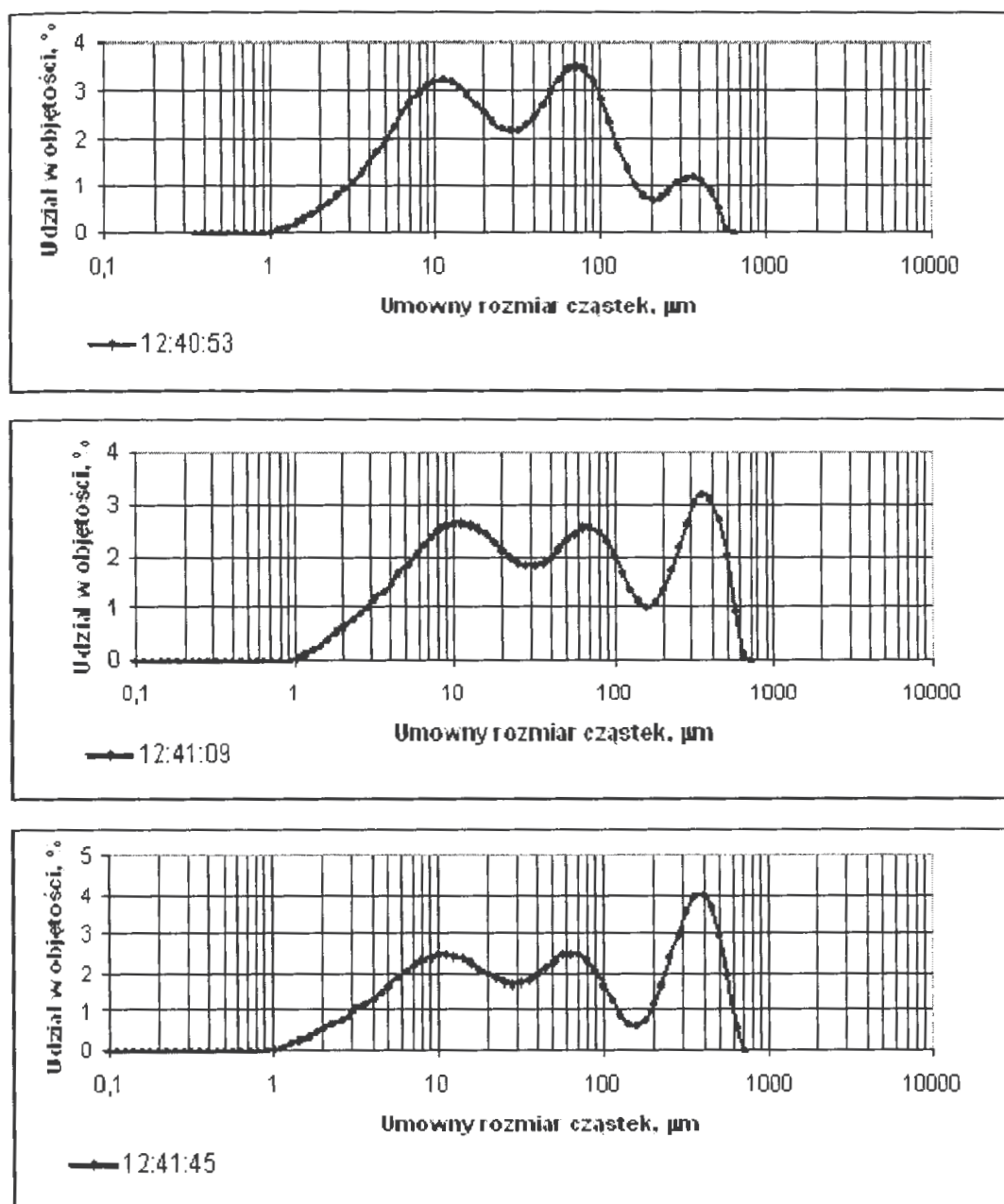
Numer stawu	Data poboru	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
		Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
1	10.05.04	1,59	6,19	97,30	471,33	2000,00
21	10.05.04	1,59	9,29	151,53	301,07	502,38
5	12.06.04	1,59	8,87	32,12	961,75	2000,00
61	12.06.04	1,78	12,17	79,44	1415,94	2000,00
16	28.07.04	0,40	5,12	28,59	187,89	1002,37
21	28.07.04	0,40	8,00	45,75	420,31	2000,00
1	10.09.04	0,40	7,23	39,56	1240,09	2000,00
5	10.09.04	0,36	7,88	40,73	1098,18	2000,00
16	15.10.04	0,36	5,88	20,21	1102,98	2000,00
32	15.10.04	1,26	6,09	68,74	1196,48	2000,00
16	10.11.04	0,45	7,21	79,03	162,24	399,05
61	10.11.04	0,70	3,60	57,71	350,16	2000,00

Tabela 10. Średnie średnice cząstek zawiesin w wodzie stawów infiltracyjnych na wrocławskich terenach wodonośnych ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$ oraz wyliczone wymiary fraktalne

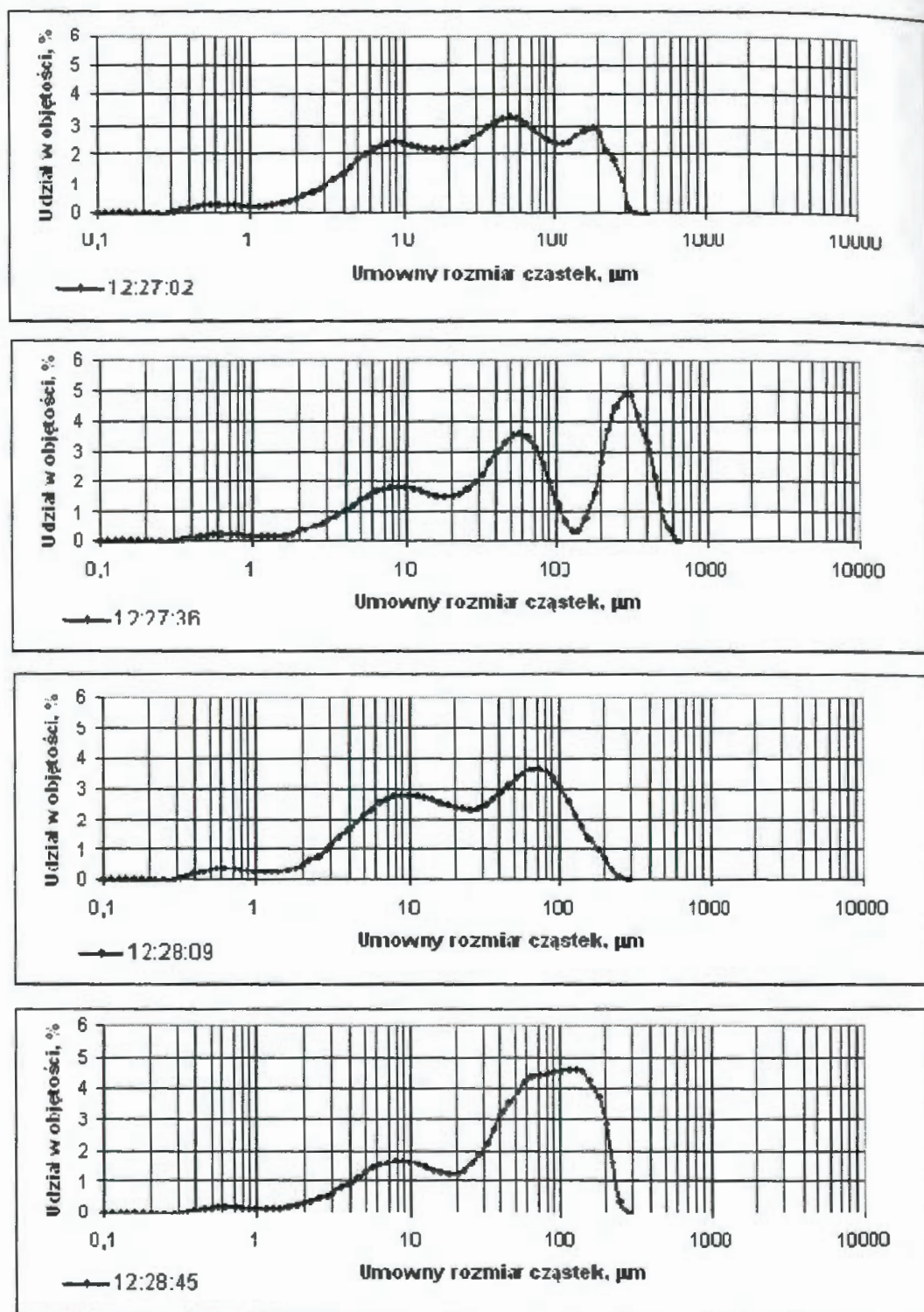
Numer stawu	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny D
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	
1	3,30	4,02	4,89	5,60	7,30	10,90	29,10	2,14
21	3,26	3,97	4,84	6,07	8,28	14,15	52,55	2,44
5	4,32	5,73	7,60	7,93	10,75	15,20	27,83	2,48
61	4,28	5,71	7,62	8,23	11,41	17,08	33,93	2,29
16	0,90	1,42	2,23	2,52	4,21	7,93	17,68	2,17
21	0,79	1,25	1,97	2,34	4,03	8,24	17,24	2,08
1	0,82	1,28	2,00	2,37	4,03	8,11	17,05	2,30
5	0,67	1,08	1,74	2,12	3,79	8,26	17,42	2,12
16	0,78	1,28	2,10	2,27	3,87	7,12	13,18	2,15
32	3,17	3,93	4,88	5,67	7,57	11,74	33,60	2,11
16	2,95	3,85	5,03	6,33	9,27	17,09	56,09	2,01
61	1,79	2,19	2,69	3,05	3,99	5,91	14,29	1,97



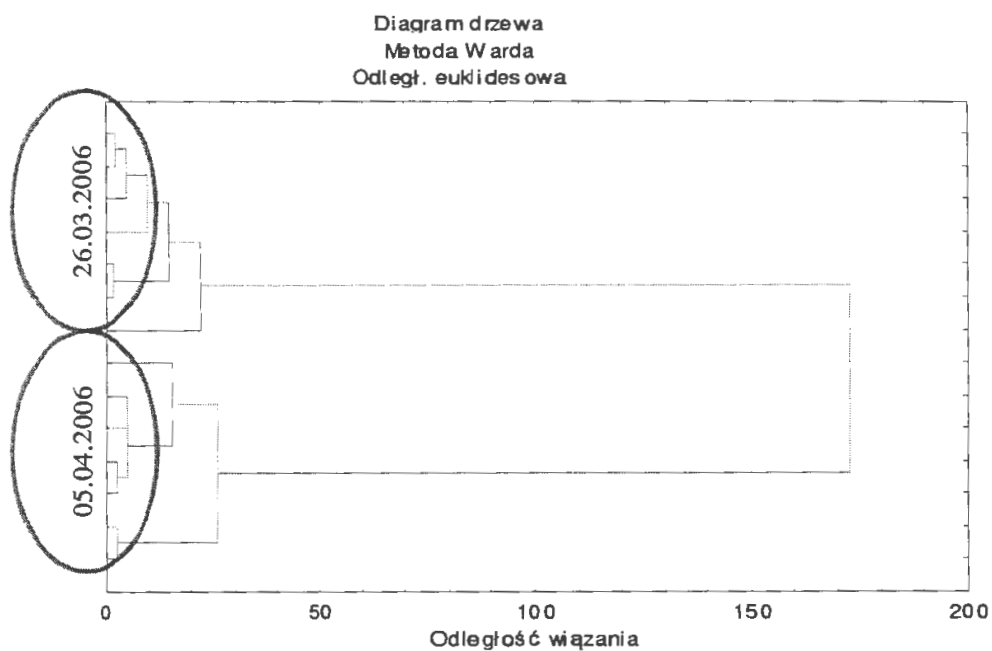
Rysunek 8. Zmiany $\Delta V(d_i)$ wywołane rozpadem cząstek zawieszin zawartych w wodzie pobranej z terenów wodonośnych Wrocławia w dniu 17.06.04 r. ze stawu 2 (Badania wykonano w trakcie homogenizacji próbki. W dolnym prawym rogu diagramów podany godzinę wykonania analizy.)



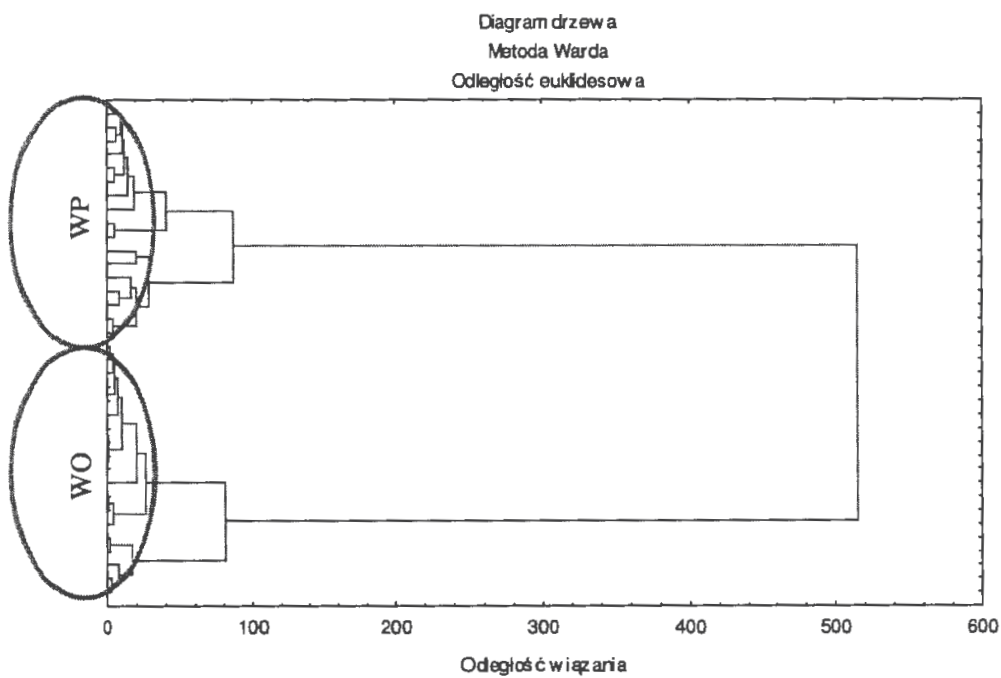
Rysunek 9. Zmiany $\Delta V(d_i)$ wywołane łączeniem się cząstek zawiesin w wodzie pobranej z terenów wodonośnych Wrocławia w dniu 30.11.04 r. ze stawu 2 (Badania wykonano w trakcie homogenizacji próbki. W dolnym prawym rogu diagramów podany godzinę wykonania analizy.)



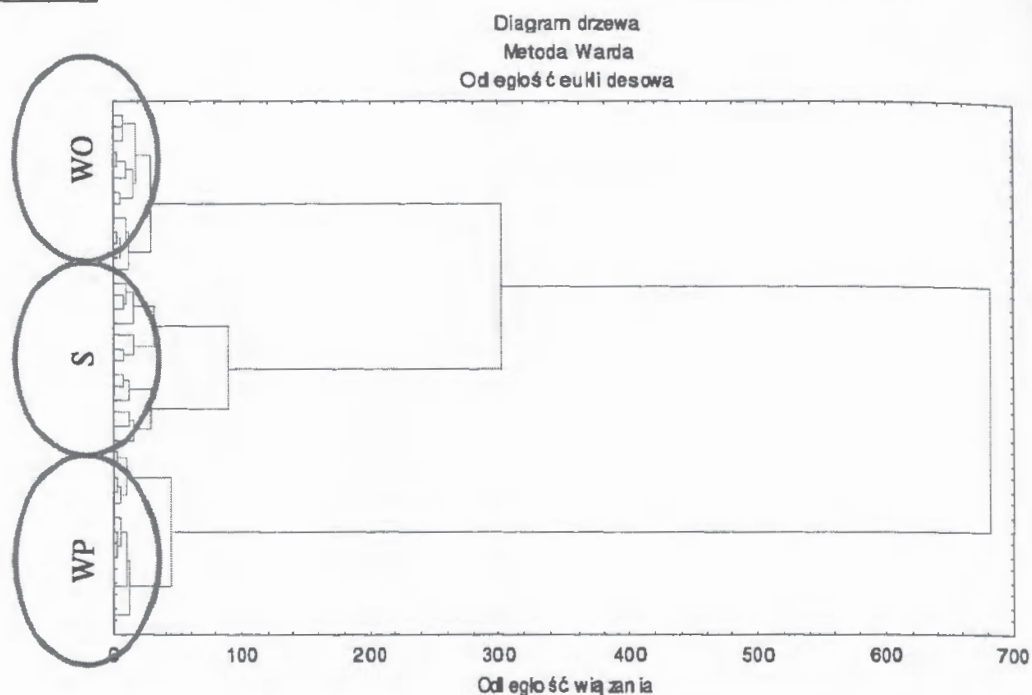
Rysunek 10. Zmiany $\Delta V(d_i)$ wywołane łączeniem i rozpadem cząstek zawieszin w wodzie pobranej z terenów wodonośnych Wrocławia w dniu 30.11.04 r. ze stawu 4 (Badania wykonano w trakcie homogenizacji próbki. W dolnym prawym rogu diagramów podany godzinę wykonania analizy.)



Rysunek 11. Diagram skupień dla prób pobranych z rzeki Odry w dniach 26.03.2006 r. i 5.04.2006 r.



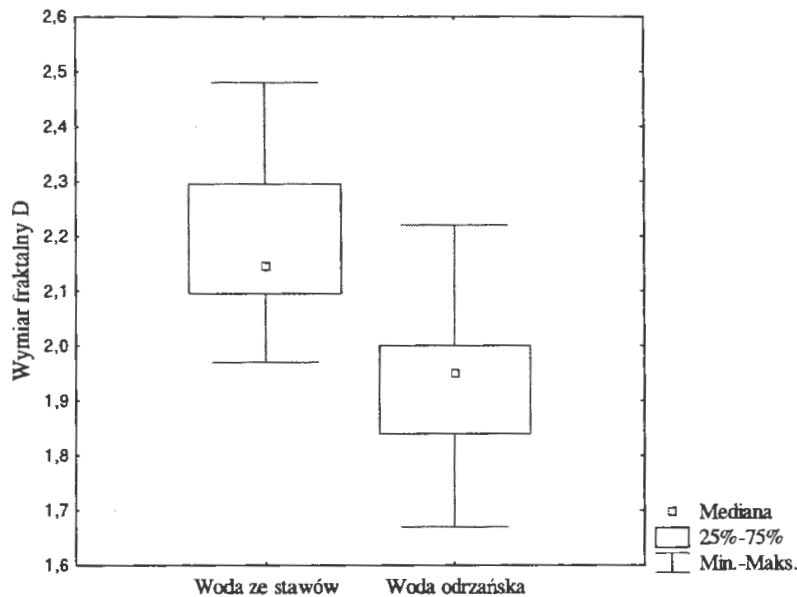
Rysunek 12. Dendrogramy klasyfikacji prób wód powierzchniowych (WP) i opadowych (WO)



Rysunek 13. Dendrogramy klasyfikacji prób wód powierzchniowych (WP), opadowych (WO) i spływów z dachów (S)

Na Rysunku 62 porównano wymiary fraktalne uzyskane dla zawiesin w wodzie ze stawów infiltracyjnych oraz w wodzie odrzańskiej. Mediana zbioru wyników wymiarów fraktalnych dla stawów wyniosła 2,13 a dla wyników uzyskanych dla wody odrzańskiej 1,96. Zawiesiny obecne w wodach stawów infiltracyjnych, charakteryzowały się bardziej zwartą budową niż zawiesiny w wodzie odrzańskiej.

Z danych zamieszczonych w Tabelach 39 i 41 wynika, że zawiesiny obecne w wodach odrzańskich charakteryzowały się mniejszymi wartościami średnimi średnic zbioru cząstek w porównaniu do zawiesin obecnych w wodzie w stawach infiltracyjnych. Woda w stawach infiltracyjnych jest przetrzymywana od kilku do kilkunastu dni. W tym czasie dochodzi do procesów autokoagulacji zawiesin koloidalnych oraz rozwoju fito- i zooplanktonu. Powoduje to wzrost średnich średnic zbioru cząstek zawiesiny w porównaniu do wód płynących, gdzie stwierdza się większy udział zawiesin koloidalnych w ogólnej ilości zawiesin. Tłumaczy to również wzrost wymiarów fraktalnych zawiesin w stawach infiltracyjnych w porównaniu do płynących wód odrzańskich.



Rysunek 14. Porównanie wymiarów fraktalnych zawiesin obecnych w wodzie pobranej z wrocławskich stawów infiltracyjnych oraz w wodzie odrzańskiej

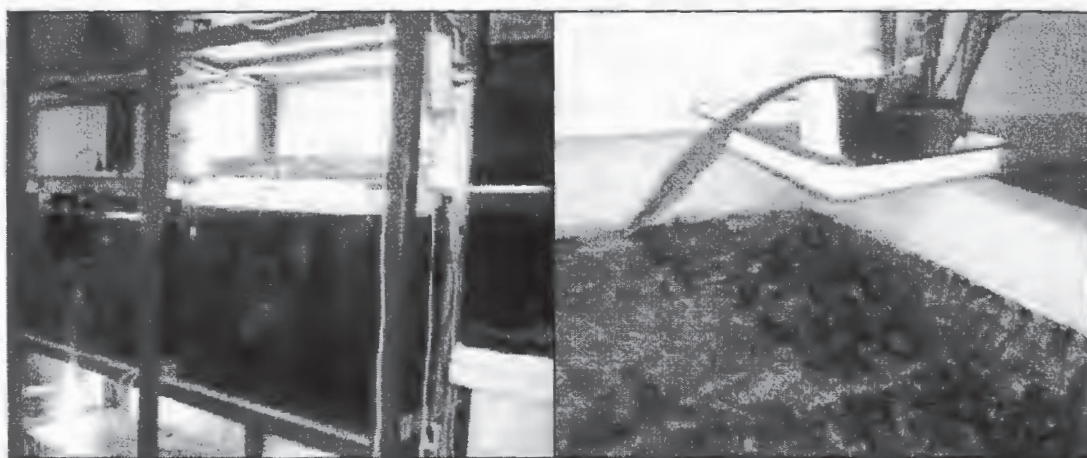
2.3 Badania składu granulometrycznego zawiesin glonów

Głony są nieodłącznym składnikiem sentosu, planktonu i bentosu. Występują praktycznie na każdej szerokości geograficznej, zarówno jako pojedyncze komórki jak i kolonie, a ich liczebność w danej objętości wody jest podstawową wielkością w ekologii glonów (Kawecka i Eloranta, 1994). Biomasa glonów występujących w środowisku naturalnym możemy ocenić na podstawie objętości ich komórek lub pomiaru ilości chlorofilu. Oceny biomasy glonów dokonuje się na podstawie żmudnych badań liczebności poszczególnych taksonów oraz obliczeń uśrednionych objętości komórek glonów (Hutorowicz, 2005). Liczebność taksonów jest wypadkową liczby liczonych jednostek, pola powierzchni liczonego pasa, objętości próby i powierzchni dna komory, w której prowadzi się zliczanie. W trakcie liczenia glonów wykonuje się także pomiary wielkości komórek, a następnie przyporządkowując rzeczywistym kształtom komórek kształty figur geometrycznych liczy się ich objętość.

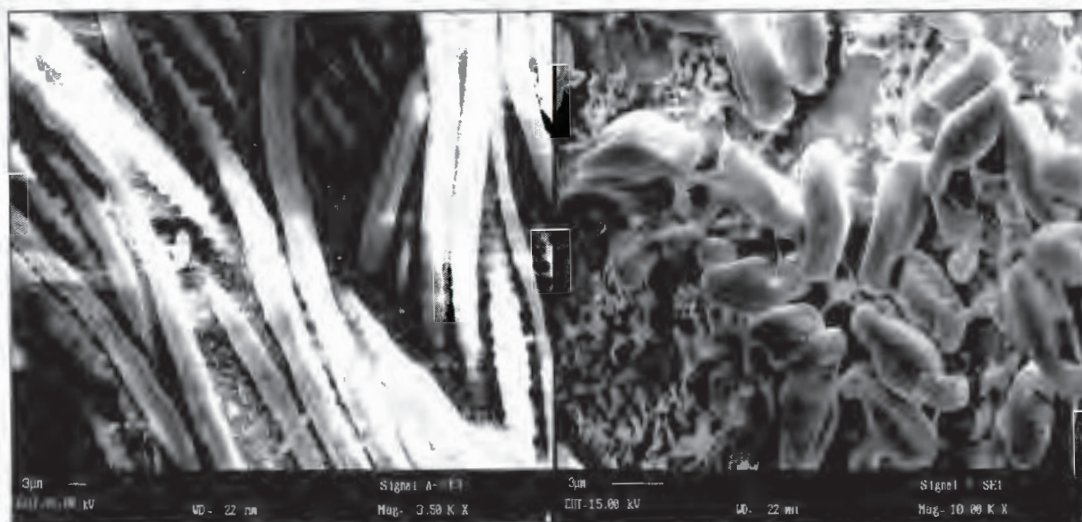
Zastosowanie tradycyjnej metody oceny wielkości glonów jest pracochłonne nie tylko ze względu na dużą liczebność glonów występujących w badanym preparacie. Trudności pojawiają się także przy ocenie pojedynczych wymiarów glonów, tzn. długości, szerokości, średnicy, wysokości, jeżeli komórki występują w sposób zwarty lub w formie nitkowatych kolonii. Dokładna ocena wielkości komórek glonów w przypadku dominujących

taksonów determinuje właściwą ocenę biomasy. Tradycyjna metoda może być zastąpiona pomiarami z zastosowaniem granulometru laserowego.

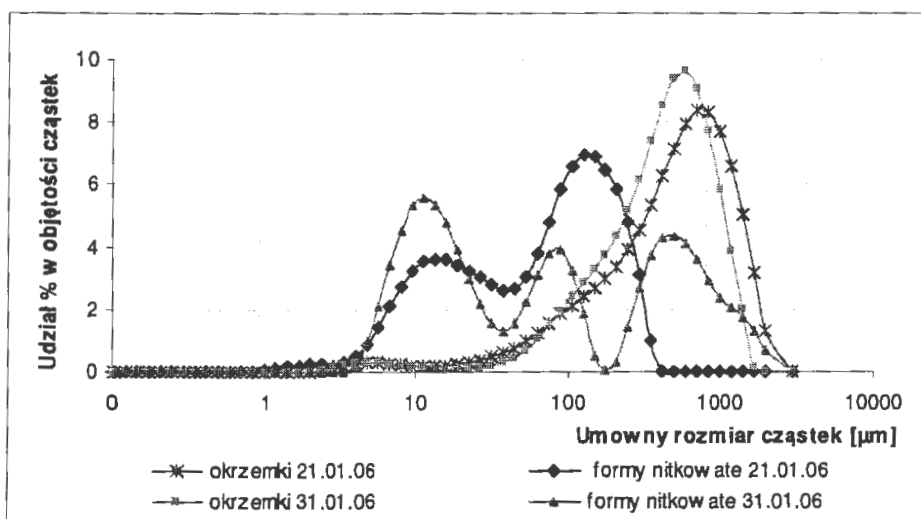
Do badań kultur glonów z użyciem granulometru został użyty materiał pobrany z akwariów rybnych Zakładu Ichtiologii Wydziału Biologii i Hodowli Zwierząt Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (Rysunek 63). W akwariach tych na szklanych ściankach rozwijają się kolonie osiadłych okrzemek oraz nitkowate kolonie glonów (Rysunek 64).



Rysunek 15. Akwaria rybne Zakładu Ichtiologii Wydziału Biologii i Hodowli Zwierząt Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu



Rysunek 16. Obraz otrzymany z mikroskopu skaningowego LEO 435 VP firmy Zeiss. Nitkowate formy glonów, powiększenie 3500 razy (po lewej) i okrzemki, powiększenie 10000 razy (po prawej)



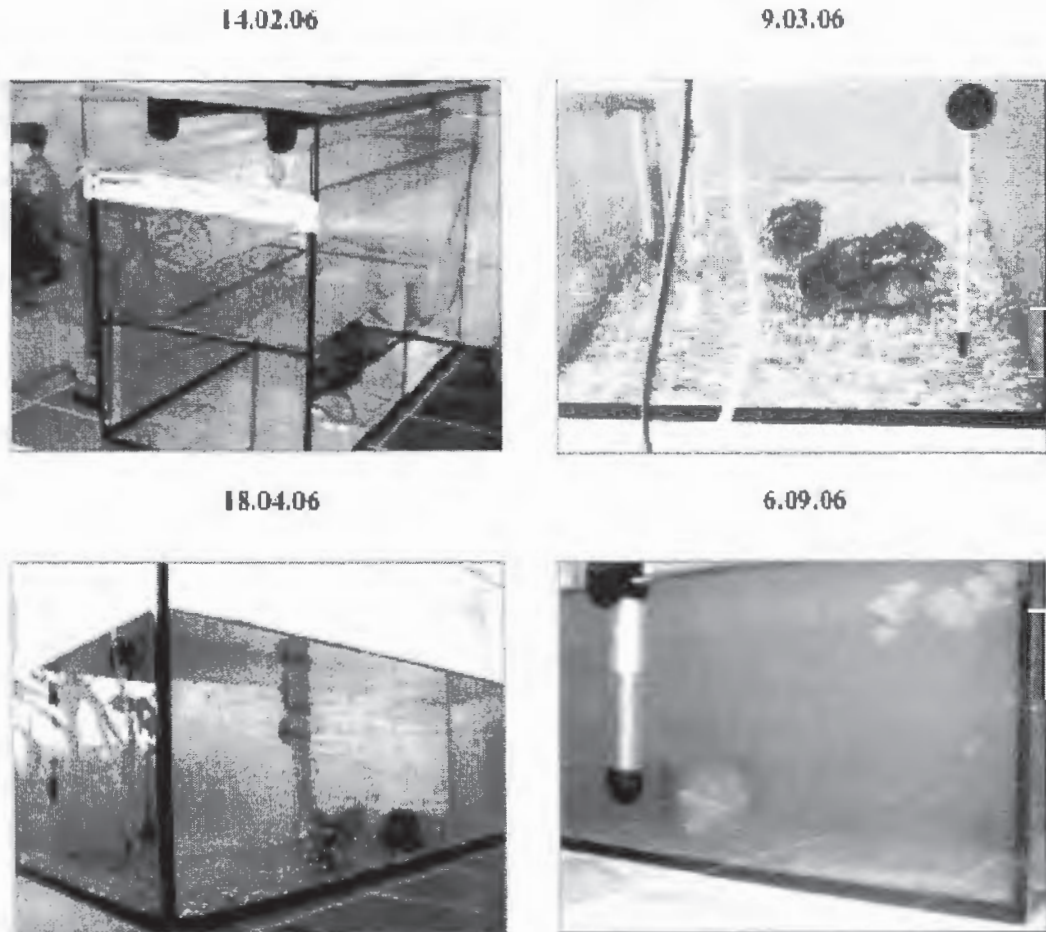
Rysunek 17. Zmiany funkcji $\Delta V(d_i)$ zawiesin pobranych z akwariów rybnych dla próbek pobranych w dniach 21.01.06 i 31.01.06

Na Rysunku 65 przedstawiono wybrane wyniki badań funkcji $\Delta V(d_i)$ zawiesin glonów pobranych z akwariów Zakładu Ichtiologii. Badania wykazały, że lepszą zgodność wielkości cząstek określonych z użyciem granulometru laserowego w porównaniu z wymiarami cząstek ustalonych na podstawie analizy obrazów wykonanych mikroskopem elektronowym otrzymano dla okrzemek niż dla kolonii nitkowatych. Dane uzyskane z granulometru nie pozwalają ocenić kształtu komórek glonów lub ich kolonii, ale metoda ta w sposób bardzo szybki pozwala określić objętość cząstek zawiesiny, w tym fito- i zooplanktonu.

Przeprowadzono eksperyment w warunkach laboratoryjnych, którego celem było wykazanie zmienności składu granulometrycznego kultury glonów oraz wymiaru fraktalnego w układzie dynamicznego wzrostu glonów. Glony hodowano w akwarium o pojemności 35 dm³. Do akwarium wiano 30 dm³ wody wodociągowej oraz po około 300 cm³ wody pobranej z rzeki Odry, z oczka wodnego zlokalizowanego w Ogrodzie Botanicznym we Wrocławiu i z akwarium domowego. Dodanie wód z tych źródeł miało na celu zaszczepienie wody glonami. Co miesiąc wodę w akwarium wzbogacano w substancje biogenne. Akwarium doświadczalne było oświetlone i okresowo podgrzewane. Za pomocą sprężonego powietrza zawartość akwarium była okresowo mieszana. Systematycznie prowadzone były badania składu granulometrycznego powstałej zawiesiny glonów.

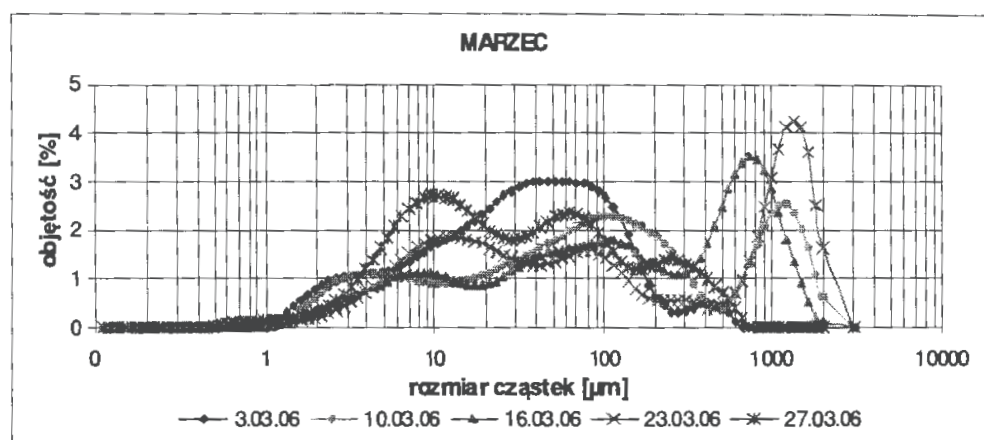
Na Rysunku 66 przedstawiono fotografie doświadczalnego akwarium wykonane w różnym okresie trwania eksperymentu. W miarę wydłużania

czasu hodowli glonów można było wizualnie stwierdzić wzrost zmętnienia wody w akwarium.

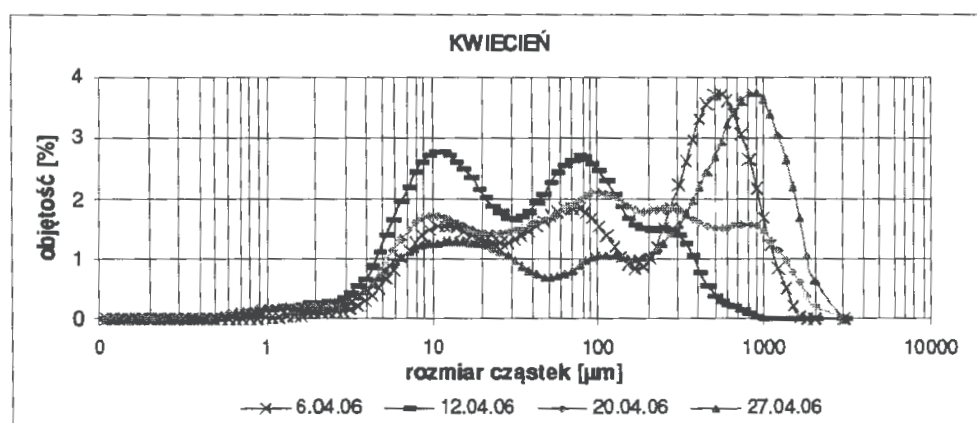


Rysunek 18. Zmiany toni wodnej w akwarium doświadczalnym w okresie od 14.02.2006 do 06.09.2007 r.

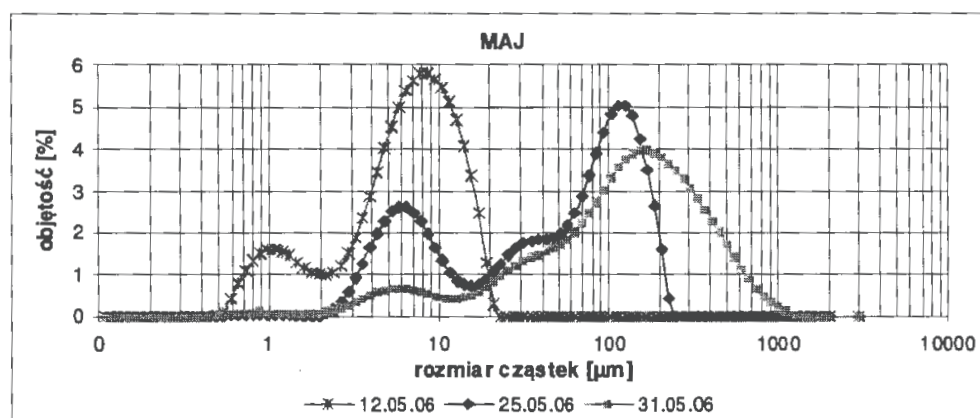
Na Rysunkach 67-73 oraz w Tabelach 42-43 przedstawiono wybrane wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin glonów uzyskane w czasie eksperymentu. W początkowym okresie badań funkcja $\Delta V(d_i)$ była funkcją wielomodalną (Rysunki 67-70). W miarę wydłużania czasu trwania eksperymentu funkcja $\Delta V(d_i)$ stawała się funkcją jednomodalną (Rysunki 71-72). W tym okresie wzrastała wielkość cząstek zawiesiny (Rysunek 74). Uzyskane wyniki miały potwierdzenie w obserwacjach obrazu pod mikroskopem optycznym. W początkowym okresie obserwowano dużą zmienność składu hydrobiologicznego wody. W miarę wydłużania czasu hodowli glonów w wodzie zaczęły dominować okrzemki.



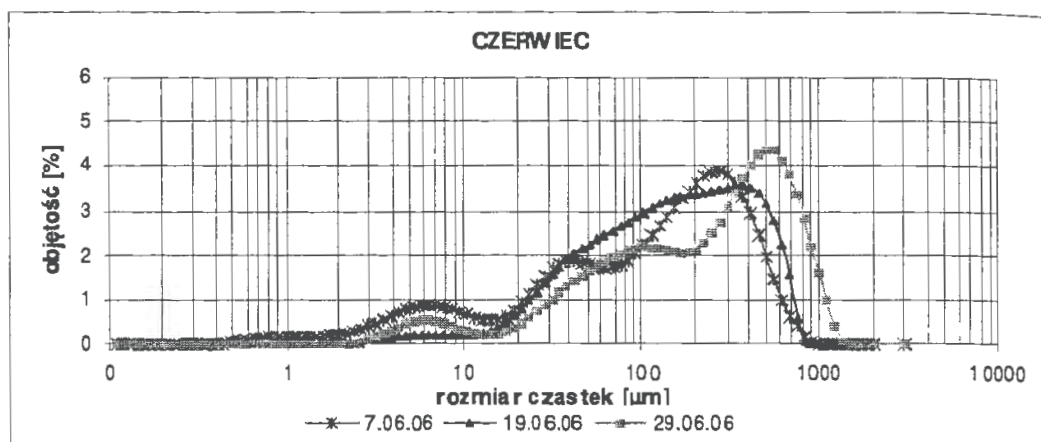
Rysunek 19. Funkcje $\Delta V(d_i)$ określone dla zawiesiny glonów w czasie badań laboratoryjnych w próbach pobranych w marcu 2006 r.



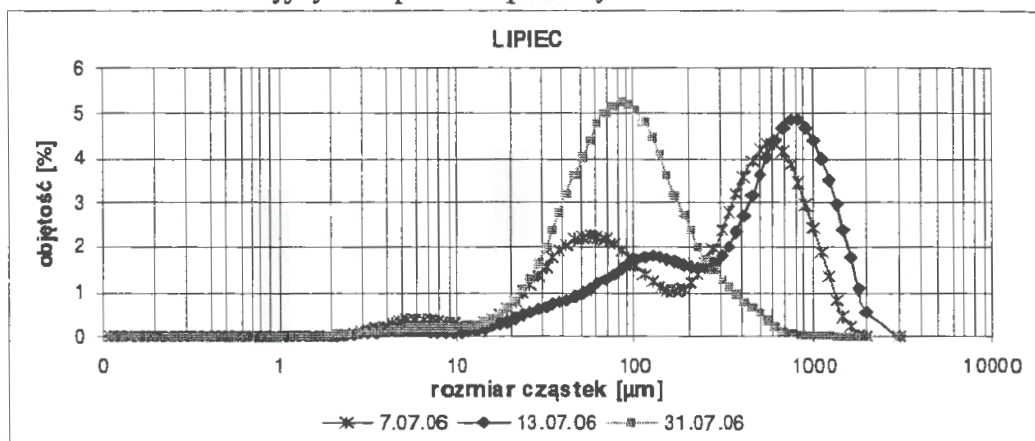
Rysunek 20. Funkcje $\Delta V(d_i)$ określone dla zawiesiny glonów w czasie badań laboratoryjnych w próbach pobranych w kwietniu 2006 r.



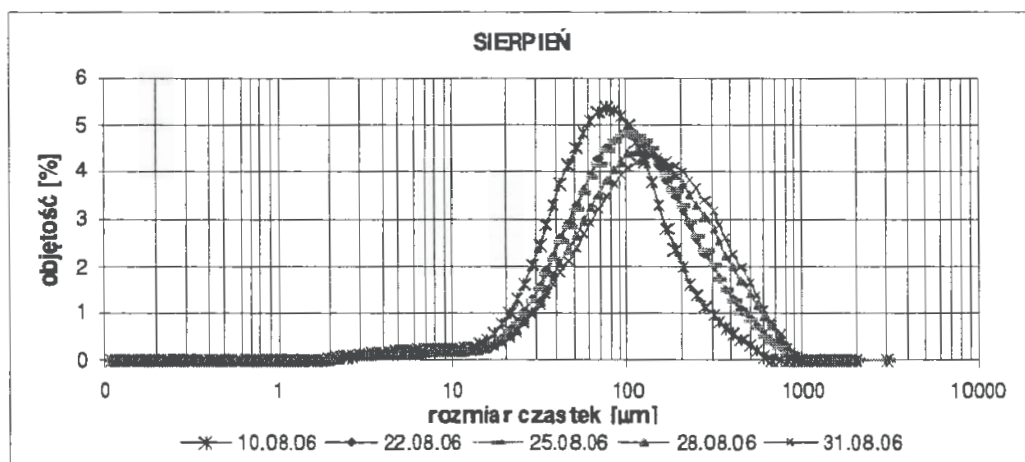
Rysunek 21. Funkcje $\Delta V(d_i)$ określone dla zawiesiny glonów w czasie badań laboratoryjnych w próbach pobranych w maju 2006 r.



Rysunek 22. Funkcje $\Delta V(d_i)$ określone dla zawiesiny glonów w czasie badań laboratoryjnych w próbach pobranych w czerwcu 2006 r.



Rysunek 23. Funkcje $\Delta V(d_i)$ określone dla zawiesiny glonów w czasie badań laboratoryjnych w próbach pobranych w lipcu 2006 r.



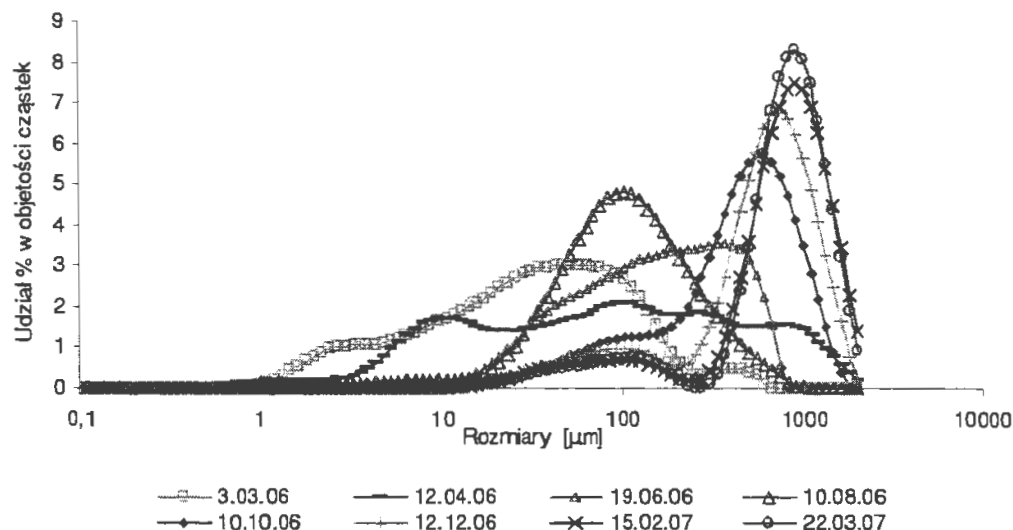
Rysunek 24. Funkcje $\Delta V(d_i)$ określone dla zawiesiny glonów w czasie badań laboratoryjnych w próbach pobranych w sierpniu 2006 r.

Tabela 11. Składy granulometryczne kultury glonów wyhodowanej w warunkach laboratoryjnych ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$

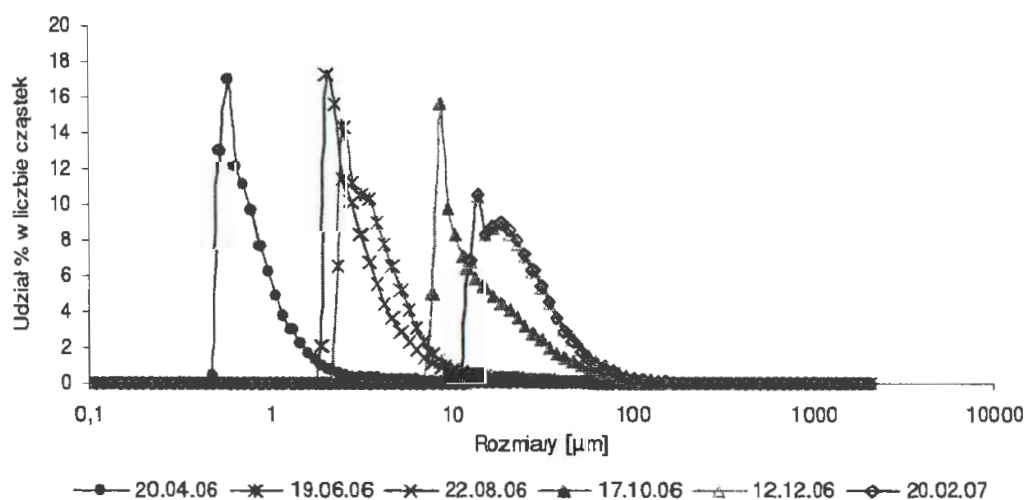
Data poboru	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
	Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
10.03.06	1,00	4,36	86,01	1117,91	2000,00
12.04.06	0,56	5,81	33,55	217,92	1002,37
19.06.06	2,24	30,06	144,02	457,94	796,21
13.07.06	1,42	24,23	228,06	935,04	2000,00
10.08.06	1,59	26,02	71,80	187,90	709,63
20.09.06	2,00	49,85	267,11	668,78	1261,92
10.10.06	2,24	55,05	310,89	709,73	1261,92
15.11.06	3,17	83,41	539,42	1090,93	2000,00
12.12.06	10,02	87,98	602,80	1168,26	2000,00
17.01.07	10,02	100,98	661,71	1220,82	2000,00
15.02.07	11,25	137,25	818,52	1437,26	2000,00
22.03.07	12,62	126,41	784,64	1357,03	2000,00
17.04.07	10,02	114,71	824,48	1424,59	2000,00

Tabela 12. Średnie średnice cząstek kultury glonów ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$ oraz wyliczone wymiary fraktalne

Data poboru	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$							Wymiar fraktalny D
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)	
10.03.06	2,16	2,56	3,04	3,59	4,63	7,03	21,23	1,14
12.04.06	1,27	1,88	2,80	3,06	4,75	8,08	17,52	2,44
19.06.06	4,71	7,36	11,50	13,55	22,97	45,84	100,44	2,17
13.07.06	2,96	4,19	5,94	7,30	11,47	22,15	53,73	2,08
10.08.06	3,63	6,02	9,97	11,07	19,33	37,49	69,34	2,30
20.09.06	4,11	6,82	11,33	14,06	26,02	59,77	131,08	2,12
10.10.06	4,81	8,25	14,13	17,52	33,42	79,02	182,58	2,15
15.11.06	21,43	31,08	45,07	55,70	89,81	178,94	439,31	2,11
12.12.06	26,41	36,32	49,95	64,35	100,46	202,02	519,26	2,01
17.01.07	23,14	32,89	46,77	61,88	101,19	218,93	549,32	1,97
15.02.07	24,85	34,31	47,37	66,99	110,01	255,49	679,43	1,94
22.03.07	29,12	40,16	55,39	75,58	121,77	267,69	672,22	1,96
17.04.07	23,07	32,63	46,14	63,81	106,13	244,12	667,53	1,94

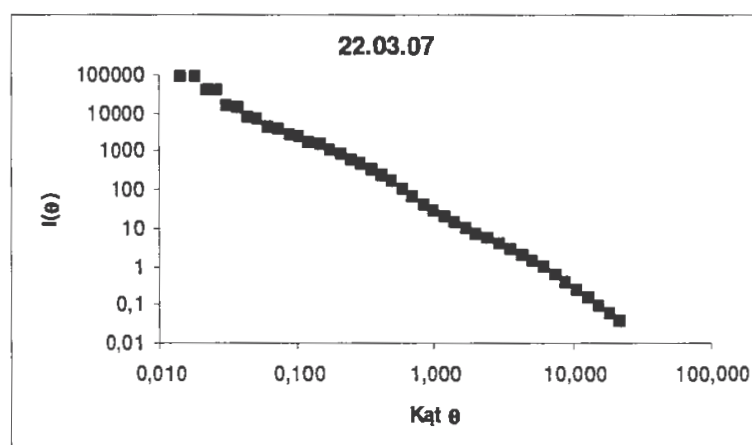
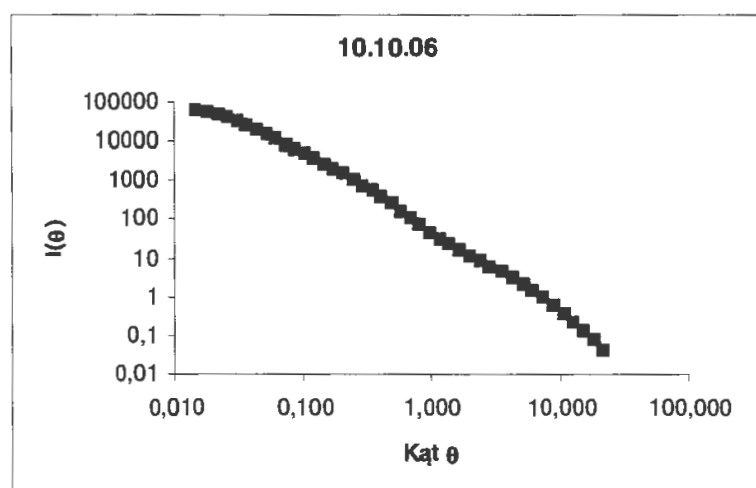
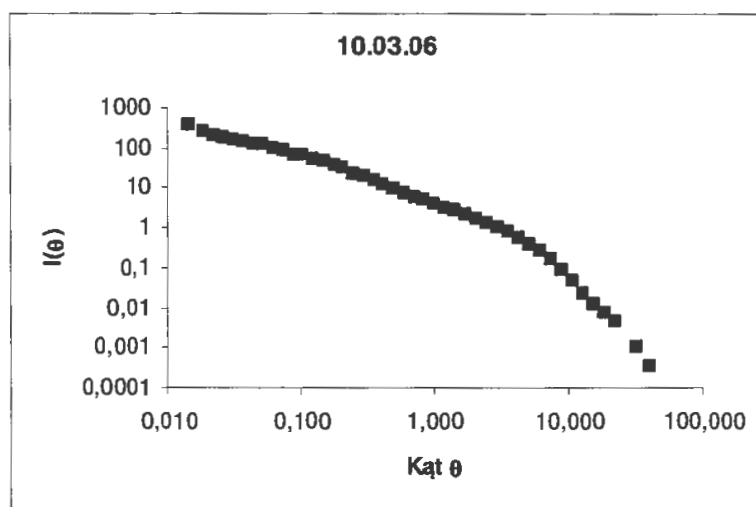


Rysunek 25. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny glonów określone w próbach wody pobranych z akwarium w okresie od 03.03.2006 r. do 22.03.2007 r.



Rysunek 26. Funkcje $\Delta n(d_i)$ zawiesiny glonów określone w próbach wody pobranych z akwarium w okresie od 20.04.2006 r. do 20.02.2007 r.

W początkowym okresie hodowli glonów obserwowano wzrost wartości średnich średnic zastępczych zbioru cząstek zawiesiny (Tabela 43). Po 6. miesięcznym okresie trwania eksperymentu oznaczano zbliżone do siebie wartości średnich średnic zastępczych.



Rysunek 27. Przykładowe wykresy funkcji $I(\theta)$ wykorzystywanej do wyznaczenia wymiaru fraktalnego D_3 zawiesiny glonów hodowanych w warunkach laboratoryjnych (na górze rysunków podano daty poboru prób)

Na Rysunku 75 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji $I(\theta)$ wykorzystywanych do wyznaczania wymiarów fraktalnych zawiesiny glonów. Po 6. miesiącach hodowli glonów wykresy funkcji $I(\theta)$, w układzie podwójnie logarytmicznym, w całym zakresie badanych kątów rozproszenia światła monochromatycznego były funkcjami liniowymi. W początkowym okresie hodowli glonów funkcje $I(\theta)$ wykazywały załamanie charakterystyczne dla cząstek koloidalnych w obszarze dużych kątów rozproszenia światła.

Wyniki obliczeń wymiaru fraktalnego w czasie badań zawiesiny glonów hodowanych w warunkach laboratoryjnych przedstawiono w Tabeli 43. Po dwóch tygodniach hodowli glonów wymiar fraktalny wyniósł 1,14 a po 26. dniach 2,44. Z dalszym wydłużaniem czasu trwania eksperymentu wartość wymiaru fraktalnego zawiesiny glonów malała, a po 6. miesiącach przyjmowała wartości bliskie 2,0.

Uzyskane wyniki można wytłumaczyć następującym mechanizmem. W chwili rozpoczęcia hodowli w wodzie obecne były pojedyncze komórki glonów oraz kolonie glonów tworzące zawiesiny o strukturze liniowej. W miarę upływu czasu następował wzrost wielkości komórek glonów i kolonii glonów, których struktura stawała się coraz bardziej zwarta. To powodowało wzrost wymiaru fraktalnego do wartości 2,44. W wyniku asymilacji dwutlenku węgla przez glony, dochodziło do naruszenia równowagi węglanowo-wapniowej i wytrącania się węglanu wapnia z wody, który wytrącał się w postaci zawiesiny o rozproszonej strukturze na koloniach glonów. Powodowało to obniżanie się wartości wymiaru fraktalnego do wartości 2,0. Po okresie 6. miesięcy powstały trwałe struktury zawiesiny i z tego powodu wymiary fraktalne w czasie dalszych badań nie ulegały zmianie.

Celowe jest kontynuowanie badań nad wykorzystaniem granulometru laserowego do szybkiej identyfikacji struktury zawiesin fito- i zooplanktonu w wodach powierzchniowych.

2.4 Skład granulometryczny zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych i osadzie czynnym

5.4.1. Miejsca poboru prób

Wielkość cząstek tworzących zawiesinę w ściekach surowych ma wpływ na szybkość biodegradacji zanieczyszczeń organicznych oraz na strukturę kłaczków osadu czynnego. Dotychczas przy ocenie pracy oczyszczalni ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych nie brano pod uwagę wpływu

składu granulometrycznego zawiesin na sprawność technologiczną oczyszczalni ścieków. Skład granulometryczny osadu czynnego oraz jego wymiar fraktalny powinien mieć wpływ na właściwości sedymentacyjne osadu czynnego oraz na zawiesiny zawarte w ściekach oczyszczonych. W piśmiennictwie przedmiotu brak jest danych na ten temat. Dlatego przedstawione w pracy wyniki badań mają charakter pionierski w skali kraju.

Do badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w ściekach surowych, oczyszczonych i osadach pobierano próby z oczyszczalni w Kątach Wrocławskich, Sobótce, Kobierzycach, Siechnicach i Mirkowie Starym. Charakterystyka technologiczna tych obiektów została przedstawiono w Tabeli 44.

Tabela 13. Ogólna charakterystyka oczyszczalni, z których pobierano próby do badań składu granulometrycznego zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych i osadzie czynnym

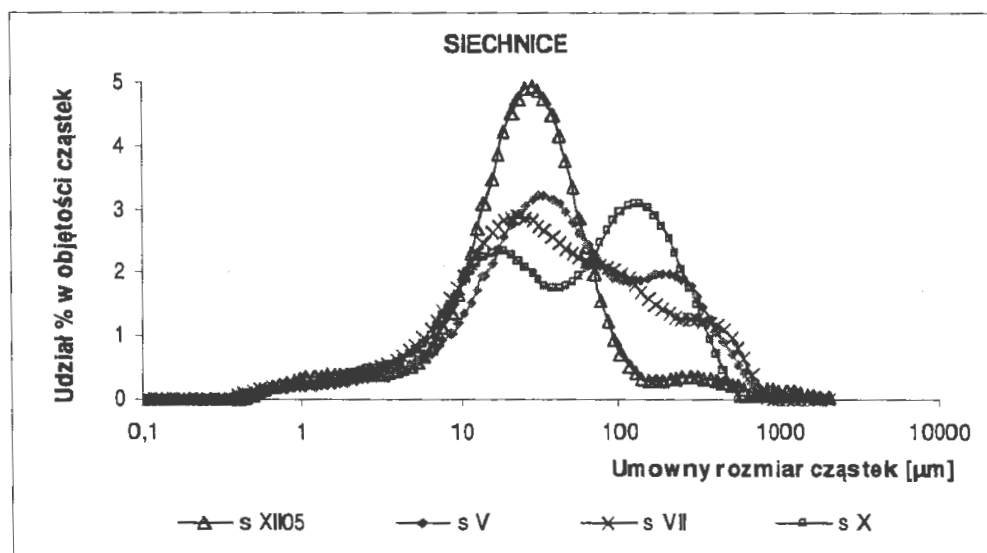
Miejscowość	Przepustowość obliczeniowa	Układ technologiczny
Kąty Wrocławskie	2740 m ³ /d	Komora rozprężna, krata mechaniczna, piaskownik podłużny, pompownia ścieków, reaktor bez-tlenowy, reaktor biologiczny (z osadem czynnym), osadnik wtórny podłużny
Kobierzyce	300 m ³ /d	Zlewnia ścieków dowożonych, krata łukowa, piaskownik pionowy z pompą piasku, reaktor biologiczny z osadem czynnym, osadnik wtórny pionowy
Mirków Stary	750 m ³ /d	Zlewnia ścieków dowożonych, pompownia ścieków I°, krata łukowa, piaskownik pionowy przedmuchiwany, pompownia ścieków II°, reaktor biologiczny (z osadem czynnym), osadnik wtórny typu Rex
Siechnice	1800 m ³ /d	Zbiornik ścieków dowożonych, komora połączeniowa, krata rzadka, pompownia ścieków, krata mechaniczna, piaskownik z osadnikiem wstępnym, dwa zbiorniki SBR działające naprzemiennie
Sobótka	1420 m ³ /d	Krata mechaniczna, pompownia ścieków, piaskownik, komory osadu czynnego, osadniki wtórne, stawy fakultatywne
Żórawina	360 m ³ /d	Punkt zlewny, kraty gęste, piaskownik, pompownia ścieków, zbiornik SBR, staw fakultatywny

5.4.2. Wybrane wyniki badań

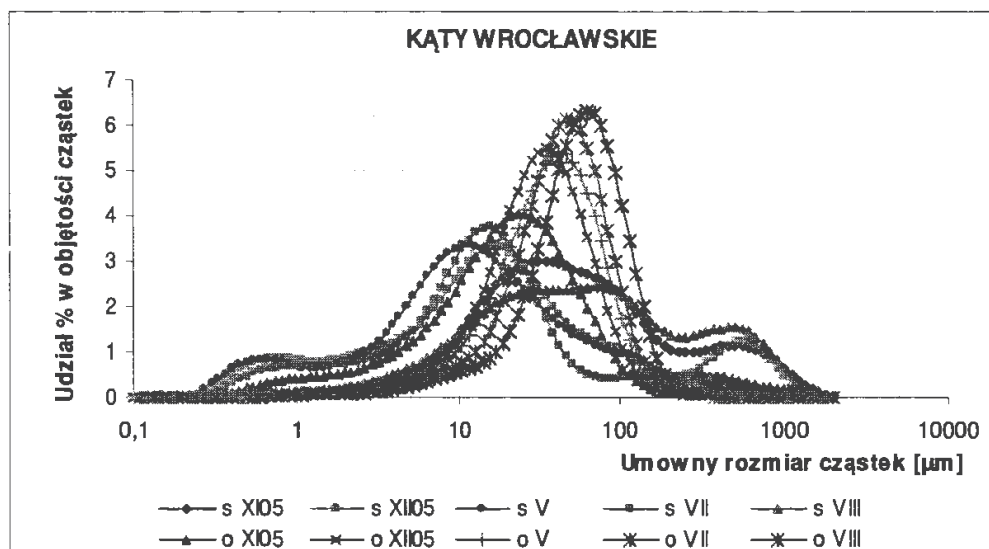
Na Rysunkach 76-84 oraz w Tabelach 45-50 przedstawiono wybrane wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych oraz osadu czynnego.

Porównując wykresy funkcji $\Delta V(d_i)$ przedstawione na Rysunkach 77-84, można wyciągnąć wniosek, że skład granulometryczny zawiesin zawartych w ściekach surowych i oczyszczonych, pomimo że wykazuje zmienność w czasie, jest cechą charakterystyczną dla danego systemu kanalizacji.

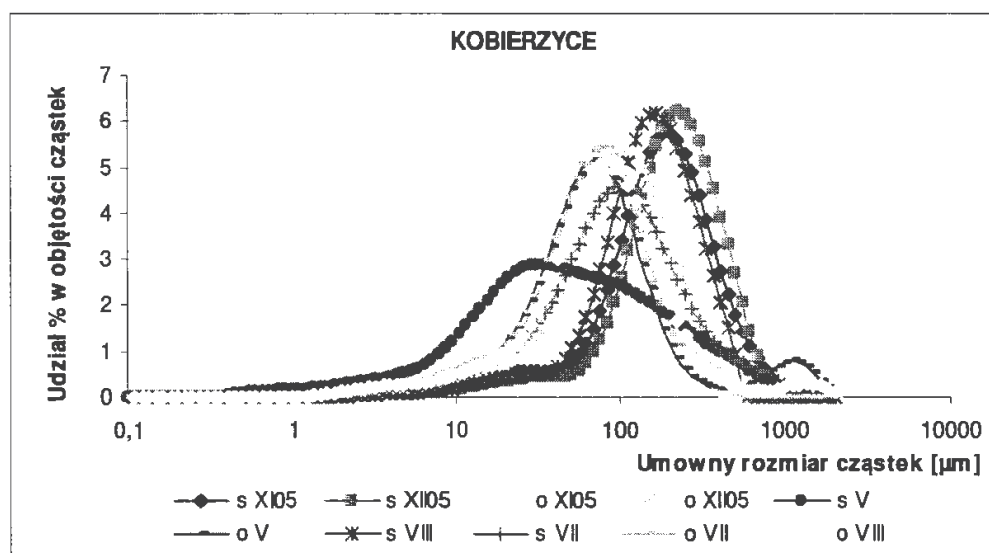
W ściekach surowych stwierdzano znacznie większy udział w całkowitej objętości zawiesiny cząstek o średnicach umownych 0-10 μm w porównaniu do zawiesin obecnych w ściekach oczyszczonych. Największy udział w całkowitej objętości zawiesin w ściekach surowych miały cząstki o średnicy umownej 10-100 μm , podczas gdy w ściekach oczyszczonych metodą osadu czynnego przeważały cząstki z zakresu 40-300 μm . Wzrost wielkości cząstek w ściekach oczyszczonych to efekt wynoszenia kłaczków osadu z osadników wtórnych.



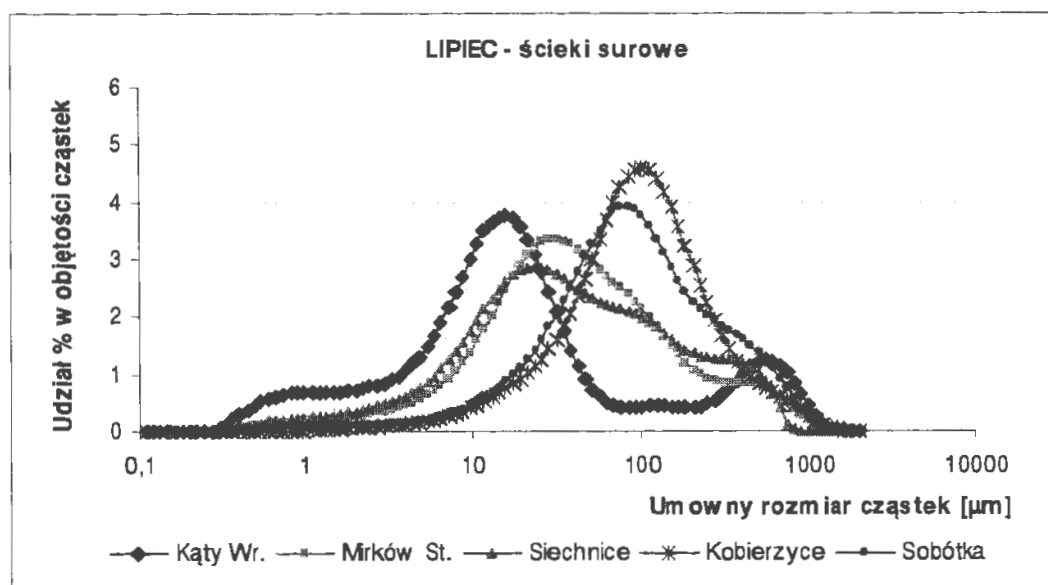
Rysunek 28. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbkach ścieków surowych pobranych na oczyszczalni w Siechnicach w 2006 r.



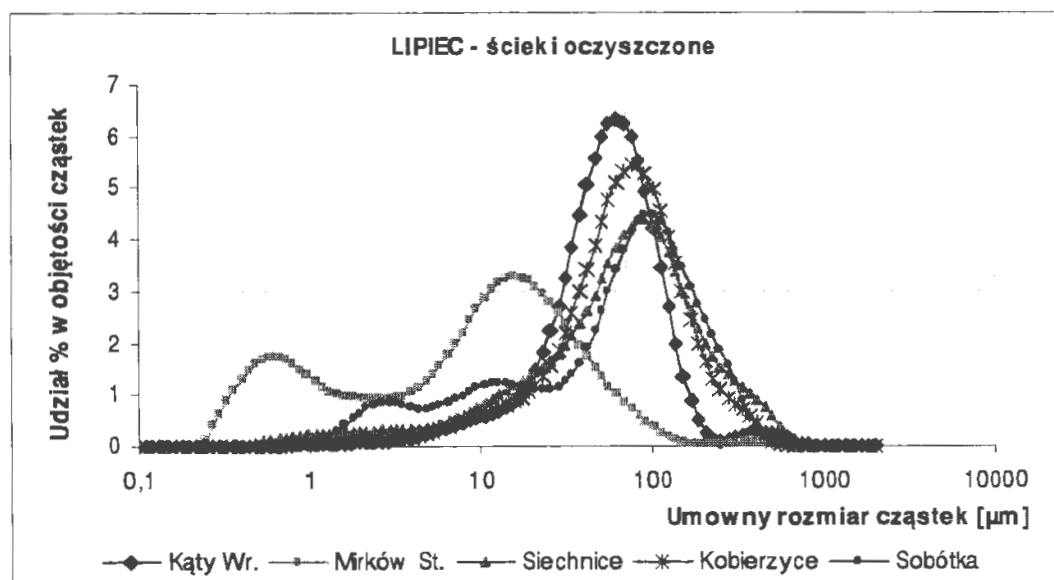
Rysunek 29. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach ścieków surowych (s) i oczyszczonych (o) pobranych z oczyszczalni w miejscowości Kąty Wrocławskie w miesiącu listopadzie (XI) i grudniu (XII) 2005 r. oraz maju (V), lipcu (VII) i sierpniu (VIII) 2006 r.



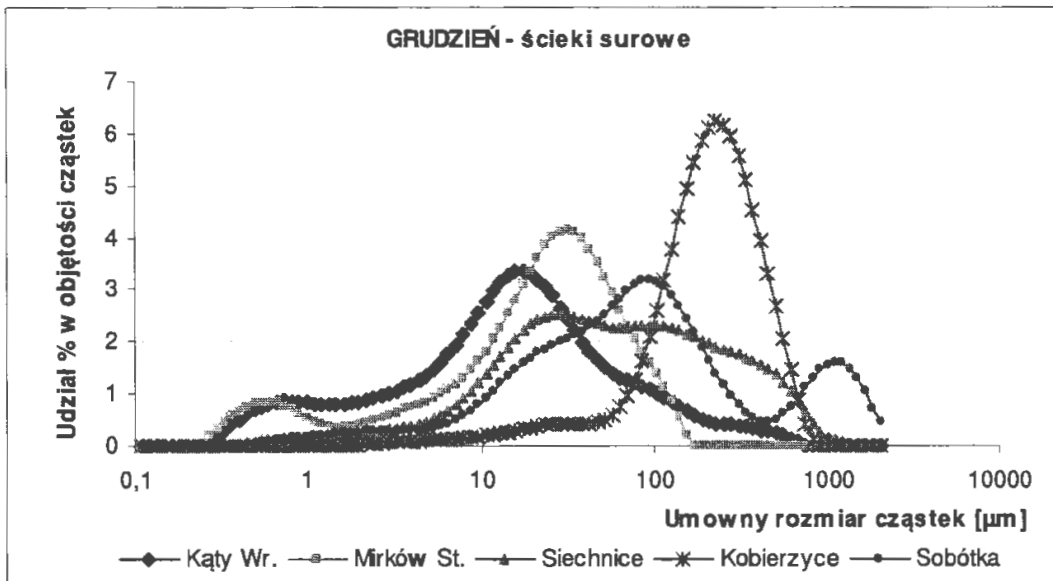
Rysunek 30. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach surowych (s) i oczyszczonych (o) pobranych z oczyszczalni w miejscowości Kobierzyce w miesiącu listopadzie (XI) i grudniu (XII) 2005 r. oraz maju (V), lipcu (VII) i sierpniu (VIII) 2006 r.



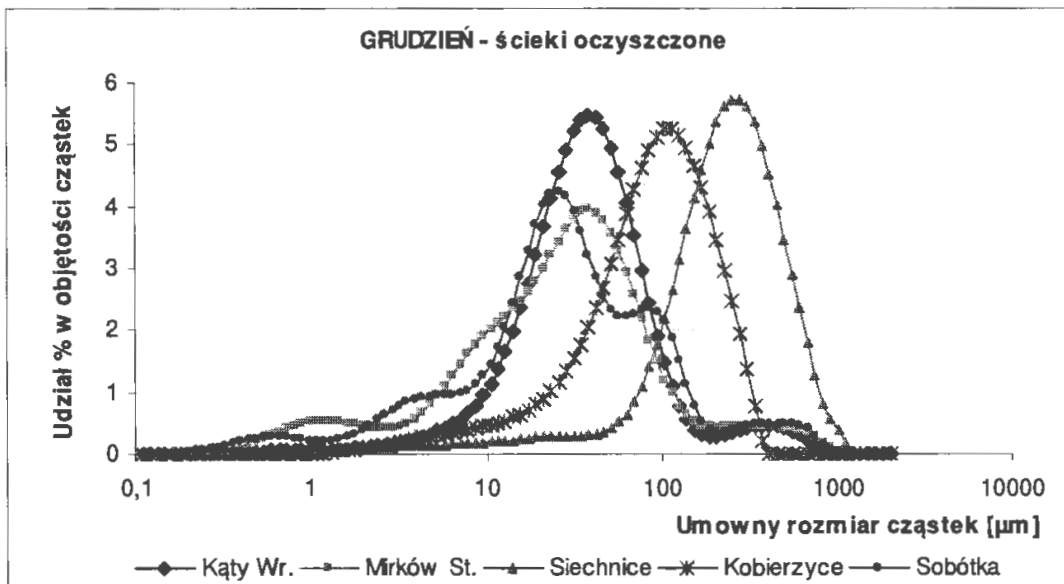
Rysunek 31. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach ścieków surowych pobranych z pięciu monitorowanych oczyszczalni w miesiącu lipcu 2006 r.



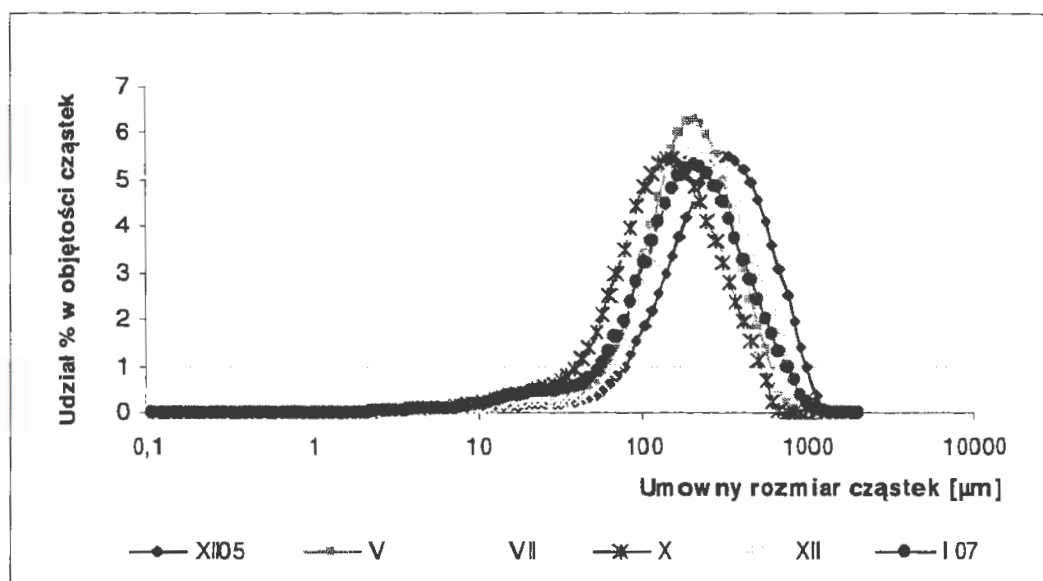
Rysunek 32. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach ścieków oczyszczonych pobranych z pięciu monitorowanych oczyszczalni w miesiącu lipcu 2006 r.



Rysunek 33. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach ścieków surowych pobranych z pięciu monitorowanych oczyszczalni w miesiącu grudniu 2006 r.



Rysunek 34. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach ścieków oczyszczonych pobranych z pięciu monitorowanych oczyszczalni w miesiącu grudniu 2006 r.



Rysunek 35. Funkcje $\Delta V(d_i)$ zawiesiny określone w próbach osadu czynnego pobranych na oczyszczalni ścieków w Siechnicach w 2006 r.

Tabela 14. Składy granulometryczne zawiesin w ściekach surowych dopływających do oczyszczalni w Kątach Wrocławskich ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek $V(d_i)$

Miesiąc poboru próby	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
	Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
11.05	0,40	9,42	44,39	421,32	2000,00
12.05	0,25	1,17	14,18	87,68	709,63
05.06	0,22	1,25	12,07	68,74	275,95
07.06	0,25	1,73	14,55	389,67	2000,00
08.06	0,40	7,70	53,32	474,22	2000,00
10.06	0,36	5,47	30,51	176,84	796,21
11.06	0,36	4,82	30,76	278,53	1002,37
12.06	0,36	6,06	35,44	453,27	1782,50
01.07	0,40	9,20	65,26	394,69	1124,68
04.07	0,40	7,64	51,45	448,86	1588,66
05.07	0,36	2,34	14,27	86,14	709,63

Tabela 15. Średnie średnice zawiesin w ściekach surowych dopływających do oczyszczalni w Kątach Wrocławskich ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$

Data poboru próby	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$						
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)
04.11.05	0,98	1,62	2,68	3,11	5,54	11,46	23,39
04.11.05	0,98	1,62	2,68	3,11	5,54	11,46	23,39
03.12.05	0,48	0,59	0,73	0,93	1,29	2,30	7,46
09.05.06	0,47	0,58	0,72	0,92	1,29	2,30	6,65
21.07.06	0,53	0,68	0,87	1,14	1,67	3,21	9,43
30.08.06	0,72	1,09	1,65	2,05	3,46	7,23	17,05
10.10.06	0,69	0,95	1,30	1,72	2,72	5,71	15,36
20.11.06	0,69	0,93	1,25	1,61	2,47	4,88	12,86
18.12.06	0,68	0,95	1,33	1,74	2,77	5,76	14,70
15.01.07	0,79	1,14	1,66	2,12	3,48	7,28	17,47
23.04.07	0,86	1,35	2,10	2,50	4,24	8,56	19,30
21.05.07	0,70	0,92	1,23	1,50	2,21	3,96	9,77

Tabela 16. Składy granulometryczne zawiesin w ściekach oczyszczonych odpływających z oczyszczalni w Kątach Wrocławskich ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek $V(d_i)$

Data poboru próby	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
	Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
04.11.05	0,36	3,39	19,70	67,73	1782,50
03.12.05	0,40	4,91	28,49	77,25	200,00
09.05.06	0,45	11,08	38,99	94,06	632,46
21.07.06	0,56	17,94	53,72	113,02	893,37
30.08.06	0,50	13,91	41,38	90,61	399,03
10.10.06	0,56	17,66	47,89	102,08	399,05
20.11.06	0,40	8,25	30,35	72,33	2000,00
18.12.06	0,45	12,05	42,19	97,90	2000,00
15.01.07	0,56	12,77	42,70	89,72	796,21
23.04.07	0,63	16,36	74,19	490,69	1002,37
21.05.07	0,45	11,98	59,31	132,61	2000,00

Tabela 17. Średnie średnice zawiesin w ściekach oczyszczonych odpływających do oczyszczalni w Kątach Wrocławskich ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$

Data poboru próby	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$						
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)
04.11.05	0,68	0,93	1,26	1,63	2,52	5,02	12,97
03.12.05	0,79	1,10	1,53	2,02	3,23	6,81	18,09
09.05.06	0,97	1,61	2,66	3,34	6,20	14,44	30,19
21.07.06	1,08	1,89	3,31	4,24	8,42	21,46	42,48
30.08.06	1,12	1,97	3,49	4,20	8,14	18,99	35,95
10.10.06	1,14	2,16	4,07	4,74	9,67	22,94	41,26
20.11.06	0,82	1,34	2,17	2,75	5,03	11,67	24,94
18.12.06	0,96	1,67	2,88	3,59	6,93	16,64	34,28
15.01.07	1,13	2,04	3,66	4,23	8,17	18,22	34,50
23.04.07	1,55	2,45	3,87	4,69	8,16	17,19	37,23
21.05.07	0,93	1,42	2,18	3,08	5,61	14,42	37,29

Tabela 18. Składy granulometryczne osadu czynnego pobranego na oczyszczalni w Kątach Wrocławskich ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek $V(d_i)$

Data poboru próby	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
	Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
04.11.05	0,40	11,87	34,81	92,41	796,21
03.12.05	0,56	15,78	42,59	92,69	709,63
09.05.06	0,50	16,07	40,32	90,31	1261,92
21.07.06	0,56	14,60	40,08	95,47	2000,00
30.08.06	0,45	13,81	36,76	87,18	893,37
10.10.06	0,45	13,53	37,68	95,56	709,63
20.11.06	0,56	16,18	43,96	100,39	632,46
18.12.06	0,56	14,90	42,34	111,29	1002,37
15.01.07	0,45	13,49	40,04	100,48	893,37
23.04.07	0,45	13,26	36,09	97,41	1261,92
21.05.07	0,36	2,34	14,27	86,14	709,63

Na Rysunku 84 porównano średnice D(1,0) i D(3,2) zawiesin w ściekach surowych dopływających do kontrolowanych oczyszczalni. Wartości D(1,0) i D(3,2) uzyskane dla oczyszczalni Kąty Wrocławskie, Mirków,

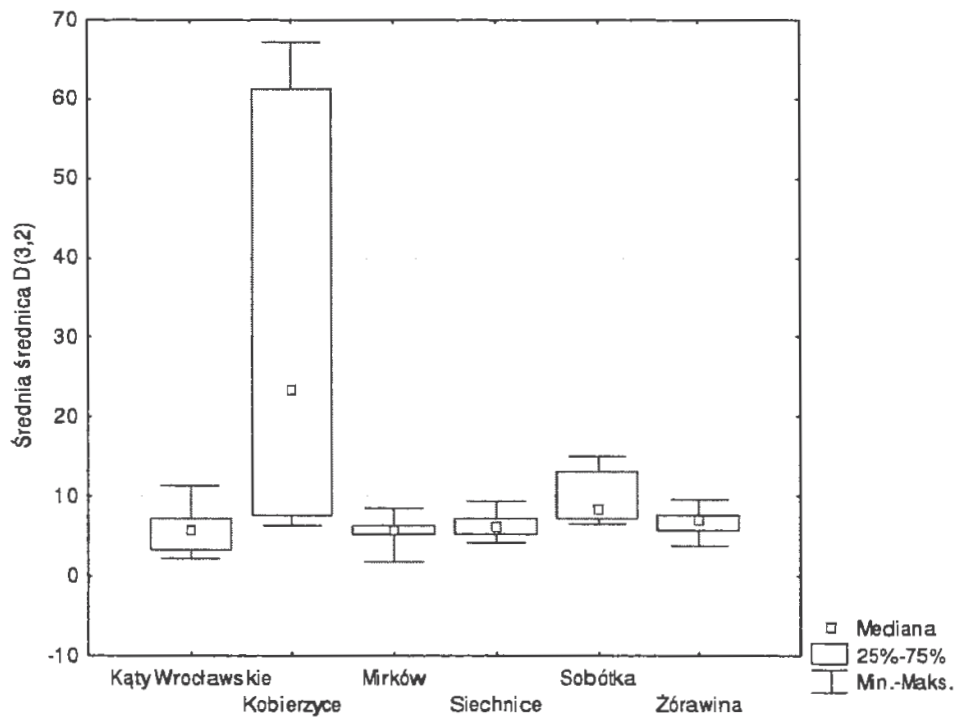
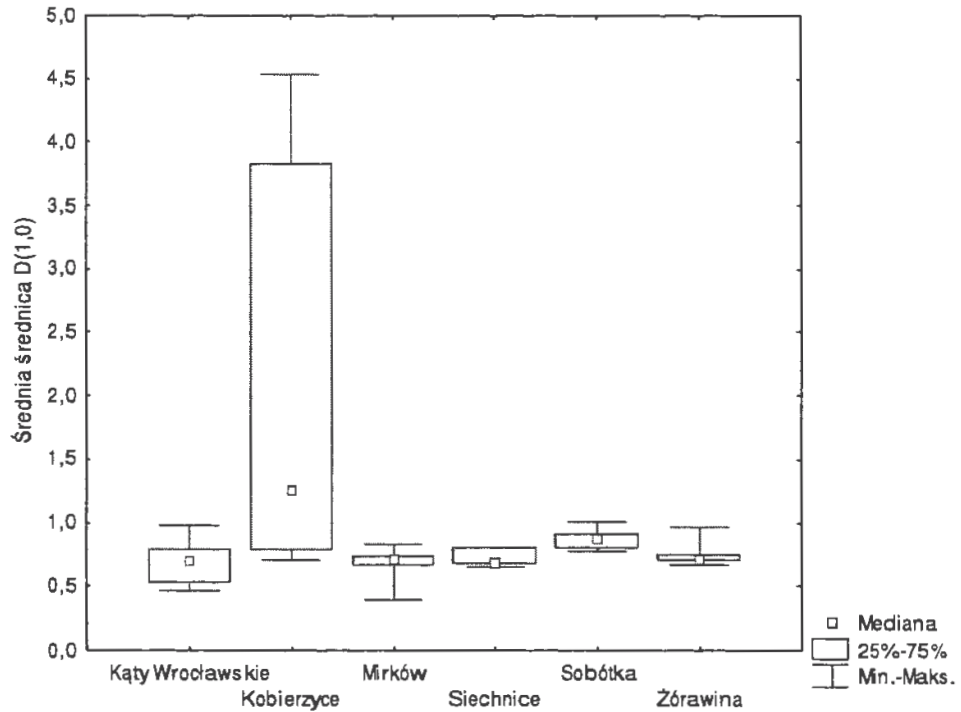
Siechnice, Żórawina były zbliżone do siebie, a dla oczyszczalni w Kobierzycach wartości tych średnic znacznie przewyższały pozostałe. Należy to wiązać ze zróżnicowaniem składu ścieków odprowadzanych do kanalizacji w Kobierzycach.

Tabela 19. Średnie średnice osadu czynnego pobranego na oczyszczalni w Kątach Wrocławskich ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$

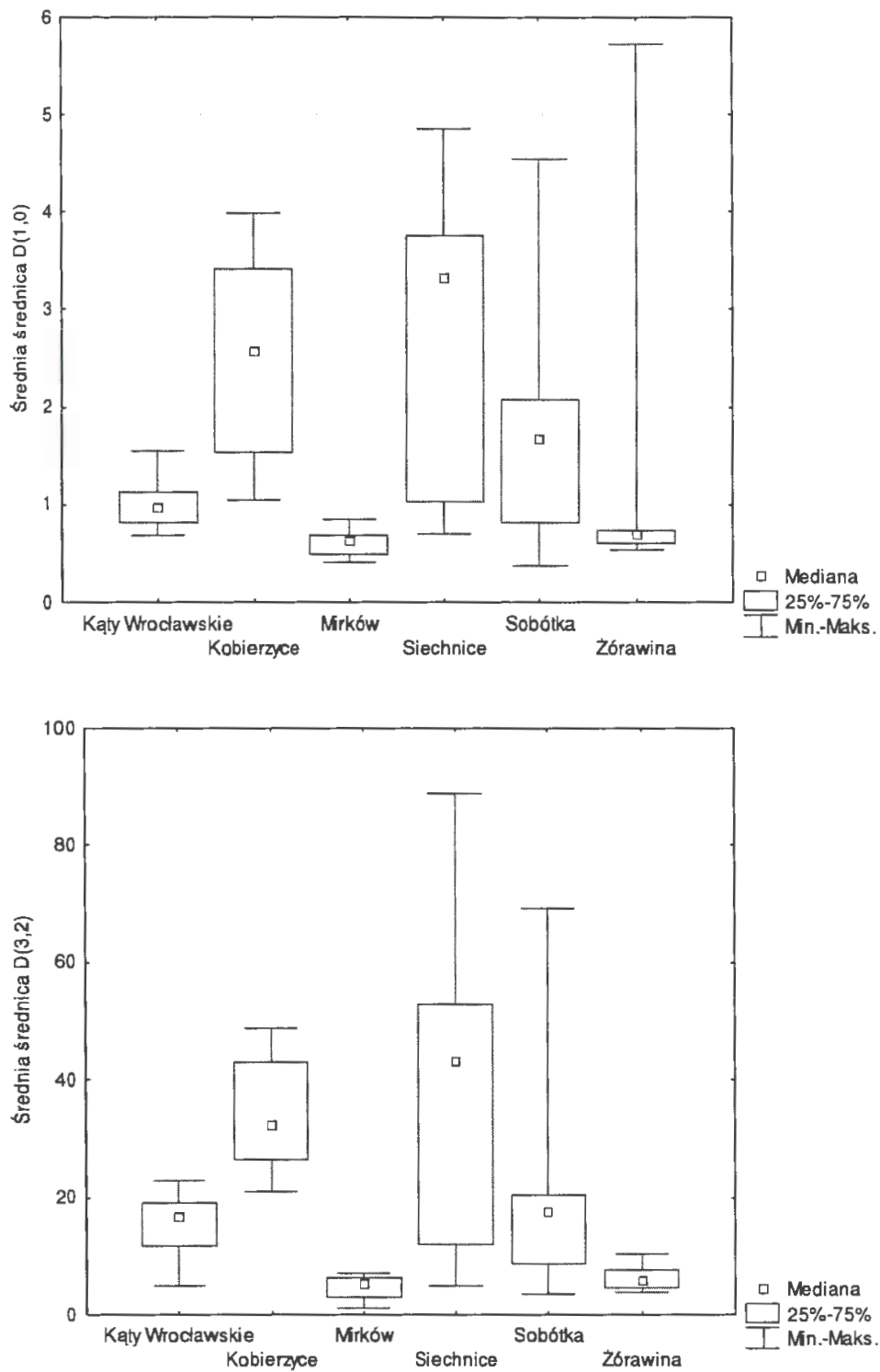
Miesiąc poboru próby	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$						
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)
04.11.05	0,79	1,44	2,62	3,18	6,37	15,47	29,09
03.12.05	1,29	2,39	4,43	5,04	9,95	22,35	39,41
09.05.06	1,00	2,18	4,74	4,83	10,63	23,81	38,03
21.07.06	1,11	2,06	3,84	4,35	8,63	19,40	34,33
30.08.06	0,93	1,77	3,36	3,89	7,94	18,81	33,51
10.10.06	0,83	1,43	2,47	2,96	5,60	12,72	24,79
20.11.06	1,11	2,09	3,96	4,56	9,26	21,66	39,05
18.12.06	1,11	2,09	3,93	4,41	8,80	19,69	34,68
15.01.07	0,94	1,71	3,14	3,75	7,51	17,97	33,91
23.04.07	0,92	1,72	3,22	3,71	7,44	17,18	30,17
21.05.07	0,79	1,44	2,62	3,18	6,37	15,47	29,09

Większe zróżnicowanie wartości średnic D(1,0) i D(3,2) uzyskano dla zawiesin w ściekach oczyszczonych (Rysunek 85). Największe wartości mediany zbioru wyników dla tych średnic zaobserwowano dla oczyszczalni w Siechnicach. Były one blisko 8. krotnie większe w porównaniu do mediany zbioru wyników średnic D(1,0) i D(3,2) dla zawiesin w ściekach oczyszczonych na oczyszczalniach w Mirkowie i Żórawinie.

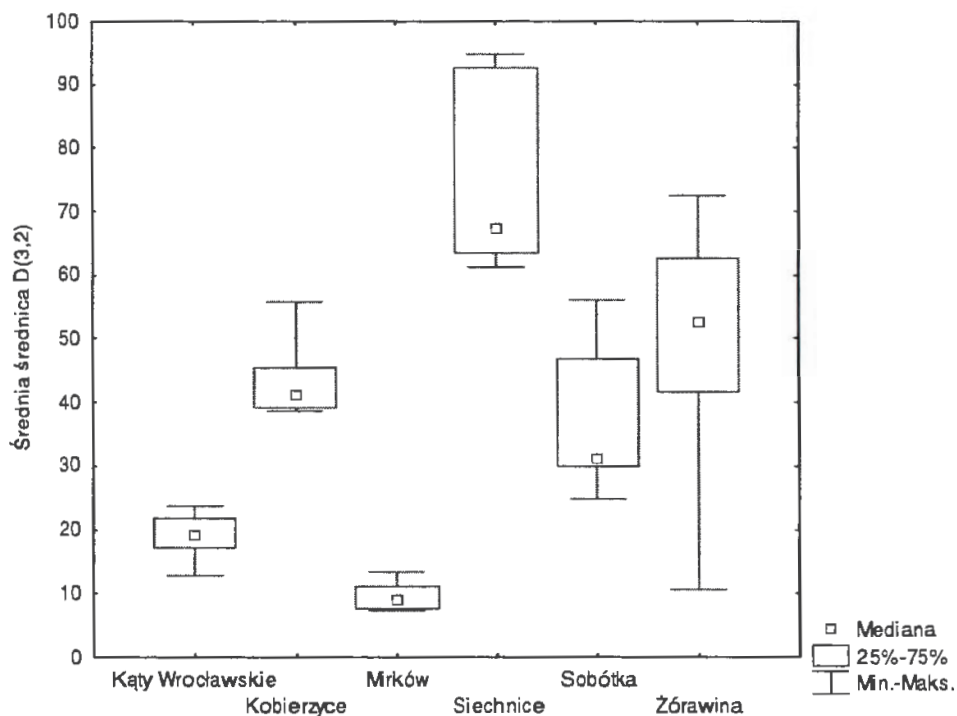
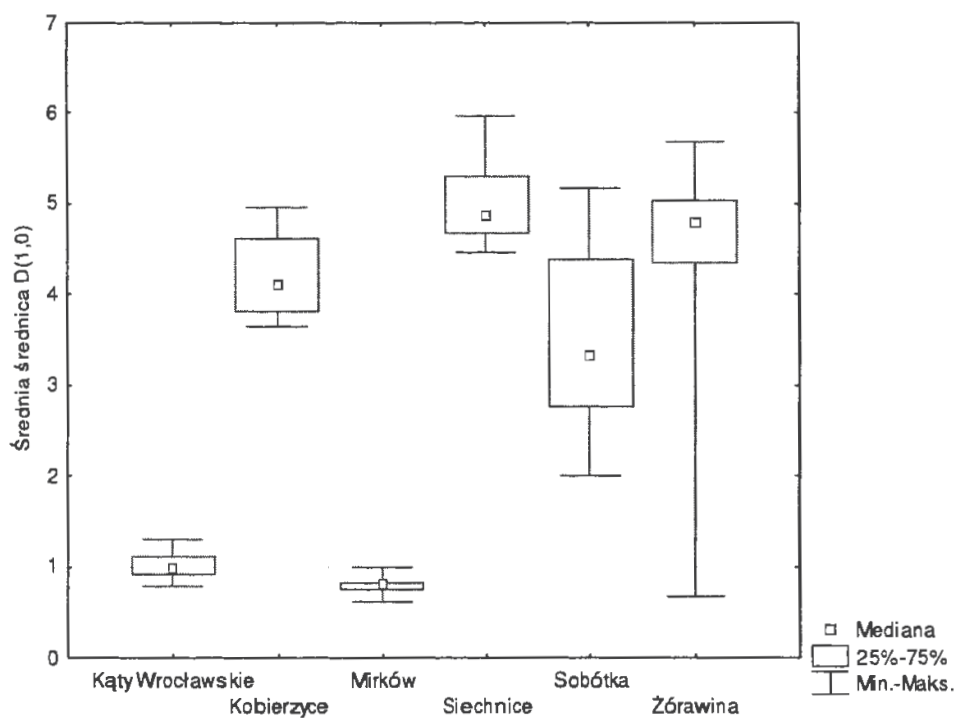
Mediany zbioru średnic D(1,0) i D(3,2) w ściekach oczyszczonych nie były skorelowane z wartościami median zbioru wyników uzyskanych dla zbioru średnic D(1,0) i D(3,2) dla osadów czynnych (porównaj Rysunek 85 z Rysunkiem 86). Wynika z tego wniosek, że skład granulometryczny zawiesin wynoszonych z osadników wtórnych w mniejszym stopniu zależy od składu granulometrycznego osadu czynnego, a w większym od rozwiązania konstrukcyjnego osadnika wtórnego, obciążenia hydraulicznego jego powierzchni oraz obciążenia powierzchni osadnika wtórnego masą zawiesin.



Rysunek 36. Porównanie średnich średnic $D(1,0)$ i $D(3,2)$ cząstek zawieszin w ściekach surowych w monitorowanych oczyszczalniach ścieków



Rysunek 37. Porównanie średnich średnic $D(1,0)$ i $D(3,2)$ cząstek zawiesin w ściekach oczyszczowych w monitorowanych oczyszczalniach ścieków



Rysunek 38. Porównanie średnich średnic D(1,0) i D(3,2) osadu czynnego w monitorowanych oczyszczalniach ścieków

W Tabelach 51-53 przedstawiono wybrane wyniki wyliczonych wymiarów fraktalnych zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych oraz osadów czynnych. Na Rysunku 87 porównano uzyskane wyniki badań w układzie wykresów blokowych przedstawiających wyznaczone wartości mediany, kwartyli 25% i 75% oraz wartości minimalnych i maksymalnych. Mediana zbioru wyników wymiarów fraktalnych zawiesin w ściekach surowych wyniosła 1,89, w ściekach oczyszczonych 1,98, a osadów czynnych 2,18. Zawiesina osadu czynnego charakteryzuje się znacznie większym stopniem zagęszczenia materii niż miało to miejsce w przypadku zawiesin obecnych w ściekach surowych i oczyszczonych.

Tabela 20. Przykładowe wyniki obliczeń wymiarów fraktalnych zawiesin w ściekach surowych

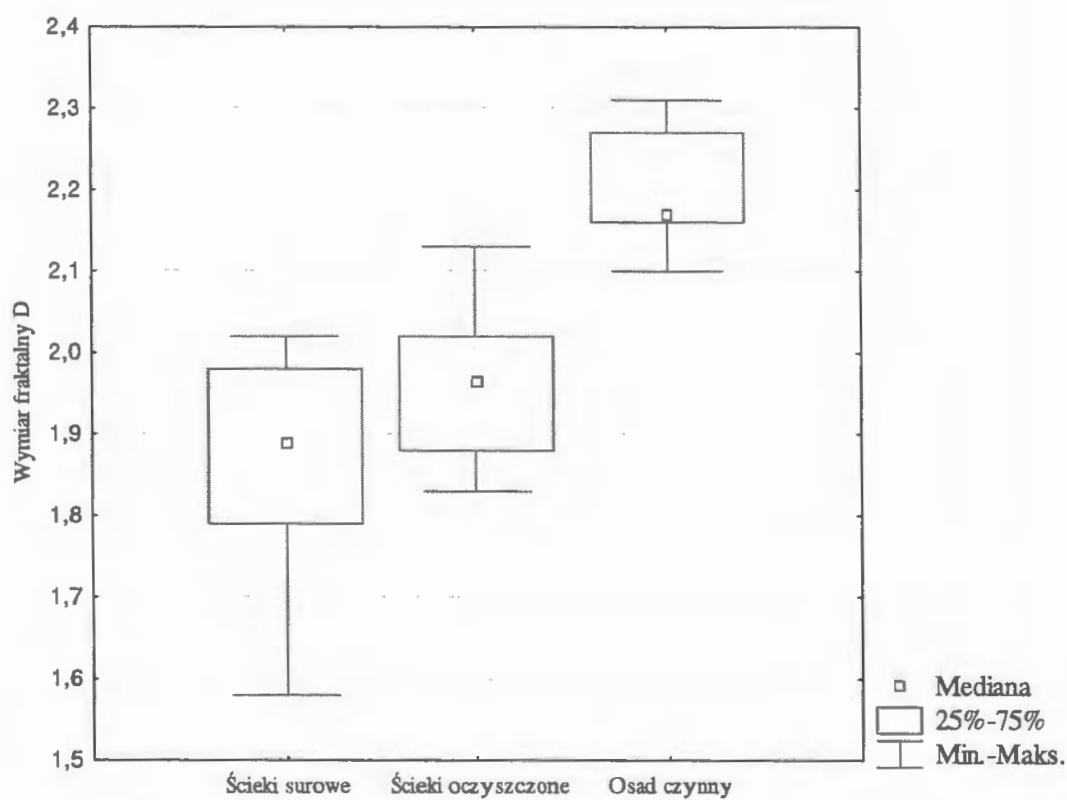
Oczyszczalnia	Data poboru próby	Wymiar fraktalny D
Kobierzyce	21.07.06	2,02
Sobótka	21.07.06	1,98
Żórawina	21.07.06	1,86
Kobierzyce	20.11.06	1,98
Kąty Wrocławskie	18.12.06	1,89
Mirków	18.12.06	1,89
Siechnice	18.12.06	1,93
Siechnice	04.04.07	1,58
Kąty Wrocławskie	04.04.07	1,79
Kobierzyce	04.04.07	1,67

Tabela 21. Przykładowe wyniki obliczeń wymiarów fraktalnych zawiesin w ściekach oczyszczonych

Oczyszczalnia	Data poboru próby	Wymiar fraktalny D
Kąty Wrocławskie	04.11.05	1,83
Sobótka	30.08.06	1,94
Kobierzyce	30.08.06	2,02
Siechnice	30.08.06	1,99
Kąty Wrocławskie	18.12.06	2,11
Kobierzyce	18.12.06	1,92
Sobótka	18.12.06	1,83
Mirków	15.01.07	2,13
Sobótka	15.01.07	1,88
Żórawina	15.01.07	2,01

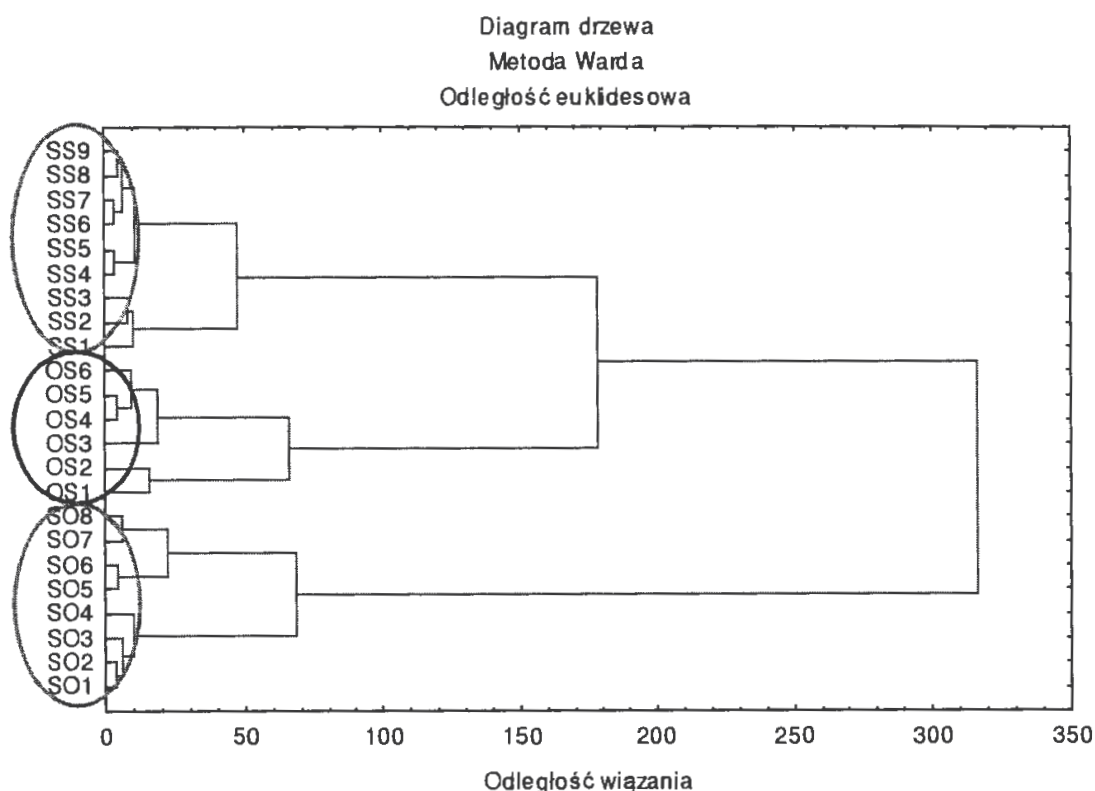
Tabela 22. Przykładowe wyniki obliczeń wymiarów fraktalnych zawiesin osadu czynnego

Oczyszczalnia	Data poboru próby	Wymiar fraktalny D_3
Kąty Wrocławskie	30.08.06	2,28
Kobierzyce	20.11.06	2,17
Kąty Wrocławskie	20.11.06	2,27
Siechnice	20.11.06	2,11
Żórawina	15.01.07	2,16
Sobótka	15.01.07	2,22
Mirków	15.01.07	2,16
Kąty Wrocławskie	21.05.07	2,31
Mirków	21.05.07	2,17
Siechnice	21.05.07	2,10



Rysunek 39. Porównanie wymiarów fraktalnych zawiesin w ściekach surowych, w ściekach oczyszczonych metodą osadu czynnego oraz osadów czynnych

Na uwagę zasługuje fakt, że wymiar fraktalny zawiesin w ściekach oczyszczonych jest znacznie mniejszy od wymiaru fraktalnego dla osadu czynnego. Świadczy to, że w ściekach oczyszczonych obecne są nie tylko zawiesiny wchodzące w skład kłaczków osadu czynnego, ale również cząstki zawiesin o innej, mniej zwartej, strukturze przestrzennej. Wyniki badań wymiaru fraktalnego osadu czynnego oraz ścieków oczyszczonych w przyszłości mogą służyć do diagnozowania przyczyn niskiej sprawności usuwania zawiesin w osadnikach wtórnych.



Rysunek 40. Dendrogram klasyfikacji wyników badań składu granulometrycznego zawiesin w ściekach surowych (SS) i oczyszczonych (SO) oraz osadu czynnego (OS) uzyskanych dla oczyszczalni w Siechnicach w 2006 r.

Na Rysunku 88 przedstawiono przykładowy dendrogram uporządkowania wyników badań składu granulometrycznego zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych i osadu czynnego pobranego do badań w różnych miesiącach w oczyszczalni ścieków w Siechnicach w roku 2006. Uzyskano zgrupowania wyników powiązanych z rodzajem badanej próby. Skład granulometryczny zawiesin w ściekach surowych tworzyły skupiska o większych

odległościach euklidesowych w stosunku do osadu czynnego oraz zawiesin obecnych w ściekach oczyszczonych. Skład granulometryczny zawiesin zawartych w ściekach surowych był bardziej zbliżony do składu granulometrycznego osadu czynnego niż do zawiesin w ściekach oczyszczonych. Oznacza to, że na skład granulometryczny osadu czynnego znaczny wpływ mają zawiesiny obecne w ściekach surowych, ale w mniejszym stopniu wpływają one na zawiesiny odpływające z oczyszczalni, na które wpływ ma skład granulometryczny osadu czynnego.

Uzyskane wyniki potwierdzają ogólnie przyjęty pogląd wpływu zawiesin zawartych w ściekach surowych na osad czynny, ale dotychczas teza ta nie znajdowała potwierdzenia w danych eksperymentalnych. Przedstawione wyniki badań wskazują, że o składzie granulometrycznym osadu czynnego decydują również inne czynniki, gdyż struktura przestrzenna, scharakteryzowana wymiarem fraktalnym zawiesin osadu czynnego jest inna niż zawiesin w ściekach dopływających do oczyszczalni. Prowadzone są dalsze badania nad składem granulometrycznym zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych i osadach czynnych celem ustalenia jego wpływu na sprawność działania urządzeń technologicznych, głównie osadników wtórnych oraz właściwości sedymentacyjnych i reologicznych osadu czynnego.

2.5 Skład granulometryczny zawiesin w wodach z płukania rurociągów

W rurociągach wodociągowych tworzą się na ściankach biofilmy, odkładają się produkty korozji, a w wyniku naruszenia równowag chemicznych wytrącają się minerały, głównie węglan wapnia. Zjawiskom tym towarzyszy powstawanie w przewodach wodociągowych osadów.

W czasie płukania rurociągów następuje wynoszenie silnie uwodnionych tlenków żelaza i manganu oraz cząstek osadów lub biofilmów zalegających na powierzchni osadów lub powierzchni rurociągów. Cząstki te są związane siłami kohezji lub adhezji. Zjawisko odrywania cząstek z powierzchni danego ciała nosi nazwę erozji.

Miarą adhezji i kohezji jest praca, jaką należy wykonać, aby oderwać cząstki od powierzchni. Przy działaniu sił stycznych na drodze dx , wywołujących na jednostkowej powierzchni naprężenia τ_0 , jest wykonywana przez te siły praca:

$$W = \tau_0 \cdot dx \quad (1)$$

Podczas przepływu wody przez rurowciąg na granicy warstwy przyściennej uśrednione naprężenia styczne można wyliczyć z zależności:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{8} \lambda v^2 \quad (2)$$

gdzie ρ jest gęstością wody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], λ to współczynnik strat liniowych wyliczony ze wzoru Collebrooka White, [-], a v określa średnią prędkość wody w rurowciągu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Celem badań składu granulometrycznego popłuczyn było wykazanie, czy w czasie przeprowadzenia tej czynności wypłukiwane są duże cząstki osadów zalegających w rurowciągach, czy tylko drobne cząstki osadów słabo związane z powierzchnią rurowciągu. Badania prowadzono dla popłuczyn pobranych w czasie płukania rurowciągów w Kielcach, Dąbrowie Górniczej i Bogatyni. Wybrane wyniki badań przedstawiono w Tabelach 54 i 55.

Badania wykazały, że w czasie płukania z rurowciągów usuwane są głównie drobne cząstki o wymiarach średnich średnic zastępczych porównywalnych z wymiarami cząstek zawiesin stwierdzanymi w wodach odrzańskich (porównaj Tabele 55 z Tabelą 39). Największy udział w całej ilości cząstek zawiesiny stanowiły cząstki o wymiarach do $5 \mu\text{m}$.

Badania wykazały, że w czasie płukania przewodów wodociągowych usuwane są z nich jedynie drobne cząstki zalegające na powierzchni osadów. Cząstki te są związane słabymi siłami kohezji i adhezji. Płukanie nie powoduje usuwania osadów silnie związanych siłami adhezji z powierzchnią rurowciągów.

Na Rysunku 89 przedstawiono wykresy funkcji $I(\theta)$ dla wybranych prób wód po płukaniu rurowciągów. Dla większości analiz uzyskano dwa wymiary fraktalne badanych zawiesin (Tabela 56).

Dla dużych kątów rozproszenia światła, które odpowiadają cząstkom o najmniejszych średnicach wymiary fraktalne przyjmowały wartości z przedziału od 2,35 do 2,97. Świadczy to, że najmniejsze cząstki zawiesiny zawarte w wodach płucznych miały zwartą budowę przestrzenną, w skrajnym przypadku bliską cząstkom sferycznym. Większe cząstki charakteryzowały się liniową strukturą przestrzenną, typową dla zawiesiny kłaczkowatej powstającej w procesie flokulacji. Można stąd wnioskować, że duże cząstki zawiesiny obecne w wodach z płukania rurowciągów to silnie uwodnione tlenki żelaza charakteryzujące się niską gęstością, przez co są łatwo wmywane z rurowciągów. Drobne cząstki stanowią natomiast submikrono-

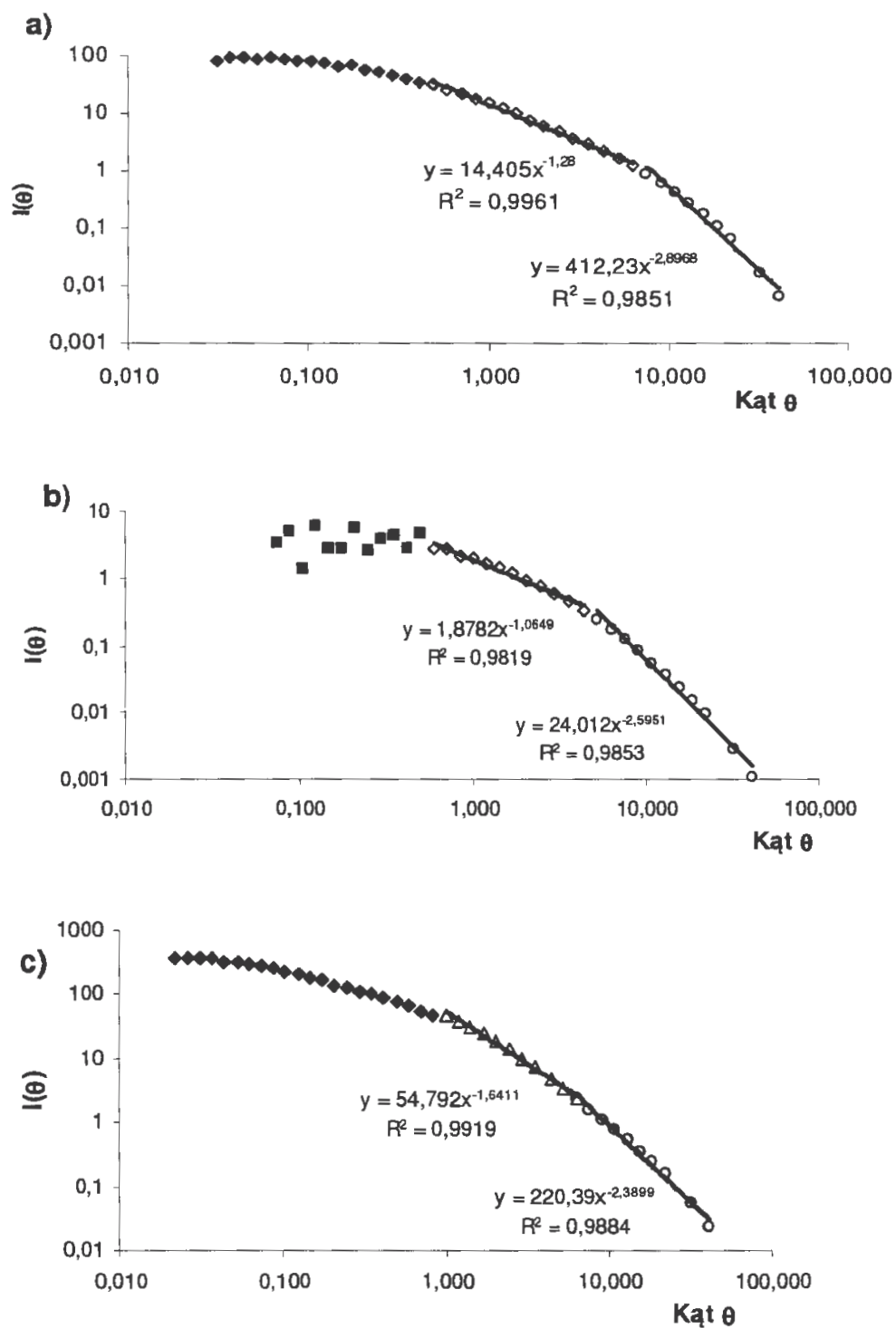
wej wielkości drobin zestarzałych osadów związanych silnie z powierzchnią rurociągów wyerodowane siłami hydrodynamicznymi powstającymi przy wzroście prędkości przepływu wody przez rurociąg.

Tabela 23. Składy granulometryczne zawiesin w popłuczynach powstających w czasie płukania rurociągów ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $V(d_i)$

Kod	Średnica cząstek ustalona na podstawie $V(d_i)$				
	Minimum	Percentyl 10%	Mediana	Percentyl 90%	Maksimum
O1	0,28	1,78	12,84	56,09	447,74
O2	0,28	1,68	9,09	55,62	282,51
O3	0,25	1,60	12,92	51,71	399,05
O4	0,36	1,48	10,56	53,79	282,51
O5	0,28	1,23	9,14	55,11	2000,00
O6	0,36	734,21	1119,64	1504,91	2000,00
O7	0,25	1,19	6,83	15,89	25,18
O8	0,25	1,95	12,57	65,14	355,66
O9	0,28	2,05	15,30	59,31	224,40
O10	0,28	1,21	5,37	23,65	50,24
O11	0,25	1,96	11,35	105,22	709,63
O12	0,25	2,30	26,39	119,93	399,05

Tabela 24. Średnie średnice cząstek w popłuczynach powstających w czasie płukania rurociągów ustalone na podstawie funkcji $n(d_i)$

Kod	Średnia średnica cząstek ustalona na podstawie $n(d_i)$						
	D(1,0)	D(2,0)	D(2,1)	D(3,0)	D(3,1)	D(3,2)	D(4,3)
O1	0,59	0,77	1,01	1,24	1,79	3,17	8,34
O2	0,67	0,88	1,17	1,34	1,89	3,07	7,19
O3	0,54	0,69	0,90	1,12	1,62	2,94	8,37
O4	0,77	0,98	1,24	1,45	1,98	3,18	8,45
O5	0,63	0,80	1,00	1,17	1,59	2,51	6,44
O6	0,63	0,78	0,97	1,10	1,45	2,17	4,94
O7	0,53	0,70	0,92	1,11	1,61	2,81	6,46
O8	0,57	0,76	1,02	1,23	1,80	3,16	8,01
O9	0,60	0,80	1,05	1,31	1,93	3,54	9,77
O10	0,64	0,84	1,10	1,24	1,72	2,69	5,96
O11	0,49	0,64	0,83	1,04	1,52	2,79	7,13
O12	0,53	0,67	0,84	1,10	1,58	2,99	11,24



Rysunek 41 Wykresy funkcji $I(\theta)$ wykorzystywanej do wyznaczania wymiaru fraktalnego D zawiesin zawartych w popłuczynach uzyskanych z płukania rurociągów a) próba O4, b) próba O10, c) próba O11

Tabela 25. Wymiary fraktalne zawiesin w popłuczynach powstających w czasie płukania rurociągów

Kod próby	Wymiar fraktalny D	
O1	1,62	2,63
O2	1,20	2,70
O3	1,41	2,50
O4	1,28	2,90
O5	1,40	2,97
O6	2,46	
O7	2,23	
O8	1,35	2,61
O9	1,29	2,35
O10	1,06	2,60
O11	1,64	2,39
O12	1,89	

Przykład badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w wodach uzyskiwanych z płukania rurociągów obrazuje kolejne zalety zastosowania analizy składu granulometrycznego zawiesin w procesach technologicznych związanych z eksploatacją systemów wodociągowych.

LITERATURA

- Afoakwa E.O., Paterson A, Fowler M. (2007): Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate. *European Food Research and Technology* DOI 10.1007/s00217-007-0652-6
- Agrawal Y.C., McCave I.N., Riley J.B. (1997): Laser diffraction size analysis. In: J.P.M. Syvitski (ed.), *Principles, methods, and application of particle size analysis*. Cambridge University Press, Cambridge. 119-128.
- Ahmed H.A.M, Drzymala J. (2005): Two-dimensional fractal linearization of distribution curves. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, **39**, 129-139.
- Alba F.I. (1999): Acoustic spectroscopy as a technique for the particle sizing of high concentration colloids, emulsions and suspensions. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects*, **153**, 495-502.
- Allen T. (1997): *Particle size measurement. Vol.1 - Powder sampling and particle size measurement*. 5th ed. Chapman and Hall Ltd., London.
- Andersson S. (1990): *Om mineraljordens och mullens rumsutfyllande egenskaper. En teoretisk studie*. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord, XXVI., Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Azema N., Pouet M.F., Berho C., Thomas O. (2002): Wastewater suspended solids study by optical methods. *Physicochemical and Engineering Aspects*, **204**: 131-140.
- Bachalo W.D. (2005): Spray characterization: techniques, capabilities, limitations, accuracy, and error analysis. *18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Irvine, CA.
- Bale A.J. (1996): In situ laser optical particle sizing. *Journal of Sea Research*, **36**, 1-2: 31-36.
- Bayle S., Azema N, Berho C., Pouet M.F., Lopez-Cuesta J.M., Thomas O. (2005): Study of heterogeneous suspensions: A new quantitative approach coupling laser granulometry and UV-vis spectrophotometry. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **262**: 242-250.

- Berho C., Pouet M. F., Bayle S., Azema N., Thomas O. (2004): Study of UV-vis responses of mineral suspensions in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **248**: 9-16.
- Bertino L. Wackernagel H. (2002): *Case studies of change-of-support problems*. IMPACT Project Report No 20 (Contract IST-1999-11313). Technical Report N-21/02/G ENSMP - ARMINES, Centre de Géostatistique 35 rue Saint Honoré, F-77305 Fontainebleau, France <http://cg.ensmp.fr>.
- Biggs C.A., Lant P.A. (2000): Activated sludge flocculation: on-line determination of floc size and effect of shear. *Wat. Res.* **2000**, **34**, 9: 2542-2550.
- Chu B. (1991): *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Academic Press, New York: 13-20.
- de Boer G.B., de Weerd C., Thoenes D., Goossens H.W.J. (1987): Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characterisation*, **4**: 14-19.
- Blodgett C., Jakubauskas M., Price K., and Martinko E. (2000): *Remote Sensing-based Geostatistical Modeling of Forest Canopy Structure*. ASPRS 2000 Annual Conference, Washington, D.C., May 22-26, 2000.
- Boeker E., van Grondelle R. (2002): *Fizyka środowiska*. PWN, Warszawa.
- Boer de G.B., de Weerd, C., Thoenes, D., Goossens, H.W.J. (1987): Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characterisation*, **4**: 14-19.
- Bushell G. (2005): Forward light scattering to characterise structure of flocs composed of large particles. *Chemical Engineering Journal*, **111**: 145-149.
- Chapman G. V. (2000): Instrumentation for flow cytometry. *Journal of Immunological Methods*, **243**: 3-12
- Chu B. (1991): *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Academic Press, Boston.
- Clark R.A. (1995): The use laser diffraction for the evaluation of the aerosol clouds generated by medical nebulizers. *International Journal of Pharmaceutics*, **115**: 69-78.
- Comtois P. (2001): John Tyndall and the floating matter of the air. *Aerobiologia*, **17**: 193-202.
- Cornillault, J. (1972): Particle size analyser. *Applied Optics*, **11**: 265-268.
- Ebie K, Yamaguchi D., Hoshikawa H., Shirozu T., (2006): New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbid meter with two optical systems in series. *Water Research*, **40**: 681-691.

- Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J. (Eds.) (1997): *Handbook of Heterogeneous Catalysis*. VCH, Weinheim.
- Eshel G. Levy G. J., Mingelgrin U., Singer M. J. (2004): Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68**: 736-743.
- Etxebarria N, Arana G., Antolin R, Diez E., Borge G., T. Posada T., Raposo J.C. (2005): Chromium powder as a reference material for the quality control of particle-size measurement by laser diffraction. *Powder Technology*, **155**: 85-91.
- Förster J. (1996): Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Wat. Sci. Tech.*, **33**, 6: 39-48.
- Förster J. (1998): The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 10: 83-90.
- Gerds G. Luedke G. (2006): FISH and chips: Marine bacterial communities analyzed by flow cytometry based on microfluidics. *Journal of Microbiological Methods*, **64**: 232-240.
- Gillberg L., Eger L., Jepsen S.E. (1990): Effect of Coagulants on Particle Distribution and Concentration. W: *Chemical Water and Wastewater Treatment*, Ed. Hahn H.H. and Klute R., Springer Verlag, Heidelberg.
- Gippel C.J. (1994): Monitoring turbidity of stream water. *Austr. J. Soil Water Cons.*, **7**: 37-44.
- Gradziński, R., Kosteczka, A., Radomski, A., Unrug, R. (1986): *Zarys sedymentologii*. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- Govoreanu R. (2004): *Activated sludge flocculation dynamics: On-line measurement methodology and modeling*. Universiteit Gent Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Gent (ISBN 90-5989-031-0).
- Guan J., Waite D.T., Amal R. (1998): Rapid structure characterization of bacterial aggregates. *Environ. Sci. Technol.*, **32**: 3735-3742.
- Guinier A. (1994): *X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals, and amorphous bodies*. Dover, New York.
- Heinrich S., Mirko Peglow M., Henneberg M., Drechsler J., Mörl L. (2004): *Fluidized bed spray granulation: analysis of dynamic particle populations and heat and mass transfers*. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A., 121-128

- Hejluk L., Banasik K. (2002): *Badania zmienności uziarnienia rumowiska unoszonego w małej zlewni rolniczej*. Mat. Sympozjum Naukowego nt. Erozja gleb i transport rumowiska rzecznego, Zakopane 10-12.10.2002, str. 81-87.
- Ho L., Newcombe G. (2005): Effect of NOM, turbidity and floc size on the PAC adsorption of MIB during alum coagulation. *Water Research*, **39**: 3668-3674.
- Houghton J.I., Burgess J.E., Stephenson T. (2002): Off-line particle size analysis of digested sludge. *Wat. Res.*, **36**: 4643-4647.
- Hutorowicz A. (2005): *Opracowanie standardowych objętości komórek do szacowania biomasy wybranych taksonów glonów planktonowych wraz z określeniem sposobu pomiarów i szacowania*. Olsztyn (http://www.gios.gov.pl/dokumenty/oprac_stan_kom.doc)
- Issmer K. (2000): Optical methods in the grain-size analysis of fine-grained sediments. *Geological Quarterly*, **44**, 2: 205-210.
- Iyer R.S., Stanmore B. (1999): The effect of water absorption and the role of fines on the yield stress of dense fly ash slurries. *Cement and Concrete Research*, **29**: 765-767.
- Jarvis P., Jefferson B., Parsons S.A. (2005): Measuring floc structural characteristics. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. **4**: 1-18.
- Jonker R.R., Meulemans J.T., Dubelaar G.B.J., Wilkins M.F., Ringelberg J. (1995): Flow cytometry: A powerful tool in analysis of biomass distributions in phytoplankton. *Wat. Sci. Tech.*, **32**, 4: 177-182.
- Jauhiainen M. (2004): *Relationships of particle size distribution curve, soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity and their implications on water balance of forested and agricultural hillslopes*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Espoo (Finland) (ISBN 951-22-7194-X).
- Kawecka B., Eloranta P.V. (1994): *Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych*. PWN, Warszawa.
- Kerker M. (1969): *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. Academic Press, New York.
- Kim H.W., Choi M. (2003): In situ line measurement of mean aggregate size and fractal dimension along the flame axis by planar laser light scattering. *Journal of Aerosol Science*, **34**: 1633-1645.
- Kizil M.S., Peterson J., English W. (2000): The effect of coal particle size on colorimetric analysis of roadway dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**: 387-394.

- Kokhanovsky A.A., Weichert R. (2001): Multiple light scattering in laser particle sizing. *Applied Optics*, **40**, 9: 1507-1513.
- Kowalski W.P. (2004): Investigation of fine grains distribution using the sedimentation analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, **157-158**, 561-565.
- Kulczycki P. (2005): *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*. WNT, Warszawa.
- Lackowski M., Balachandran W., Krupa A., Kulon J., Jaworek A. (2002): Oczyszczanie gazów z drobnych cząstek przy użyciu naładowanych kropli, *Mat. VI Sympozjum Emisje zagrażające środowisku*, Kudowa Zdrój.
- Lee D.G., Bonner J.S., Garton L. S., Ernest A.N.S., Autenrieth R.L. (2000): Modeling coagulation kinetics incorporating fractal theories: a fractal rectilinear approach. *Water Research*, **34**, 7, 1987-2000.
- Leuschner R.G.K, Weaver A.C., Lillford P. J. (1999): Rapid particle size distribution analysis of Bacillus spore suspensions. *Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces*, **13**: 47-57.
- Li D.H., Ganczarczyk J.J.(1989): Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes. *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 1385-1389.
- Lilkov V., Dimitrowa E., Gaidardzhiev S. (1999): Microscopic and laser granulometric analyses of hydrating. *Cement and Concrete Research*, **29**: 3-8.
- Logan, B.E., Wilkinson D.B. (1990): Fractal geometry of marine snow and other biological aggregates., *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 130-136.
- Lunven M., Gentien P., Kononen K., Le Gall E., Daniélou M.M. (2003): In situ video and diffraction analysis of marine particles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**: 1127-1137.
- Madsen J., Harbo J., Nonn T.I., Blondel D., Hjertager B.H, Solberg T. (2003): *Measurement of droplet size and velocity distributions in sprays using Interferometric Particle Imaging (IPI) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)* ICLASS 2003, July 13-17, 2003, Sorrento, Italy
- Mauromicale G., Ierna A., Marchese M. (2006): Chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in field-grown potato as affected by nitrogen supply, genotype, and plant age. *Photosynthetica*, **44**, 1: 76-82.
- Maxwell K., Johnson G.N. (2000): Review article. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, **51**, 354: 659-668.
- McGarvey M., McGregor D., McKay R.B. (1997): Particie size analysis by laser diffraction in organic pigment technology. *Progress in Organic Coatings*, **31**: 228-231.

- McCave, I.N., Bryant, R.S., Cook, H.F., Coughanowr, C.A. (1986): Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, **56**: 61-564.
- McCrae C.H., Lepoetre A. (1996): Characterization of dairy emulsion by forward lobe laser light scattering – Application to milk and cream. *Inst. Dairy Journal*, **6**: 47-256.
- Mishchenko, M.I., Hovenier J.W., Travis L.D., (Eds.) (2000): *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications*. Academic Press, San Diego.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A. (2002): *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Moon B.H., Seo G.T., Lee T.S., Kim S.S., Yoon C.H. (2002): Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water Science and Technology*, **47**, 1: 65-70.
- Neis U., Tiehm A. (1997): Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents. *Wat. Sci. Tech.*, **36**, 4: 151-158.
- Neu T.R., Woelfl S., Lawrence J.R. (2004): Three-dimensional differentiation of photo-autotrophic biofilm constituents by multi-channel laser scanning microscopy (single-photon and two-photon excitation). *Journal of Microbiological Methods*, **56**: 161-172.
- Nobbmann U. (2006): *Protein Sizing by Light Scattering, Molecular Weight and Polydispersity*. Malvern, Worcestershire WR14 1XZ.
- Orzechowski Z. (1990): *Przeptywy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabatyczne*. PWN, Warszawa.
- Pedros R., Goulas Y., Jacquemoud S., Louis J., Moya I. (2004): A new leaf fluorescence model. In: *2nd International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence, 17-19 November 2004, Canadian Space Agency Conference Center, St-Hubert, Québec, Canada*.
- Pesic P. (2005): The sky is falling: Newton's droplets, Clausius's bubbles and Tyndall's "sky matter". *Eur. J. Phys.*, **26**: 189-193.
- Pluta M. (1982): *Mikroskopia optyczna*. PWN, Warszawa.
- Podhorecki R, Moniuk W., Bielski P., Sobieszuk P. Dąbrowiecki G. (2000): Bubble diameter correlation via numerical experiment. *Chemical Engineering Journal*, **113**, 1, 35-39.
- Porod G. (1951): Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloiden Systemen. I. Teil. *Kolloid Z.*, **124**: 83-114.

- Porod G. (1952): Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloiden Systemen. II. Teil. *Kolloid Z.*, **125**: 108-122.
- Porter J., Deere D., Hardman M., Edwards C., Pickup R. (1997): Mini review. Go with the flow - use of cytometry in environmental microbiology. *FEMS Microbiology Ecology*, **24**: 94-101.
- Porter J., Pickup P.W. (2000): Nucleic acid-based fluorescent probes in microbial ecology: application of flow cytometry. *Journal of Microbiological Methods*, **42**, 75-79.
- Praca zbiorowa (1974): *Encyklopedia fizyki*. PWN, Warszawa.
- Provencher, S. W. (1982): A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations. *Comput. Phys. Commun.* **27**: 213-227.
- Pye K., Blott S.J. (2004): Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. *Forensic Science International*, **144**: 19-27.
- Racinowski R., Szczepk T., Wach J. (2001): *Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędowych*. Wydaw. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Rawle A. (2005): *Basic principles of particle size analysis*. Malvern, Worcestershire WR14 1XZ.
- Rideal G. R. (2007): *Particle characterization. Setting the standard – the development of particle size reference standards*. http://whitehousescientific.com/pdf%20reports/intlabmate_0806_particlecharact.pdf.
- Rideal G. R., Jones R., M. (2000): The production and application of particle size reference standards. *International Laboratory (ISC)*, June 2000, 1-4.
- Robens E., Benzler B., Buchel G., Reichert H., Schumacher K. (2002): Investigation of characterizing methods for the microstructure of cement. *Cement and Concrete Research*, **32**: 87-90.
- Sadar M. (2002): *Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology*. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 - May 2, 2002, Reno, NV.
- Sampei M. i in. (2002): Seasonal and spatial variability in the flux of biogenic particles in the North Water, 1997-1998. *Deep-Sea Research II*, **49**: 5245-5257.
- Santos N.C., Castanho M. A. R. B. (1999): Teaching light scattering spectroscopy: The dimension and shape of tobacco mosaic virus. *Biophysical Journal*, **71**, 9: 1641-1646.
- Selomulya C. (2001): *The effect of shear on flocculation and floc size/structure*. The University of New South Wales, Australia (tezy rozprawy doktorskiej).

- Sorensen C. M. (2000): The optics of single particles and fractal aggregates. *Journal of Aerosol Science*, **31**: 952-954.
- Sorensen C. M. (2001): Light scattering by fractal aggregates: a review. *Aerosol Science and Technology*, **35**: 648-687.
- Sozański M.M, (Red.) (1999): *Technologia usuwania i unieszkodliwiania osadów z uzdatniania wody*. Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Stasicka Z. (2001): *Procesy fotochemiczne w środowisku*. Wydaw. Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Swithenbank J., Beer J.M., Taylor D.S., Abbot D., McGreath G.C. (1977): A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distributions. In: B.J. Zinn (Ed.), *Experimental Diagnostics in Das Phase Combustion Systems: Progress in Astronautics and Aeronautics*, **53**: 421-447.
- Syroeshkin A.V., Popov P.I., Grebennikova T.V., Frolov V.A., Pleteneva T.V. (2005): Laser diffraction for standardization of heterogeneous pharmaceutical preparations. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **37**: 927-930.
- Szewald O., Kotsis I. (2001): Setting the optimal technological parameters for producing ceramic substrates. *Ceramics International*, **27**: 467-471.
- Tang S., Ma Y., Sebastine I.M. (2001): The fractal nature of Escherichia coli biological flocs. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **20**: 211-218.
- Tani K., Kurokawa K., Nasu M. (1998): Development of a direct in situ PCR method for detection of specific bacteria in natural in environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**: 1536-1540.
- Using laser diffraction analysis in pigment sizing. Particle characterization. Application information A-1994A*. Beckman Coulter Inc.
- Vesey G., Hutton P., Champio, A., Ashbolt N., Williams K.L., Warton A., Veal D. (1994): Application of flow cytometric methods for the routine detection of Cryptosporidium and Giardia in water. *Cytometry*, **16**: 1-6.
- Viklander M. (1999): Dissolved and particle-bound substances in urban snow. *Wat. Sci. Tech.*, **39**, 12: 27-32.
- Vives-Rego J., Lebaron P, Nebe-von Caron G. (2000): Current and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology. *FEMS Microbiology Reviews*, **24**: 429-448.
- Vyas H.K., R.J. Bennett R.J., A.D. Marshall A.D. (2000): Influence of feed properties on membrane fouling in crossflow microfiltration of particulate suspensions. *International Dairy Journal*, **10**: 855-861.

- Waite T.D. (1999): Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment. *Colloids Surf. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **151**: 27-41.
- Weiss, E.L., Frock, H.N. (1976): Rapid analysis of particle-size distributions by laser light scattering. *Powder Technology*, **14**: 287-293.
- Wilson R, Leschonski K, Alex W, Allen T, Koglin B, Scarlett B. (1980): *BCR (Community Bureau of Reference) Quartz Reference Standards: Certification Report on Reference Materials of Defined Particle Size*, Commission of the European Communities, Document EUR 6825 EN.
- Wiłun Z. (2001): *Zarys geotechniki*. Wydaw. Komunikacji i Łączności Warszawa.
- Wright D.L., Jr (2000): Retrieval of optical properties of atmospheric aerosols from moments of the particle size distribution. *J. Aerosol Sci.*, **31**, 1: 1-18.
- Wu R.M., Lee D.J., Waite T.D. Guan J. (2002): Multilevel structure of sludge flocs. *J. Col. Inter. Sci.*, **252**: 383-392.
- Zaidi S.H., Altunbas B.J., Azzopardi B.J. (1998): A comparative study of phase Doppler and laser diffraction techniques to investigate drop size in annular two-phase flow. *Chemical Engineering Journal*, **71**: 135-143.
- Zhang H., Hu X. (2004): Catalytic oxidation of carbon monoxide in a fixed bed reactor. *Separation and Purification Technology*, **34**, 1-3: 105-108
- Zobrist J., Müller S.R., Ammann A., Mottier V., Ochs M., Schoenenberger R., Eugster J. (2000): Quality of roof runoff for groundwater infiltration. *Wat. Res.*, **34**, 5: 1455-1462.



ISSN 0208-8029

ISBN 978-83-89475-14-6

5

Bibl. podlegna

45903

IBS PAN
Sema