

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT INŻYNIERII OCHRONY ŚRODOWISKA

mgr inż. EWA BURSZTA-ADAMIAK

ROZPRAWA DOKTORSKA

pt.

**BADANIA NAD ZASTOSOWANIEM
GEOWŁÓKNIN DO PRZECIWDZIAŁANIA
KOLMATACJI W PROCESIE INFILTRACJI**

Promotor
dr hab. inż. Janusz Łomotowski

WROCŁAW, kwiecień 2005



322296L/1

Badania składu granulometrycznego wód wykonano w ramach projektu badawczego KBN nr 3 P04G 051 25 pt.: „Wykorzystanie granulometru laserowego w monitoringu jakości wód powierzchniowych”

Podziękowania

Największe podziękowania kieruję do promotora dr hab. inż. Janusza Łomotowskiego, którego mądrość i erudycja przyczyniły się do rozwoju mojej osobowości i wzbogaciły mój dotychczasowy zasób wiedzy. Dziękuję Mu również za to, że pomimo zabieganego trybu życia, jaki na co dzień prowadzi, zawsze znalazł dla mnie czas by wyjaśnić wątpliwości rodzące się w trakcie pisania niniejszej rozprawy.

Wyrażam również wdzięczność mojemu nieskończenie cierpliwemu mężowi Arturowi, który wysłuchując często wielogodzinnych rozważań na temat problematyki rozprawy stale udzielał mi cennych rad i wskazówek.

Rodzicom dziękuję za wsparcie emocjonalne przez cały okres mojego doktoratu.

Podziękowania należą się także zarządowi Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Bydgoszczy za umożliwienie przeprowadzenia badań na basenie infiltracyjnym.

Ostatnie, choć nie mniej serdeczne podziękowania kieruję do pracowników, koleżanek i kolegów z Zakładu Techniki Sanitarnej Wsi Akademii Rolniczej we Wrocławiu, dzięki którym wytworzona atmosfera wzajemnego zrozumienia w miejscu pracy pozwoliła mi bez przeszkód napisać niniejszą rozprawę.

SPIS TREŚCI

1	Wprowadzenie	15
2	Przegląd literatury	20
2.1	Podstawowe definicje i zależności	20
2.2	Model Greena i Ampta	24
2.3	Równanie Richardsa	25
2.4	Modele empiryczne	27
2.5	Zjawisko kolmatacji	28
2.5.1	Przyczyny powstawania zjawiska kolmatacji	28
2.5.2	Ogólny przegląd modeli opisujących proces kolmatacji	30
2.5.3	Stosowane metody dekolmatacji	32
2.6	Zastosowanie geowłóknin	34
2.7	Zasady projektowania urządzeń do infiltracji wód opadowych	36
3	Cel pracy	42
4	Zakres przeprowadzonych badań	46
5	Metodyka badań instrumentalnych	46
5.1	Pomiar wielkości cząstek	46
5.2	Badania mętności wody	47
5.3	Badania skaningowe	48
5.4	Badania składu elementarnego osadów	49
6	Charakterystyka zastosowanych w badaniach geowłóknin	49
7	Badania składu granulometrycznego zawiesin zawartych w deszczach, śniegu i spływach z dachów	51
7.1	Wprowadzenie	51
7.2	Lokalizacja punktów poboru prób	54
7.3	Skład granulometryczny zawiesin w opadach śniegu	56
7.4	Skład granulometryczny zawiesin w opadach deszczu	59
7.5	Skład granulometryczny zawiesin w wodach odprowadzanych rynnami	62
7.6	Mętność opadów	68
7.7	Podsumowanie badań	69
8	Badania nad kolmatacją geowłóknin w czasie infiltracji wód powierzchniowych	70
8.1	Charakterystyka obiektu badawczego	70
8.2	Metodyka przeprowadzonych badań	72

8.3	Wyniki badań.....	74
8.3.1	Skład wody surowej	74
8.3.2	Zmiany skumulowanej infiltracji wody do gruntu i oporu hydraulicznego warstwy zakolmatowanej	77
8.3.3	Badania składu granulometrycznego gruntu i osadów.....	89
8.3.4	Skład chemiczny osadów	95
8.4	Wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w Bydgoszczy	97
9	Badania przeprowadzone w skali laboratoryjnej.....	98
9.1	Cel badań laboratoryjnych i charakterystyka użytych zawiesin.....	98
9.2	Opis stanowiska.....	100
9.3	Przebieg badań.....	101
9.4	Wyniki badań i ich analiza	102
9.4.1	Skład granulometryczny odcieków	102
9.4.2	Badania stopnia zakolmatowania warstwy piasku pod geowłókninami	106
9.4.3	Zdjęcia skaningowe	113
9.4.4	Badania elementarnego składu chemicznego	116
10	Badania oporu hydraulicznego warstwy zakolmatowanej	118
10.1	Cel i zakres badań.....	118
10.2	Charakterystyka obiektu badawczego	118
10.3	Metodyka badań	119
10.4	Wyniki badań osadów	121
10.5	Modelowanie zmian poziomu wody w czasie zalewania skrzynek chłonnych.....	128
10.6	Modelowanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzynek chłonnych....	134
10.7	Analiza wyników obliczeń oporów hydraulicznych	145
11	Podsumowanie i wnioski końcowe	149
	Piśmiennictwo	152
	Załącznik 1 Przykłady pyłków roślinnych występujących w atmosferze	160
	Załącznik 2 Wyniki analiz uziarnienia i porowatości piasku użytego do badań laboratoryjnych.....	171
	Załącznik 3 Badania geotechniczne i właściwości fizyczne gruntów w których zamontowano skrzynki AZURA oraz analizy składu granulometrycznego użytych żwirów do obsypek.....	174

SPIS TABEL

Tabela 1	Przegląd stosowanych rozwiązań do infiltracji wód powierzchniowych stosowanych w procesach uzdatniania wody	15
Tabela 2	Przegląd systemów wykorzystujących zjawisko infiltracji	19
Tabela 3	Wartości zmiennych θ_s , θ_r , h_e i λ dla różnych gruntów	22
Tabela 4	Ważniejsze rozwiązania analityczne uproszczonego równania Richardsa (15)	27
Tabela 5	Zestawienie parametrów potrzebnych do projektowania urządzeń do infiltracji wód opadowych	36
Tabela 6	Dane techniczne geowłóknin firmy Polyfelt użytych w badaniach	49
Tabela 7	Wielkość zarodników grzybów występujących najczęściej w atmosferze	52
Tabela 8	Wielkość pyłów pochodzenia antropogenicznego [6]	52
Tabela 9	Zakres wielkości cząstek oraz ilość zawiesin występujących w pobranych próbach śniegu	57
Tabela 10	Zakres wielkości cząstek oraz ilość zawiesin występujących w pobranych próbach deszczu	60
Tabela 11	Zakres wielkości cząstek oraz ilość zawiesin występujących w pobranych próbach spływów z dachów	64
Tabela 12	Charakterystyka statystyczna zbiorów wyników badań objętości zawiesin w opadach deszczu, śniegu i spływach z dachów	70
Tabela 13	Skład fizykochemiczny wody z rzeki Brdy (wybrane wskaźniki) w okresie prowadzenia badań w Bydgoszczy	75
Tabela 14	Skład biologiczny wody z rzeki Brdy w okresie prowadzenia badań w Bydgoszczy	76
Tabela 15	Zestawienie wyników badań 1 serii	78
Tabela 16	Zestawienie wyników 2 serii badań z okresu od 5.02-30.07.2002	79
Tabela 17	Zestawienie wyników 2 serii badań z okresu 31.07-13.08.2002	83
Tabela 18	Zestawienie wyników 2 serii badań z okresu 14.08-3.09.2002	84
Tabela 19	Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym zlokalizowanym w Bydgoszczy wg równania (58)	89
Tabela 20	Wyniki badań granulometrycznych gruntu pobranego na etapie budowy stanowiska badawczego w Bydgoszczy wykonanych metodą sitową i aerometryczną	89
Tabela 21	Wyniki badań składu granulometrycznego gruntu pobranego w dniu 6.09.2002 po zdjęciu geowłóknin wykonanych metodą sitową i aerometryczną	90
Tabela 22	Ilość zawiesin w przeliczeniu na kilogram suchej masy w próbach z wybranych punktów kontrolnych	92
Tabela 23	Ilość zawiesin w przeliczeniu na kilogram suchej masy w próbach z wybranych punktów kontrolnych	96
Tabela 24	Wyniki analizy elementarnej wykonanej w analizatorze CHNSEA 1110 firmy CE Instruments	96
Tabela 25	Zawartości węgla, azotu, fosforu i krzemu w różnych mikroorganizmach wodnych [60]	97
Tabela 26	Skład mineralogiczny bentonitu (według danych producenta)	98
Tabela 27	Skład chemiczny kaolinu (według danych producenta)	99

Tabela 28	Zawartość głównych pierwiastków w glinie użytej do badań	99
Tabela 29	Porównanie ubytku porowatości materiału filtracyjnego po 30 dobach zalewania zawiesiną kaolinu, bentonitu i gliny stanowisk z różną grubością geowłóknin	112
Tabela 30	Zestawienie wyników analizy pierwiastkowej uzyskanych z analizatora chemicznego firmy Röntek dla trzech rodzajów analizowanych stanowisk modelowych.....	117
Tabela 31	Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie zalewania skrzyni 1	128
Tabela 32	Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie zalewania skrzyni 2.....	132
Tabela 33	Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie zalewania skrzyni 3.....	133
Tabela 34	Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie opróżniania skrzyni 1	137
Tabela 35	Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie opróżniania skrzyni 2.....	137
Tabela 36	Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie opróżniania skrzyni 3	138
Tabela 37	Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym nr 1 zlokalizowanym we Wrocławiu wg równania (62).....	142
Tabela 38	Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym nr 2 zlokalizowanym we Wrocławiu wg równania (62).....	143
Tabela 39	Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym nr 3 zlokalizowanym we Wrocławiu wg równania (62).....	144
Tabela 40	Zestawienie modeli liniowych opisujących zmiany oporu hydraulicznego R [min] w zależności od objętości cząstek zawiesiny zawartej w infiltrującej wodzie V_z [cm ³] w fazie zalewania i opróżniania w różnych warunkach eksperymentu.....	147
Tabela 41	Wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego poszczególnych próbek gruntu...	181
Tabela 42	Wartości wskaźnika porowatości i porowatość poszczególnych próbek gruntu.....	181

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.	Prognozowane zmiany temperatury powietrza atmosferycznego do roku 2100 według scenariusza B2 [56]	17
Rys. 2.	Prognozowane zmiany ilości opadów atmosferycznych na Ziemi do roku 2030 [56]	18
Rys. 3.	Przemieszczanie się wody w gruncie o niepełnym nasyceniu wodą [114]	20
Rys. 4.	Założenia do modelu Green-Ampta [114]	24
Rys. 5.	Etapy prac związanych z projektowaniem urządzeń do infiltracji wód opadowych do gruntu.....	37
Rys. 6.	Poglądowy rysunek obrazujący chwilowy bilans objętości wody podczas wsiąkania wody ze zbiornika	44
Rys. 7.	Granulometr laserowy Mastersizer 2000	46
Rys. 8.	Zasada działania granulometru laserowego [18]	47
Rys. 9.	Miernik mętności TBD IR 1000	48
Rys. 10.	Mikroskop skaningowy firmy LEO.....	48
Rys. 11.	Analizator CHNSEA 1110 firmy CE Instruments	49
Rys. 12.	Zdjęcia skaningowe geowłóknin TS 10 (po lewej) i TS 20 (po prawej) przy powiększeniu 500 razy	50
Rys. 13.	Wygląd geowłókniny PP150 oraz jej zdjęcie skaningowe	50
Rys. 14.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z piasku drobno i średnioziarnistego (badania własne).....	52
Rys. 15.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z gliny piaszczystej i zwięzłej (badania własne).....	53
Rys. 16.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z pyłu i pyłu piaszczystego (badania własne).....	53
Rys. 17.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z lessu i iłu (badania własne).....	53
Rys. 18.	Mapa obrazująca rozmieszczenie stanowisk pomiarowych na terenie Polski.....	54
Rys. 19.	Zdjęcia punktów poboru prób opadów deszczu: a) we Wrocławiu, ul. Dicksteina; b) w Strzelinie, ul. Jana Pawła II; c) w Bielawie, osiedle XXV-lecia; d) w Kietrze na terenie łąki; e) w Raciborzu blisko zakładów chemicznych „Henkel”	55
Rys. 20.	Wybrane próby deszczy i spływów z dachów pobranych na analizowanych stanowiskach pomiarowych	56
Rys. 21.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych we Wrocławiu na ul. Dicksteina	57
Rys. 22.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych w Strzelinie na ul. Jana Pawła II	58
Rys. 23.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych w Bielawie na osiedlu XXV-lecia	58
Rys. 24.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych w Kietrze na terenie łąki	58

Rys. 25.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu z Raciborza blisko zakładów chemicznych „Henkel”	59
Rys. 26.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych we Wrocławiu na ul. Dicksteina	61
Rys. 27.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Strzelinie na ul. Jana Pawła II.....	61
Rys. 28.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Bielawie na osiedlu XXV-lecia	61
Rys. 29.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Kietrzu na terenie łąki	62
Rys. 30.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Raciborzu blisko zakładów chemicznych „Henkel”	62
Rys. 31.	Przykład zanieczyszczeń naniesionych wraz ze spływem z dachu pobranym we Wrocławiu w kwietniu 2004 r.....	63
Rys. 32.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach pierwszego i drugiego spływu wód opadowych z dachu pokrytego papą pobranych do badań we Wrocławiu w dniu 2.06.2004	63
Rys. 33.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach spływów wód opadowych z dachu pobranych w początkowej fazie opadu we Wrocławiu.....	65
Rys. 34.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w uśrednionych próbach spływów wód opadowych z dachu pobranych we Wrocławiu	65
Rys. 35.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach spływów wód opadowych z dachu pokrytego papą pobranych w Strzelinie.....	65
Rys. 36.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach spływów wód opadowych z dachu pokrytego dachówką pobranych w Strzelinie	66
Rys. 37.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w śniegu i w odpływie stopionego śniegu wypływającego z rynny w dniu 18.01.2004 w Strzelinie.....	67
Rys. 38.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w deszczu i odpływie z rynny pobranych w dniu 23.03.2004 w Strzelinie	67
Rys. 39.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w opadzie śniegu i w odpływie stopionego śniegu z rynny pobranych w dniu 09.03.2004 we Wrocławiu	67
Rys. 40.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w opadzie deszczu i w odpływie z rynny pobranych w dniu 15.05.2004 w Strzelinie.....	68
Rys. 41.	Widok stanowiska badawczego w Bydgoszczy	70
Rys. 42.	Szkic stanowiska badawczego w Bydgoszczy wraz z planem rozmieszczenia geowłóknin różnego typu na dnie basenu infiltracyjnego (punkty opisane liczbami to rzędne terenu w odniesieniu do umownego repera o rzędnej 0,0; dane są podane w cm).....	71
Rys. 43.	Widok basenu infiltracyjnego po zakończeniu 2 serii badań	73
Rys. 44.	Pobór próbek do badań laboratoryjnych.....	73
Rys. 45.	Lokalizacja punktów poboru prób do badań laboratoryjnych	74
Rys. 46.	Zależność pomiędzy liczbą glonów w wodzie rzeki Brdy a jej temperaturą.....	77
Rys. 47.	Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 22.04.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 36,00 m ³)	86

Rys. 48.	Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 23.04.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 39,23 m ³).....	86
Rys. 49.	Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 24.04.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 46,92 m ³).....	87
Rys. 50.	Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 5.09.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 42,22 m ³).....	87
Rys. 51.	Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 6.09.2002 po zdjęciu geowłóknin (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 52,17 m ³).....	88
Rys. 52.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 10 pobranych w punkcie P6	91
Rys. 53.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 10 pobranych w punkcie P15	91
Rys. 54.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 50 pobranych w punkcie P8	91
Rys. 55.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 50 pobranych w punkcie P3	92
Rys. 56.	Zdjęcia skaningowe osadu zgromadzonego na geowłókninie TS 10 w punkcie P6 wykonane przy powiększeniu 3000 razy (po lewej) oraz 1000 razy (po prawej)	92
Rys. 57.	Zdjęcie skaningowe osadu odłożonego wewnątrz geowłókniny TS 10 w miejscu poboru próby P6 przy powiększeniu 200 razy	93
Rys. 58.	Zdjęcia skaningowe osadu zakumulowanego na geowłókninie TS 20 w punkcie P16 wykonane przy powiększeniu 1000 razy	93
Rys. 59.	Zdjęcie skaningowe osadu odłożonego wewnątrz geowłókniny TS 20 w punkcie P16 wykonane przy powiększeniu 200 razy	93
Rys. 60.	Zdjęcia skaningowe osadu zgromadzonego na geowłókninie TS 50 w punkcie P8 wykonane przy powiększeniu 1000 razy (po lewej) oraz 5000 razy (po prawej)	94
Rys. 61.	Zdjęcie skaningowe osadu odłożonego wewnątrz geowłókniny TS 50 w punkcie P8 wykonane przy powiększeniu 200 razy	94
Rys. 62.	Zdjęcie skaningowe złoża pod geowłókniną TS 50 w miejscu poboru próby P8 wykonane przy powiększeniu 50 razy	94
Rys. 63.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin mineralnych użytych do badań ze składem granulometrycznym zawiesin występujących w wodzie z rzeki Brdy	99
Rys. 64.	Widok pojemników do badań laboratoryjnych	100
Rys. 65.	Sposób zalewania pojemników	102
Rys. 66.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach z pojemnika z geowłókniną TS 10 oraz po 1, 2 i 3 dobach badań	103
Rys. 67.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach ze stanowiska z geowłókniną TS 40 oraz po 1 i 2 dobie badań	103

Rys. 68.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływie z pojemnika z geowłókniną TS 20 po 3 dobie badań	104
Rys. 69.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinitu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływie po 2 dobie badań z pojemnika z geowłókniną TS 60	104
Rys. 70.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach ze stanowiska z geowłókniną TS 10 po 1, 2 i 3 dobie badań	105
Rys. 71.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach ze stanowiska z geowłókniną TS 40 po 1, 2 i 3 dobie badań	105
Rys. 72.	Widok osadu (od lewej) bentonitu odłożonego na powierzchni geowłókniny TS 10, kaolinu odłożonego na geowłókninie TS 20 i gliny odłożonej na geowłókninie TS 20	107
Rys. 73.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 10, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią.....	107
Rys. 74.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 10.....	107
Rys. 75.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 40, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią.....	108
Rys. 76.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 40.....	108
Rys. 77.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 20, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią.....	109
Rys. 78.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 20.....	109
Rys. 79.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 60, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią.	109
Rys. 80.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 60.....	110
Rys. 81.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 10, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią	110
Rys. 82.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża w stanowisku z geowłókniną TS 10.....	111
Rys. 83.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 40, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią	111
Rys. 84.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża w stanowisku z geowłókniną TS 40.....	111

Rys. 85.	Zdjęcie skaningowe osadu bentonitu odłożonego na geowłókninie TS 10 wykonane przy powiększeniu 3000 razy	113
Rys. 86.	Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie TS 10 wykonane przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	113
Rys. 87.	Zdjęcie skaningowe złoża pod geowłókniną TS 10 zalewaną zawiesiną bentonitu wykonane przy powiększeniu 100 razy	113
Rys. 88.	Zdjęcia skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie TS 20 wykonane przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	114
Rys. 89.	Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego pod powierzchnią geowłókniny TS 20 przy powiększeniu 100 razy	114
Rys. 90.	Zdjęcie skaningowe osadu gliny odłożonego na powierzchni geowłókniny TS 10 wykonane przy powiększeniu 4000 razy	114
Rys. 91.	Zdjęcia skaningowe osadu gliny odłożonego w geowłókninie TS 10 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 2500 razy (po prawej).....	115
Rys. 92.	Zdjęcie skaningowe złoża pod powierzchnią geowłókniny TS 10 przy powiększeniu 100 razy	115
Rys. 93.	Skrzynia ażurowa systemu AZURA.....	118
Rys. 94.	Plan rozmieszczenia skrzyń do infiltracji wód opadowych systemu AZURA na stanowisku we Wrocławiu.....	119
Rys. 95.	Widok przygotowanej skrzyni systemu AZURA do badań	119
Rys. 96.	Wygląd skrzyni 1 (zalewanej zawiesiną bentonitu) po wyjęciu z gruntu oraz rozmieszczenie osadu na geowłókninie od strony wewnętrznej	120
Rys. 97.	Wygląd skrzyni 2 (zalewanej zawiesiną kaolinu) po wyjęciu z gruntu oraz rozmieszczenie osadu na geowłókninie od strony wewnętrznej	120
Rys. 98.	Wygląd skrzyni 3 (zalewanej zawiesiną kaolinu) po wyjęciu z gruntu oraz rozmieszczenie osadu na geowłókninie od strony wewnętrznej	121
Rys. 99.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonym na powierzchni i wewnątrz geowłókniny na dnie skrzyni ażurowej 1	121
Rys. 100.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego na geowłókninie i w jej wnętrzu na bocznych ścianach skrzyni ażurowej 1	122
Rys. 101.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonym na powierzchni i wewnątrz geowłókniny na dnie skrzyni ażurowej 2	122
Rys. 102.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego we wnętrzu geowłókniny na dnie oraz bocznych ścianach skrzyni ażurowej 2.....	122
Rys. 103.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego na powierzchni i wewnątrz geowłókniny na dnie skrzyni ażurowej 3	123
Rys. 104.	Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego na geowłókninie i w jej wnętrzu na bocznych ścianach skrzyni ażurowej 3.....	123

Rys. 105.	Zdjęcie skaningowe osadu bentonitu odłożonego na powierzchni geowłókniny na dnie skrzyni 1 (powiększenie 4000 razy)	124
Rys. 106.	Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie na dnie skrzyni w stanowisku nr 1 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)	125
Rys. 107.	Zdjęcie skaningowe osadu bentonitu odłożonego na powierzchni geowłókniny na bocznej ścianie skrzyni w stanowisku nr 1 przy powiększeniu 4000 razy	125
Rys. 108.	Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie ułożonej na bocznej ścianie skrzyni 1 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	125
Rys. 109.	Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego na powierzchni geowłókniny na dnie skrzyni 2 (powiększenie 4000 razy)	126
Rys. 110.	Zdjęcia skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na dnie skrzyni 2 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	126
Rys. 111.	Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na bocznych ścianach skrzyni 2 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	126
Rys. 112.	Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego na powierzchni geowłókniny na dnie skrzyni 3 (powiększenie 4000 razy)	127
Rys. 113.	Zdjęcia skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na dnie skrzyni 3 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	127
Rys. 114.	Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego na powierzchni geowłókniny na bocznych ścianach skrzyni 3 (powiększenie 4000 razy)	127
Rys. 115.	Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na bocznych ścianach skrzyni 3 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej).....	128
Rys. 116.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 1 zawieszoną bentonitu obserwowane 30.07.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55).....	129
Rys. 117.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 1 zawieszoną bentonitu obserwowane 22.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55).....	129
Rys. 118.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 2 zawieszoną kaolinu obserwowane 28.08.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55).....	130
Rys. 119.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 2 zawieszoną kaolinu obserwowane 15.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55).....	130
Rys. 120.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 3 zawieszoną kaolinu obserwowane 30.07.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55).....	131
Rys. 121.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 3 zawieszoną kaolinu obserwowane 01.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55).....	131
Rys. 122.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 1 obserwowane 01.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58).....	134
Rys. 123.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 1 obserwowane 22.09.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58).....	134
Rys. 124.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 2 obserwowane 28.08.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58).....	135
Rys. 125.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 2 obserwowane 15.09.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58).....	135
Rys. 126.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 3 obserwowane 30.07.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58).....	136

Rys. 127.	Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 3 obserwowanych 01.09.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58).....	136
Rys. 128.	Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 1 w dniu 30.07.2003.....	139
Rys. 129.	Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 1 w dniu 22.09.2003.....	140
Rys. 130.	Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 2 w dniu 28.08.2003.....	140
Rys. 131.	Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 2 w dniu 15.09.2003.....	141
Rys. 132.	Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 3 w dniu 30.07.2003.....	141
Rys. 133.	Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 3 w dniu 01.09.2003.....	142
Rys. 134.	Porównanie oporów hydraulicznych ustalonych dla fazy zalewania i opróżniania w oparciu o wyniki badań z użyciem skrzyni AZURY, zamontowanej w glinie piaszczystej, zalewanej zawiesiną bentonitu	146
Rys. 135.	Porównanie oporów hydraulicznych ustalonych dla fazy zalewania i opróżniania w oparciu o wyniki badań z użyciem skrzyni AZURY, zamontowanej w glinie piaszczystej, zalewanej zawiesiną kaolinu	146
Rys. 136.	Porównanie oporów hydraulicznych ustalonych dla fazy zalewania i opróżniania w oparciu o wyniki badań z użyciem skrzyni AZURY, zamontowanej w glinie zwięzłej, zalewanej zawiesiną kaolinu	147
Rys. 137.	Wykres uziarnienia złoża filtracyjnego	171
Rys. 138.	Karta dokumentacyjna otworu geotechnicznego wykonanego dla montażu skrzynki AZURA nr 1	174
Rys. 139.	Karta dokumentacyjna otworu geotechnicznego wykonanego dla montażu skrzynki AZURA nr 2	174
Rys. 140.	Karta dokumentacyjna otworu geotechnicznego wykonanego dla montażu skrzynki AZURA nr 3	175
Rys. 141.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 1 na głębokości 0,6 m (próba D1)..	176
Rys. 142.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 1 na głębokości 0,9 m (próba D2)..	176
Rys. 143.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 1 na głębokości 1,0 m (próba D4)..	177
Rys. 144.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 2 na głębokości 0,3 m (próba D11)	177
Rys. 145.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 2 na głębokości 0,75 m (próba D12)	178
Rys. 146.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 0,3 m (próba D5)..	178
Rys. 147.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 0,45 m (próba D6)	179
Rys. 148.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 0,9 m (próba D7)..	179
Rys. 149.	Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 1,0 m (próba D8)..	180
Rys. 150.	Wykres krzywej uziarnienia obsypki żwirowej zastosowanej dla skrzynki 1 i 2.....	181
Rys. 151.	Wykres krzywej uziarnienia obsypki żwirowej zastosowanej dla skrzynki 3	182

1 Wprowadzenie

W hydrologii pod pojęciem infiltracji rozumie się wnikanie i przesączanie wód opadowych, płynących lub stojących wód powierzchniowych przez warstwę nienasyconą do strefy saturacji pod wpływem sił ciężkości. Infiltracja jest ważnym składnikiem obiegu wody na Ziemi.

W technologii wody i ścieków pod pojęciem infiltracji rozumie się sposób uzdatniania wód powierzchniowych oraz oczyszczania ścieków surowych lub poddanych wstępnemu mechanicznemu albo biologicznemu podczyszczeniu z wykorzystaniem zjawisk zachodzących w czasie przesączania przez strefę aeracji i saturacji. Procesy natury fizycznej, chemicznej i biologicznej mające miejsce w czasie przemieszczania się cieczy przez strefę aeracji i saturacji są bardzo złożone i nie do końca jeszcze poznane.

Zastosowanie infiltracji w technologii wody ma już prawie dwustuletnią tradycję. Pierwsze ujęcie infiltracyjne zostało zbudowane w 1810 roku dla miasta Glasgow [78]. Przegląd urządzeń stosowanych do infiltracji wody wraz z wykazem literatury, w której można znaleźć więcej o nich informacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Przegląd stosowanych rozwiązań do infiltracji wód powierzchniowych stosowanych w procesach uzdatniania wody

Sposób wprowadzania wody do gruntu	Źródło informacji
Z naturalnych zbiorników poprzez ich dno (ujęcia brzegowe i studnie promieniste)	69, 70, 72, 89
Baseny (stawy) infiltracyjne	8, 9, 12, 38, 44, 49, 50, 59, 64, 65, 68, 70, 78, 87, 88, 90, 117, 128
Okresowe zalewanie zagłębień terenowych (łąki zalewane)	8, 38, 69, 70, 78, 88
Studnie chłonne	38, 59, 68, 70, 88, 90, 117
Rowy chłonne	8, 38, 59, 64, 68, 69, 70, 88, 90, 78
Ciągi drenarskie	38, 59, 70, 88, 90

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie odprowadzaniem wód opadowych do gruntu. Uszczelnienie powierzchni terenu zwiększa szybkość odpływu powierzchniowego, co przyczynia się do wzrostu zagrożenia powodziowego, zmian poziomu wód gruntowych i nośności gruntów, podtapiania piwnic budynków przy deszczach nawalnych itd.

Obserwacje meteorologiczne wykazują, że w ostatnich 140 latach nastąpiło znaczne globalne podwyższenie się temperatury powietrza atmosferycznego [55]. W ostatnim stuleciu

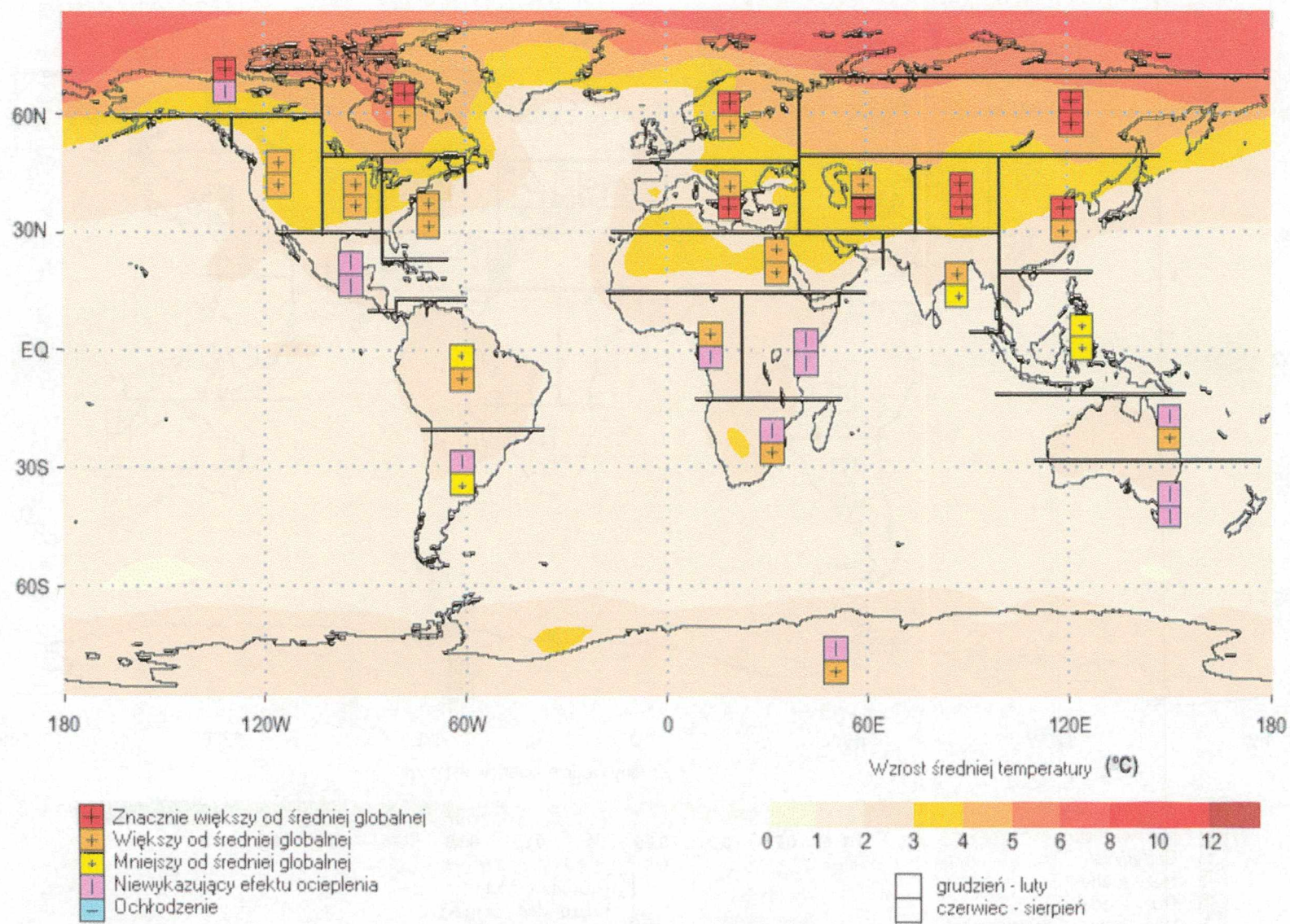
średnia temperatura atmosfery ziemskiej wzrosła o 0,6 °C, podczas gdy nad Europą o około 1,2 °C. Według prognoz IPCC [56,57,58] w okresie 1990-2100 w Europie średnia temperatura roczna ma wzrosnąć od 1,4 do 5,8 °C. Największy wzrost temperatur będzie obserwowany w południowej części Europy, najmniejszy w Europie Środkowej. Dokładne dane na ten temat można znaleźć w publikacji [55].

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wzrost temperatur powietrza i zmiany ilości opadów atmosferycznych, według jednego ze scenariuszy, jaki może być obserwowany w latach 2070-2100. Według prognoz wskutek efektu cieplarnianego następować będzie wzrost liczby „ekstremalnych” zjawisk klimatycznych. Częściej będą obserwowane deszcze nawalne o długim czasie trwania, długie okresy suszy i wiatry huraganowe.

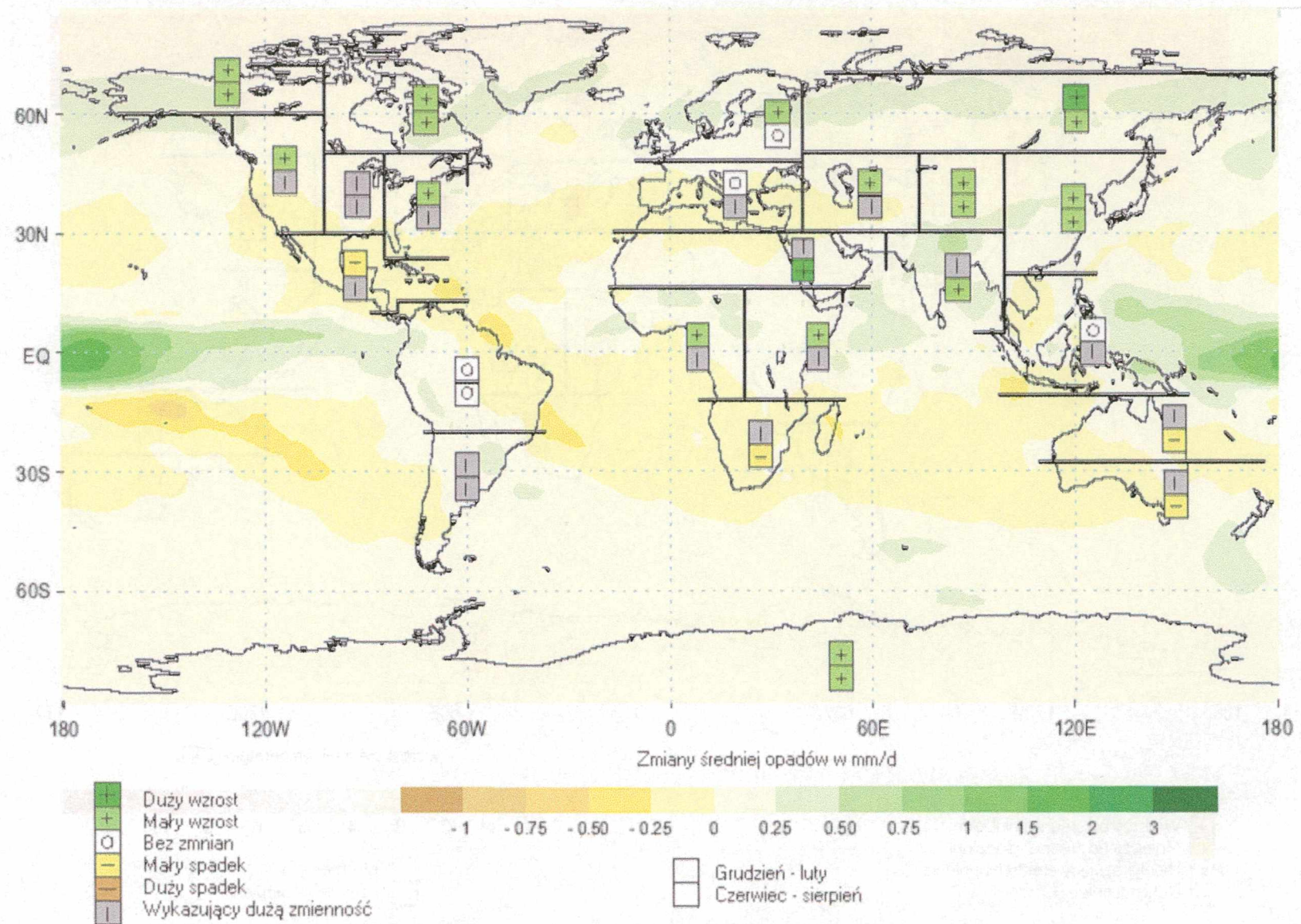
W przyszłości systemy kanalizacji deszczowej muszą być dostosowane do [79]: odprowadzenia deszczy nawalnych, spowalniania spływu powierzchniowego, wprowadzania wód opadowych do gruntu w celu magazynowania wody w warstwach wodonośnych na okres susz. Na skutek wzrostu temperatury powietrza i spadku jego wilgotności w okresie lata nastąpi wzrost ewapotranspiracji, co uwidoczni się obniżeniem wielkości odpływu powierzchniowego. W porównaniu z odpływem powierzchniowym obserwowanym w ciągu roku, obecnie szacowanym na poziomie 150 mm słupa wody przy średniorocznym opadzie atmosferycznym na obszarze Polski 600 mm, odpływ powierzchniowy ma zmniejszyć się o 15-50 mm. Spowoduje to okresowe duże deficyty wód powierzchniowych, które można wyrównać przez pobór wód podziemnych pod warunkiem ich uzupełniania poprzez wykorzystanie obiektów do sztucznej infiltracji wód opadowych.

Wody opadowe zgodnie z obowiązującym w Polsce Prawem Ochrony Środowiska (Dz.U. 2001, Nr 62, poz.627) i Prawem Wodnym (Dz.U. 2001, Nr 115, poz.1229), zalicza się do ścieków. Rozporządzenie Ministra Środowiska (Dz.U. 2004, Nr 168, poz.1763) zezwala na bezpośrednie odprowadzenie do ziemi, bez oczyszczania, wód opadowych z powierzchni dachów obiektów znajdujących się na terenach przemysłowych, składowych, baz transportowych, portów, centrów miast, parkingów, obiektów magazynowania i dystrybucji paliw, jak i z powierzchni pozostałych terenów.

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie stosowanych rozwiązań technicznych do infiltracji wód opadowych do gruntu.



Rys. 1. Prognozowane zmiany temperatury powietrza atmosferycznego do roku 2100 według scenariusza B2 [56]



Rys. 2. Prognozowane zmiany ilości opadów atmosferycznych na Ziemi do roku 2030 [56]

Tabela 2

Przegląd systemów wykorzystujących zjawisko infiltracji

Sposób wprowadzania wód opadowych do gruntu	Źródło informacji
Chłonne tereny trawiaste	39, 81, 100, 124
Ścieżki żwirowe	81, 100
Powierzchnie pokryte nawierzchnią porowatą (np. asfaltem porowatym)	74, 81
Powierzchnie pokryte ażurową kratą trawnikową	81, 100, 124
Niecki	39, 81, 100, 112
Zbiorniki infiltracyjne	28, 39, 81, 91, 92, 100, 112, 124, 133
Muldy chłonne	28
Studnie chłonne	28, 39, 81, 92, 100, 112, 122, 123, 124, 125, 126
Rowy chłonne	28, 39, 81, 100, 112, 124, 133, 139
Układy z perforowanych rur	28, 39, 100, 124
Dreny żwirowe	121, 124, 126
Podziemne zbiorniki z powierzchnią chłonną	81, 120, 123, 122, 124,, 125, 126, 144

Obiekty do infiltracji wód opadowych do gruntu są eksploatowane w odmienny sposób od obiektów wykorzystywanych w oczyszczaniu wody lub ścieków. Opady deszczu, jak i roztopy, są zjawiskami nieciągłymi. Wprowadzanie wód opadowych lub wód roztopowych do gruntu prowadzi się okresowo, podczas gdy na ujęciach infiltracyjnych wody powierzchniowe wprowadza się do gruntu w sposób quasi ciągły, z przerwami technologicznymi dla regeneracji zdolności filtracyjnych powierzchni chłonnych. Nieciągłość działania urządzeń do wprowadzania wód opadowych do gruntu w warunkach sztucznych powoduje, że zjawiska zachodzące w profilu glebowym są zbliżone do tych, jakie mają miejsce w czasie wsiąkania wód opadowych i roztopowych do gruntu. Istnieje jednak zasadnicza różnica między tymi procesami.

Naturalna infiltracja wód opadowych odbywa się na dużych powierzchniach. Przy intensywnych opadach formułuje się odpływ powierzchniowy, z którym wynoszone są cząstki koloidalne i zawiesiny. W przypadku obiektów do sztucznej infiltracji wód opadowych warstwę opadu zebraną z pewnej powierzchni wprowadza się do gruntu przez znacznie mniejszą powierzchnię chłonną. Powoduje to zwiększenie objętości wody infiltrującej do gruntu przez jednostkę powierzchni. Obecne w wodach opadowych cząstki zawieszone są odkładane w porach gruntu, powodując jego kolmatację. W warunkach naturalnej infiltracji

wód opadowych proces kolmatacji nie zachodzi z tak dużą intensywnością, jak ma to miejsce w urządzeniach do sztucznej infiltracji.

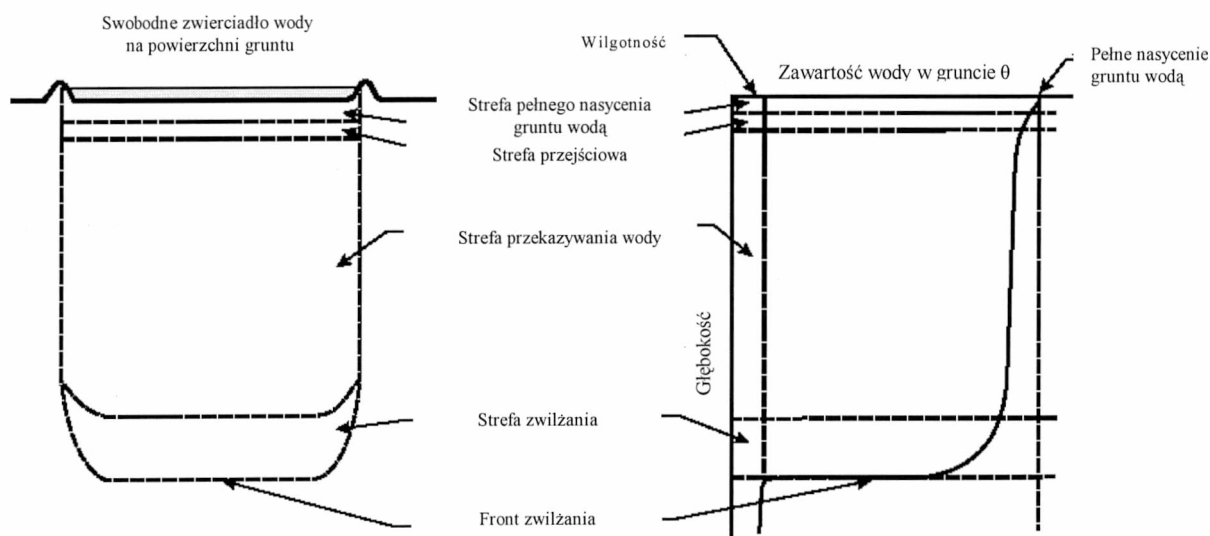
Perspektywy rozwoju urządzeń do sztucznej infiltracji wód opadowych w Polsce oraz niedostatek informacji na temat hydraulicznych podstaw projektowania tego typu urządzeń były przesłankami do podjęcia badań, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.

2 Przegląd literatury

2.1 Podstawowe definicje i zależności

Infiltracja wody do gruntu to proces wnikania do profilu gruntowego i przemieszczania się w nim wody pod wpływem sił grawitacji i dyfuzji. W profilu gruntowym tworzą się cztery charakterystyczne strefy (rys. 3):

- strefa pełnego nasycenia gruntu wodą,
- strefa przejściowa,
- strefa przekazywania wody ze strefy nasycenia do strefy zwilżania,
- strefa zwilżania gruntu w której znajduje się front (czoło) zwilżania gruntu wodą.



Rys. 3. Przemieszczanie się wody w gruncie o niepełnym nasyceniu wodą [114]

Układ poszczególnych stref w gruncie w czasie infiltracji zależy od czasu trwania zjawiska, właściwości gruntu, wysokości swobodnego zwierciadła wody nad powierzchnią gruntu, wysokości strefy aeracji a przede wszystkim od przestrzennego rozkładu zawartości wody w gruncie.

Przy opisie infiltracji wody do gruntu ważna jest znajomość podstawowych definicji i pojęć związanych z tym zjawiskiem. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich.

- a) **Zawartość wody w gruncie** θ określa objętość wody, jaka znajduje się w jednostce objętości gruntu. Najczęściej wartość tego parametru podaje się w $\text{cm}^3(\text{wody})/\text{cm}^3(\text{gruntu})$. Maksymalną zawartość wody w gruncie (pełne nasycenie gruntu wodą) oznacza się symbolem θ_s , zawartość wody w gruncie w chwili rozpoczęcia infiltracji θ_0 . Przy modelowaniu ruchu wody w gruncie duże znaczenie ma residualna (szczątkowa) zawartość wody θ_r określająca ilość wody związanej z gruntem w sposób trwały. Wartości θ_s i θ_r dla różnych gruntów przedstawiono w tabeli 3.
- b) **Wskaźnik wielkości porów gruntu** λ , jest wielkością bezwymiarową i określa zmienność porów gruntu (tab. 3).
- c) **Ciśnienie ssące gruntu** h . Ruch wody w gruncie zależy od sił grawitacji oraz sił dyfuzji. Jeżeli $\theta < \theta_s$ to w gruncie pojawia się podciśnienie związane z siłami kapilarnymi i dyfuzją noszące nazwę ciśnienia ssącego. Wartość podciśnienia obliczyć można z zależności podanej przez van Genuchtena [136]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} [1 + (-ah)^n]^{-m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: a i n są stałymi wyznaczanymi doświadczalnie dla danego gruntu, natomiast wartość współczynnika m wylicza się ze wzoru:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

Przy braku znajomości stałych a i n ciśnienie ssące gruntu obliczyć można z zależności [19]:

$$h(\theta) = \frac{h_s}{\sqrt[\lambda]{S_n(\theta)}} \quad (3)$$

gdzie: h_s jest ciśnieniem ssącym gruntu o zawartości wody bliskiej wilgotności gruntu nasyconego wodą ($h_s = -13,33$ cm), λ jest wskaźnikiem wielkości porów gruntu, a $S_n(\theta)$ stopniem nasycenia gruntu wodą wyliczanym z zależności:

$$S_n(\theta) = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (4)$$

- d) **Ciśnienie wyjścia powietrza z porów gruntu h_e .** W czasie zwilżania gruntu wodą dochodzi do wypierania powietrza z porów gruntu. Wartości h_e dla wybranych typów gruntów zostały przedstawione w tabeli 3 (opracowano na podstawie [15, 19, 114]).

Tabela 3

Wartości zmiennych θ_s , θ_r , h_e i λ dla różnych gruntów

Rodzaj gruntu	θ_s cm^3/cm^3	θ_r cm^3/cm^3	h_e cm	λ
Piaski	0,35 – 0,43	0,020 – 0,054	3,58 – 35,30	0,40 – 1,68
Piaski pylaste	0,41 – 0,43	0,032 – 0,060	1,32 – 15,85	0,46 – 1,28
Gliny piaszczyste	0,41 – 0,44	0,045 – 0,118	9,01 – 29,21	0,40 – 0,89
Muły	0,43 – 0,45	0,057 – 0,078	19,61 – 50,94	0,26 – 0,56
Muły ilaste	0,45 – 0,49	0,026 – 0,067	31,25 – 69,55	0,22 – 0,42
Piaski gliniasto-mulaste	0,39 – 0,48	0,093 – 0,188	7,81 – 46,28	0,37 – 0,48
Gliny ilaste	0,41 – 0,49	0,095 – 0,185	31,25 – 52,63	0,28 – 0,40
Iły gliniasto-mulaste	0,43 – 0,48	0,089 – 0,155	30,30 – 100,00	0,18 – 0,36
Iły gliniaste	0,36 – 0,49	0,070 – 0,182	15,87 – 200,00	0,09 – 0,21
Gliny	0,38 – 0,48	0,068 – 0,226	10,00 – 125,00	0,09 – 0,41

- e) **Współczynnik filtracji gruntu przy pełnym nasyceniu wodą K_f ,** nosi nazwę współczynnika filtracji. Wartość współczynnika filtracji określa się doświadczalnie w wyniku badań polowych lub laboratoryjnych albo oblicza się przy pomocy formuł empirycznych. Do najbardziej znanych formuł empirycznych, stosowanych do obliczenia współczynnika filtracji zalicza się równanie Hazena, Slichtera, Kozeny, Zunkera, Krügera i innych [62].
- f) **Współczynnik filtracji gruntu przy niepełnym nasyceniu wodą K** można wyliczyć z zależności [136]:

$$K = K_f \Theta^l [1 - (1 - \sqrt[l]{\Theta})^m]^2 \quad (5)$$

gdzie:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

m wylicza się z zależności (2) natomiast l wyznacza się doświadczalnie. Zmianę współczynnika filtracji gruntu nienasyconego można wyliczyć także z przybliżonej formuły [19]:

$$K(\theta) = \frac{K_f}{\sqrt[3]{(S_n(\theta))^{2+3\lambda}}} \quad (7)$$

- g) **Chwilowa prędkość infiltracji (wnikania) wody do gruntu** $q(t)$ określa stosunek objętości wody, która wniknęła do gruntu w analizowanym przedziale czasu do powierzchni infiltracji; najczęściej wartość tą podaje się w cm/h.
- h) **Skumulowana infiltracja wody do gruntu** $I(t)$ określa objętość wody, jaka wniknęła do gruntu od rozpoczęcia infiltracji przez jednostkę powierzchni. Wartość tej zmiennej wyliczyć można z zależności:

$$I(t) = \int_0^t q(t) dt \quad (8)$$

Wymiarem $I(t)$ jest długość, najczęściej wyrażana w mm.

- i) **Prędkością infiltracji wody do gruntu** $v_{\text{inf}}(t)$ przyjęto nazywać objętość wody, jaka wniknie do gruntu w ciągu jednej doby przez jednostkę powierzchni gruntu. Pomiędzy prędkością infiltracji a skumulowaną infiltracją wody do gruntu zachodzi związek:

$$v_{\text{inf}}(t) = I(t) - I(t-1) \quad (9)$$

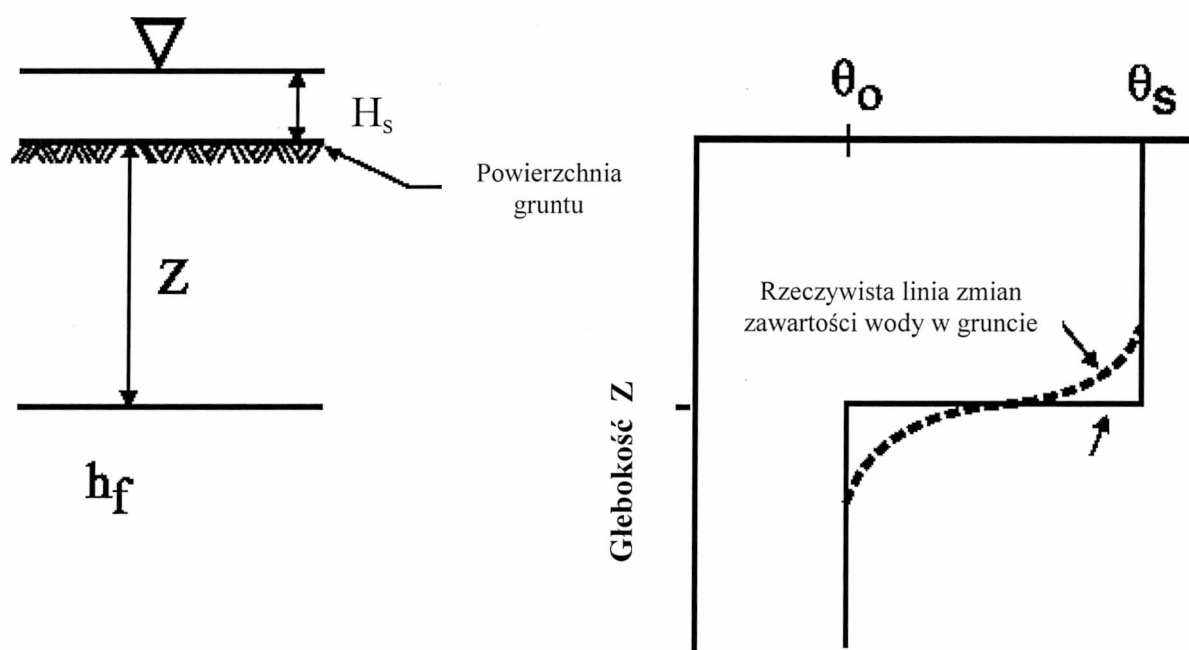
gdzie t jest czasem podawanym w dobach.

W modelach hydrologicznych opisujących związek pomiędzy opadem deszczu a odpływem powierzchniowym infiltrację wód opadowych do gruntu najczęściej charakteryzuje się wartością $I(t)$. Opad deszczu wyraża się wysokością warstwy deszczu, jaka spadła w danym przedziale czasu na analizowaną powierzchnię terenu. Porównanie warstwy opadu z przyrostem odpływu z danej zlewni kontrolnej, wyliczonego w analizowanym czasie jako stosunek przyrostu objętości wody odpływającej ze zlewni do jej powierzchni, pozwala oszacować skumulowaną infiltrację wody do gruntu $I(t)$ z określonej powierzchni terenu w warunkach naturalnych. Przykłady takich modeli to model opracowany w 1957 roku w Stanach Zjednoczonych przez Służbę Ochrony Gleb (Soil Conservation Service – SCS) oraz model Boughtona z 1966 roku. Szczegółowe omówienie tego zagadnienia można znaleźć m.in. w pracach [102, 141].

Przy projektowaniu obiektów do sztucznej infiltracji wody do gruntu podstawowym parametrem technologicznym jest prędkość infiltracji wody. Znajomość zmian prędkości infiltracji wody do gruntu w czasie eksploatacji ujęć infiltracyjnych jest niezbędna dla określenia zasobów dynamicznych wód podziemnych. Szczegółowe dane na ten temat można znaleźć w pracach Łomotowskiego i Hotłoś [45,80].

2.2 Model Greena i Ampta

Pierwszy model infiltracji wody do gruntu został opracowany przez Greena i Ampta w roku 1911 [114, 141]. Założenia do tego modelu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Założenia do modelu Green-Ampta [114]

W modelu tym zakłada się, że woda do gruntu wnika zgodnie z prawem Darcy'ego, przy czym o szybkości infiltracji decyduje wielkość spadku ciśnienia w strefie saturacji oraz czoła zwilżania Z :

$$q(t) = \frac{dI(t)}{dt} = K_f \left(\frac{H_s + Z - h_f}{Z} \right) \quad (10)$$

Wielkość podciśnienia w strefie frontu zwilżania h_f można określić z zależności [119]:

$$h_f = \frac{2+3\lambda}{1+3\lambda} h_e \quad (11)$$

a chwilową prędkość infiltracji:

$$q(t) = K_f \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(t+\chi)}{t}} + \frac{1-\sqrt{2}}{3} \frac{t}{t+\chi} - \frac{\sqrt{2t}}{6\sqrt{t+\chi}} \right) \quad (12)$$

gdzie:

$$\chi = \frac{(H_s + Z - h_f)(\theta_s - \theta_0)}{K_f} \quad (13)$$

Model Green-Ampt dobrze odwzorowuje wyniki pomiarów w przypadku stabilnych warunków zasilania, tj. utrzymania stałej warstwy wody na powierzchni gruntu. Przy zmiennych warunkach zasilania zwiększa się błąd prognozy chwilowej prędkości infiltracji oraz skumulowanej infiltracji wody do gruntu.

2.3 Równanie Richardsa

Do szczegółowych obliczeń ruchu wody w strefie aeracji wykorzystuje się ogólne równanie Richardsa [141]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K(\theta)\nabla h(\theta)) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (14)$$

które w układzie jednoosiowym przyjmuje postać [21]:

$$\frac{d\theta}{dt} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (15)$$

Przy założeniu, że na powierzchni gruntu nie tworzy się warstwa wody równanie (15) można rozwiązać analitycznie. W rozwiązaniach tych wprowadza się dwie bezwymiarowe zmienne pomocnicze zdefiniowane zależnościami:

$$T = \frac{K_f^2 t}{S^2} \quad (16)$$

$$Y = \frac{K_f I(t)}{S^2} \quad (17)$$

w których S charakteryzuje właściwości sorpcyjne gruntu w stosunku do wody i nosi nazwę sorpcyjności gruntu.

W roku 1957 Philip [108, 109, 110, 111] jako pierwszy wykazał, że równanie (15) ma rozwiązanie w układzie bezwymiarowym w postaci:

$$Y = \sqrt{T} + \alpha T \quad (18)$$

Podstawiając zmienne (16) i (17) do równania (18) otrzymuje się równanie:

$$\frac{K_f I(t)}{S^2} = \frac{K_f}{S} \sqrt{t} + \alpha \frac{K_f^2 t}{S^2} \quad (19)$$

z którego wyznaczyć można skumulowaną infiltrację wody do gruntu:

$$I(t) = S\sqrt{t} + \alpha K_f t \quad (20)$$

Z zależności (8) wynika, że chwilową prędkość infiltracji wody do gruntu $q(t)$ można wyznaczyć z zależności:

$$q(t) = \frac{dI(t)}{dt} = \frac{d(S\sqrt{t} + \alpha K_f t)}{dt} = \frac{0,5S}{\sqrt{t}} + \alpha K_f \quad (21)$$

Stała α , jak wykazały doświadczenia, przyjmuje w przybliżeniu wartość 0,363, a sorpcyjność gruntu S wylicza się na podstawie danych doświadczalnych z zależności:

$$S = \frac{I(t)}{\sqrt{t}} \quad (22)$$

Ostateczny wzór Philipa w postaci:

$$q(t) = \frac{0,5S}{\sqrt{t}} + 0,363 K_f \quad (23)$$

ze względu na swoją prostotę oraz dobre odwzorowanie danych eksperymentalnych ma największe zastosowanie praktyczne w modelowaniu infiltracji wody do gruntu przy znanych jego własnościach filtracyjnych.

W tabeli 4 przedstawiono inne rozwiązania analityczne równania (15), przy czym α jest stałą, jaką należy wyznaczyć na podstawie danych doświadczalnych.

Przy wyprowadzaniu modeli infiltracji wody do gruntu konieczne jest wprowadzenie daleko idących uproszczeń. Często stosowanym uproszczeniem jest przyjęcie jednorodności cech morfologicznych analizowanych gleb i stałego profilu glebowego na analizowanym obszarze, bądź pominięcie wpływu roślinności na infiltrację. W przypadku zastosowania modelu Green-Ampt występuje konieczność ustalenia zawartości wody w gruncie (w glebie) θ , co wymaga przeprowadzenia pomiarów terenowych.

Tabela 4

Ważniejsze rozwiązania analityczne uproszczonego równania Richardsa (15)

Źródło danych	Równanie
Philip [107]	$Y = 0.25 \left[2T + 2\sqrt{T} \exp(-T/\pi) + (2T + \pi) \operatorname{erf} \sqrt{\frac{T}{\pi}} \right] \quad (24)$
Parlange [104]	$Y = 1 + T + \exp(-2\sqrt{T}) \quad (25)$
Brutsaert [16]	$Y = T + \frac{\sqrt{T}}{1 + \alpha\sqrt{T}} \quad (26)$
Collis-George [23]	$Y = T + \frac{\sqrt{\tanh(\alpha^2 T)}}{\alpha} \quad (27)$
Swartzendruber i Clague [127]	$Y = T + \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha\sqrt{T})] \quad (28)$

W praktyce do modelowania infiltracji wody pochodzącej z opadów atmosferycznych stosuje się modele empiryczne.

2.4 Modele empiryczne

W 1932 roku Kostiakov zaproponował zależność [85,114]:

$$q(t) = \alpha \cdot t^{-\beta} \quad (29)$$

gdzie α i β są stałymi empirycznymi. Stała α ma wymiar $L \cdot T^{-1}$, a wartość bezwymiarowego wykładnika β zależy od rodzaju gleby i jej początkowego uwilgotnienia. Wartość β mieści się w przedziale $0 < \beta < 1$. Równanie (29) jest słuszne dla przedziału czasu $0 < t < t_{max}$, gdzie:

$$t_{max} = \frac{\alpha}{K_f} \quad (30)$$

Po scałkowaniu równania (29) w przedziale od 0 do t otrzymuje się wartość skumulowanej infiltracji wody do gruntu:

$$I(t) = \frac{\alpha}{1-\beta} t^{1-\beta} \quad (31)$$

Mezencev [za 114] eliminując ograniczenie czasu trwania infiltracji, uogólnił równanie Kostiakowa, podając zależności:

$$q(t) = q_m + \alpha t^{-\beta} \quad (32)$$

$$I(t) = q_m \cdot t + \frac{\alpha}{1-\beta} t^{(1-\beta)} \quad (33)$$

gdzie q_m jest graniczną chwilową zdolnością infiltracji, jaka jest obserwowana przy długim czasie wsiąkania wody do gruntu. Wartość tej stałej zależy od rodzaju gruntu oraz jego wilgotności początkowej.

Horton [4, 35, 73, 114] analizując wielkość opadów atmosferycznych i ilość wody odpływającej ze zlewni doświadczalnych do opisu zmian chwilowej prędkości infiltracji i skumulowanej infiltracji w czasie zastosował zależności :

$$q(t) = q_k + [q(0) - q_k] \exp(-\gamma t) \quad (34)$$

$$I(t) = q_k \cdot t + \frac{1}{\gamma} [q(0) - q_k] [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (35)$$

gdzie stała γ mająca wymiar czasu zależy od rodzaju gleb, spadków terenu, sposobu użytkowania, wilgotności gleb, stopnia zurbanizowania, a wartości $q(0)$ i q_k wyznacza się doświadczalnie, przy czym $q(0)$ odpowiada początkowej chwilowej prędkości infiltracji wód opadowych do gruntu w momencie rozpoczęcia opadu.

2.5 Zjawisko kolmatacji

2.5.1 Przyczyny powstawania zjawiska kolmatacji

W czasie infiltracji obserwuje się zmniejszanie współczynnika filtracji powierzchniowej warstwy gleby. Jest to wynik złożonych procesów, które ogólnie nazywa się kolmatacją. Rozróżniamy kolmatację mechaniczną, biologiczną i chemiczną. W rzeczywistości ma miejsce złożony proces kolmatacji, będący wypadkową poszczególnych procesów jednostkowych. Proces kolmatacji zachodzi nie tylko w urządzeniach do infiltracji, ale także w czasie filtracji wody przez filtry pośpieszne i powolne, eksploatacji urządzeń ujmujących wody podziemne (kolmatacja filtrów studziennych i drenów), złoż zraszanych, filtrów piaskowych i drenaży rozsączających.

Zjawisko kolmatacji pominąć można w przypadku infiltracji wód opadowych z rowów i muld. Roślinność porastająca powierzchnię tych systemów eliminuje a przynajmniej w znacznym stopniu ogranicza zjawisko uszczelniania wierzchniej warstwy zawieszoną pochodzącą z opadów.

Kolmatacja jest głównym czynnikiem wpływającym na okres eksploatacji urządzeń do infiltracji wód naturalnych i ścieków [12, 115, 116, 139].

Kolmatację mechaniczną w czasie infiltracji wód opadowych wywołują domieszki pozostające w stanie zawieszonym. Deszcze wymywają z powietrza cząsteczki pozostające w

stanie gazowym, aerozole i pyły. Mogą one być pochodzenia naturalnego lub antropogenicznego [22, 39, 91, 100].

Filtry pośpieszne stosowane w układach uzdatniania wody ulegają głównie kolmatacji mechanicznej w wyniku zatrzymywania się w porach złoza cząstek koloidalnych, zawiesin i żywych organizmów wodnych (bakterii, glonów i pierwotniaków) naniesionych przez filtrującą wodę. Kolmatację mechaniczną mogą wywołać także wydzielane z wody (lub gruntu) pęcherzyki gazowe. Rozwój błony biologicznej w strefie osadów i w warstwie zakolmatowanej, początkowo mechanicznie, powoduje wzrost oporu hydraulicznego, co nosi nazwę kolmatacji biologicznej. Ma to miejsce na filtrach powolnych, ujęciach infiltracyjnych oraz w strefie filtrów studziennych (w tym przypadku dochodzi do rozwoju bakterii żelazistych i manganowych). Kolmatacja chemiczna ma miejsce, gdy dochodzi do wytrącania zawiesin lub nierozpuszczalnych minerałów osadzających się na ziarnach gruntu. Kolmatację chemiczną wywołuje głównie węglan wapnia i wytrącające się z wody nierozpuszczalne związki żelaza [78, 113, 138].

Według Pérez-Paricio [106] zjawisko kolmatacji zachodzi w wyniku odkładania i przemieszczania się zawiesin w porach gruntu, wzrostu biomasy, wytrącania się lub rozpuszczania minerałów, tworzenia i rozpuszczania gazów oraz zagęszczenia warstwy filtracyjnej.

W urządzeniach do infiltracji wody i ścieków największe zmiany współczynnika filtracji obserwuje się na powierzchni wsiąkania oraz w sąsiadującej z nią warstwie gruntu, gdzie zachodzi odkładanie się zawiesin mineralnych i organicznych oraz powstaje błona mechaniczno-biologiczna. W miarę czasu trwania infiltracji tworzy się warstwa osadów.

Szybkość uszczelnienia złoza zależy głównie od jakości infiltrującej wody [44, 50, 64, 87, 90] i składu granulometrycznego gruntu [38, 49, 47, 64, 66, 87, 90, 80]. Hotłoś [44] oraz Łomotowski i Hotłoś [45, 80] wykazali, że na szybkość kolmatacji ma wpływ nie tylko zawartość zawiesin i domieszek biologicznych, ale także mętność i barwa wody.

Hotłoś i Łomotowski [45, 51] prowadząc badania na modelach wykazali, że zasięg kolmatacji pod powierzchnią chłonną jest odwrotnie proporcjonalny do intensywności zalewania wyrażonej w metrach sześciennych wody na metr kwadratowy powierzchni i jednostkę czasu. Ograniczenie głębokości strefy zakolmatowanej można osiągnąć przez zalewanie powierzchni chłonnej z intensywnością większą od współczynnika filtracji.

Według Geigera i Dreiseitla [39] zjawisko kolmatacji urządzeń do infiltracji wód opadowych najintensywniej zachodzi w fazie rozruchu. W tym czasie najbliższe otoczenie nie jest jeszcze najczęściej porośnięte roślinnością, lecz mocno zanieczyszczone drobnymi pyłami

powstającymi w czasie prac budowlanych. Wskutek erozji cząstki gruntu i inne zanieczyszczenia są wnoszone z wodami opadowymi do strefy filtracyjnej i szybko ją mechanicznie uszczelniają.

Mała powierzchnia kontaktu filtrów studni chłonnych z warstwą wodonośną jest przyczyną szybkiego procesu kolmatacji filtra oraz złoża w strefie przyfiltrowej [3]. Podobnie zachowują się drenaże chłonne, w których oprócz kolmatacji obserwuje się zamulenie drenów.

Watanabe [140] badając infiltrację wód opadowych w systemach z zastosowaniem perforowanych rur drenarskich zaobserwowała, że im mniejsze jest napełnienie drenów w czasie opadów, tym szybciej zachodzi proces kolmatacji strefy filtracyjnej w pobliżu drenu.

2.5.2 Ogólny przegląd modeli opisujących proces kolmatacji

W wyniku odkładania się cząstek fazy stałej wewnątrz złoża filtracyjnego następuje zmiana jego porowatości. Związek pomiędzy stratami hydraulicznymi podczas filtracji a porowatością złoża opisuje równanie Kozeny-Carmana:

$$\Delta H = \psi_0 \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \cdot \frac{\nu \psi_1^2}{g} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_f}{d^2} \cdot L \quad (36)$$

gdzie: ΔH jest to wysokość strat ciśnienia, m; L – wysokość warstwy filtracyjnej, m; L_e – rzeczywista droga przepływu strug cieczy w złożu, m; d – średnica zastępcza ziaren złoża, m; ψ_0 – bezwymiarowa stała kształtu materiału filtracyjnego zwana współczynnikiem Carmana; ψ_1 – bezwymiarowy współczynnik kształtu powierzchni; ν – współczynnik lepkości kinematycznej, m^2/s ; g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ; ε – porowatość aktywna złoża; v_f – prędkość filtracji, m/s .

Równanie Kozeny-Carmana ma liczne modyfikacje, a do najważniejszych należy zaliczyć równania opracowane m.in. przez Michajłowa i Nikołajewa [67, 82], Erguna, Lindquista oraz Schneebelego [67]. Prowadząc pomiar strat ciśnienia w złożu filtracyjnym wykorzystując równanie Kozeny-Carmana, można określić prawdopodobną porowatość poszczególnych warstw w złożu, a tym samym głębokość warstwy zakolmatowanej.

Przykłady zastosowania równania Kozeny-Carmana dla określenia modelu opisującego wzrost wysokości strat ciśnienia w złożu i uwzględniając heterodispersyjność cząstek zawiesiny można znaleźć m.in. w pracach Darby i in. [24] i Taylora i in. [130] oraz Endo i in. [29, 30], którzy dodatkowo w swoim modelu uwzględnili kształt cząstki.

Filtracja wody z cząstkami fazy stałej jest zjawiskiem bardziej złożonym niż filtracja samej wody, z uwagi na konieczność uwzględnienia wpływu cząstek fazy stałej, ich objętości, kształtu, ilości i ściśliwości. Ze względu na złożoność zjawisk zachodzących podczas filtracji zawiesin przez ziarniste złoża mechanizm transportu cząstek zawiesiny jest upraszczany. W pracy [118] można znaleźć szczegółowy opis modeli: Deba, Mohanka, Mackrlego, Campa, Sakthivadivela i Shetmana.

Przykładem prostego modelu opisującego kolmatację mechaniczną złoża filtracyjnego, uwzględniającego zmianę stężenia zawiesin w cieczy podczas przepływu przez porowate złożo, jest powstałe w 1937 r. równanie Iwasakiego [14, 132]:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\lambda c \quad (37)$$

gdzie: λ jest stałą charakteryzującą szybkość zmniejszania się stężenia zawiesin w filtrującej wodzie mającą wymiar m^{-1} , c chwilowym stężeniem cząstek w złożu w m^3/m^3 , a z wysokością złoża w m

Przykłady modeli opisujących kolmatację chemiczną i biologiczną można znaleźć m.in. w pracach Vandevivere i in [137], Teylora i Jaffe'go [129, 131] oraz Pérez-Paricio [106]. W większości opracowań przy opisie kolmatacji biologicznej zakłada się, że warstwa utworzonego na ziarnach złoża biofilmu jest równomiernie rozłożona i ma jednakową grubość na całej zakolmatowanej powierzchni. Vandevivere i in [137] zaproponowali model, w którym zakłada się, że biomasa jest niejednorodnie rozłożona w porach i tworzy tzw. zatyczki.

Taylor i Jaffe [131] opisali zjawisko kolmatacji biologicznej jako funkcję ilości biomasy zgromadzonej w złożu. W innej pracy [129] ci sami autorzy zaproponowali model kolmatacji biologicznej, uwzględniający właściwości geometryczne porowatej warstwy, przez którą przepływa woda.

Pérez-Paricio [106] opracował model opisujący kinetykę kolmatacji mechanicznej, biologicznej i chemicznej uwzględniając odkładanie i przemieszczanie się zawiesin w ośrodku porowatym, wzrost i obumieranie biomasy, a w przypadku kolmatacji chemicznej reakcje wytracania się lub rozpuszczania minerałów.

Przedstawione modele kolmatacji są głównie wykorzystywane w modelowaniu urządzeń do filtracji i odwróconej osmozy oraz reaktorów biochemicznych ze złożami biologicznymi. Pozwalają one w lepszy sposób zrozumieć istotę zjawisk zachodzących w ośrodku porowatym. Przykładem zastosowania modelu opracowanego przez Pérez-Paricio [106] jest analiza zjawiska foulingu i scalingu membran stosowanych w ultra- i nanofiltracji oraz odwróconej osmozie.

Wartość praktyczna opracowanych modeli kolmatacji w projektowaniu urządzeń do infiltracji wód opadowych do gruntu jest ograniczona. Wynika to z dużej zmienności warunków prowadzenia procesu infiltracji (zmienność ilości wód deszczowych doprowadzanych do urządzenia w czasie, zawartości w nich zawiesin, składu chemicznego i biologicznego, zmienności temperatury, itd.) oraz złożoności opisu formalnego modeli.

Najczęściej proces kolmatacji w urządzeniach do infiltracji wód opadowych opisuje się pośrednio poprzez analizę zmian w czasie chwilowej prędkości infiltracji $q(t)$ lub skumulowanej infiltracji wody do gruntu $I(t)$.

W przypadku basenów infiltracyjnych miarą szybkości kolmatacji jest szybkość zmniejszania się prędkości infiltracji, natomiast w przypadku ujęć wód podziemnych spadek depresji w strefie przystudziennej.

2.5.3 Stosowane metody dekolmatacji

Proces kolmatacji był przedmiotem licznych badań prowadzonych na ujęciach infiltracyjnych. W wielu pracach [9, 38, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 59, 64, 68, 78, 87, 90] podkreśla się negatywny wpływ procesu kolmatacji na pracę urządzeń do infiltracji. Wywołany tym zjawiskiem wzrost oporów hydraulicznych prowadzi do zmniejszenia prędkości infiltracji i konieczności przeprowadzania zabiegów dekolmatacji. Przy infiltracji brzegowej i poddennej dno rzeki oczyszcza się z zalegających osadów i warstwy zakolmatowanej przy użyciu specjalistycznych jednostek wyposażonych w urządzenia refulujące [78]. Po odwodnieniu basenu infiltracyjnego i osuszeniu osadów, zakolmatowaną warstwę gruntu z osadami usuwa się z użyciem sprzętu budowlanego np. spycharkami. Stosowane dotychczas w kraju metody czyszczenia basenów infiltracyjnych, polegające na usunięciu warstwy osadu i zakolmatowanej warstwy gruntu mają wiele wad oraz negatywnie wpływają na późniejszą eksploatację basenów infiltracyjnych. Najczęściej do tego celu wykorzystuje się ciężki sprzęt budowlany.

Celem zmniejszenia nacisku na grunt, do czyszczenia basenów w Anglii i w Niemczech stosuje się specjalistyczne pojazdy na szerokich oponach, pozwalające na zdjęcie równej warstwy gruntu z dokładnością do 1 cm [78].

Inne techniki używane do oczyszczania dna basenów infiltracyjnych to czyszczenie mechaniczne z użyciem czerpadeł łopatkowych stosowane w Czechach [38].

W Polsce podjęto próby czyszczenia hydraulicznego basenów infiltracyjnych z zastosowaniem urządzeń refulujących na ujęciu infiltracyjnym w Legnicy-Przybkowie [78]. Zakończyły się one niepowodzeniem. W czasie odpompowywania osadów zalegających na

dnie basenu dochodziło do szybkiego lokalnego wzrostu prędkości infiltracji, co skutkowało szybką kolmatacją wgłębną dna basenu infiltracyjnego.

Na nielicznych ujęciach w Polsce stosuje się jeszcze ręczne usuwanie skolmatowanej warstwy gruntu za pomocą łopat np. na stacji wodociągowej „Bielany” w Krakowie i na ujęciu wody w Dębinie w Poznaniu. Przy stosowaniu tej techniki, w przypadku ujęcia w Krakowie ubytek złoża uzupełnia się piaskiem pobranym z dna rzeki Wisły, natomiast w przypadku ujęcia w Poznaniu nie uzupełnia się ubytków złoża, co doprowadza do powolnego pogłębiania się dna stawu. Czynność regeneracji w sposób ręczny wykonuje się 3 – 4 razy w roku [8].

Negatywnym skutkiem stosowania niewłaściwej technologii oczyszczania dna basenów oprócz pogłębiania stawów infiltracyjnych jest ich dewastacja, gdyż pod ciężarem użytych maszyn odsłonięta warstwa filtracyjna ulega zagęszczeniu, a część osadów jest wgniatana w dno i powoduje jego wtórne uszczelnienie. Konsekwencją tego jest zmniejszenie średniej prędkości infiltracji w basenach po oczyszczeniu w porównaniu z cyklem poprzedzającym to czyszczenie [45, 64, 78]. Oprócz tych niekorzystnych zjawisk zachodzących w gruncie, bardzo ważnym, nierozwiązanym dotychczas zagadnieniem jest problem oczyszczania i zagospodarowania zużytej i zdjętej z dna basenu warstwy piasku. Częściowo problem ten został rozwiązany przez przepłukiwanie zebranej warstwy piasku na płuczkach wodnych i ponownym jej wykorzystaniu w stawach infiltracyjnych. Właściwości filtracyjne takich odnowionych warstw gruntu są jednak gorsze od świeżego piasku, dlatego coraz częściej stosuje się wymianę gruntu na nowy. Działania prowadzone w tym kierunku powodują, że problem składowania zużytego piasku staje się coraz bardziej aktualny, zarówno przy stosowaniu ręcznego jak i mechanicznego sposobu czyszczenia.

W przypadku urządzeń do infiltracji powierzchniowej wód opadowych regeneracji zdolności filtracyjnej dokonuje się poprzez zdjęcie osadu i zakolmatowanej warstwy gruntu, a następnie spulchnieniu przypowierzchniowej warstwy przez przeoranie. W razie konieczności zagęszczony grunt wymienia się na nowy, bardziej przepuszczalny.

Renowacja zakolmatowanych studni wierconych jest stosowana w Polsce sporadycznie. W miejsce renowacji najczęściej wykonuje się w odległości kilku lub kilkunastu metrów od studni zakolmatowanej studnię nową, zastępczą lub rzadziej wymienia się filtr wraz z obsypką. Stosowane są również metody regeneracji polegające na płukaniu strefy przystudziennej ługującymi roztworami chemicznymi, płukaniu wodą pod wysokim ciśnieniem, z wykorzystaniem suchego lodu do wywołania uderzeń hydraulicznych czy też metod z użyciem mikroładunków do detonacji. W tych ostatnich metodach wywołanie fali uderzeniowej ma na

celu rozpulchnienie strefy zakolmatowanej filtrów. Szczegółowy opis tych metod znaleźć można w pracy Hotłoś i in. [50], Wójcika i in. [143] oraz Trzeciaka [135].

2.6 Zastosowanie geowłóknin

Dla zapobiegania kolmatacji wgłębnej znalazły zastosowanie geowłókniny. Badania wykazały, że na powierzchni geowłókniny ułożonej na gruncie powstaje w czasie infiltracji filtr namywany ograniczający wnikanie zawieszin w głąb gruntu. Geowłókniny spełniają funkcję ochronną, lecz w procesie filtracji wskutek zatrzymywania cząstek zawiesiny same ulegają kolmatacji.

Literaturę przedmiotu z zakresu badań geowłóknin ogólnie można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Do pierwszej grupy należy zaliczyć piśmiennictwo poświęcone opisowi urządzeń i stosowanych metod badań wodoprzepuszczalności geosyntetyków [17, 20, 33, 36, 40, 84, 94, 96, 98, 103], a do drugiej grupy publikacje opisujące zmienność właściwości hydraulicznych geowłóknin w czasie ich eksploatacji. Większość prac odnosi się do publikacji wyników badań poświęconych zmianom właściwości hydraulicznych geowłóknin pracujących w układzie gleba/geowłóknina [10, 11, 17, 33, 63, 83, 98, 103, 134]. Nieliczne prace poświęcone są wynikom badań geowłóknin pracujących w układach: zawiesina/geowłóknina [34, 96, 97], osad/geowłóknina [5, 95], popiół lotny/geowłóknina [37]. We wszystkich pracach wykazuje się dużą skuteczność w ochronnym oddziaływaniu geowłóknin przed migracją różnego rodzaju cząstek. Oceny zjawiska kolmatacji dokonywano najczęściej w sposób pośredni, poprzez pomiar spadku wodoprzepuszczalności geowłóknin przed i po działaniu w danym układzie.

Młynarek i Vermeersch [93] za główne przyczyny zmian właściwości hydraulicznych geowłóknin uznali odkładanie się stałych cząstek wewnątrz materiału syntetycznego i na jego powierzchni poprzez „pakowanie” kolejnych warstw na siebie, tworzenie przez bakterie warstwy biofilmu na powierzchni geowłóknin, wytrącanie się tlenków żelaza w wyniku zachodzących reakcji utlenienia i redukcji w roztworach wodnych, wytrącanie soli głównie węglanów i siarczanów. To ostatnie zjawisko zachodzi najczęściej w czasie odparowania wody.

Borzdynska-Marahori i Ossowski [10] wykazali, że zjawisko kolmatacji geowłóknin zachodzi w dwóch charakterystycznych etapach. W pierwszym następuje wypełnienie przestrzeni porowej materiału syntetycznego cząstkami, których wymiary zbliżone są do średnicy porów geowłókniny. Etap ten został nazwany przez autorów okresem wypełniania

przestrzeni porowych. W drugim etapie w wyniku klinowania się cząstek drobniejszych, powstają struktury, co prowadzi w konsekwencji do gwałtownego spadku wodoprzepuszczalności geowłókniny. Czas trwania poszczególnych etapów zależy od rodzaju zastosowanej geowłókniny i składu granulometrycznego zawiesin. Do podobnych wniosków doszli Moo-Young i in. [96] oraz Młynarek i Vermeersch [93].

Moo-Young [97] wykazał, że liczba cząstek przedostających się przez geowłókninę rośnie wraz ze stopniem uwodnienia zawiesiny, ale tylko w początkowej fazie uszczelniania się geowłóknin przed utworzeniem się placka filtracyjnego. Po jego uformowaniu migracja cząstek zanika. Odkładanie się cząstek zachodzi głównie w mniejszych porach o wymiarach 10-50 μm . Drobne cząstki przenikające przez geowłókninę były mniejsze niż najmniejszy rozmiar porów geowłókniny podawany przez producenta. Badania Narejo [98] potwierdziły, że jednym z głównych czynników decydujących o zatrzymywaniu drobnych cząstek jest rozmiar porów geowłókniny.

Nowak [99], Borzdyńska-Marahori i Rogala [11] oraz Palmeira i Gardoni [103] zdolność do zatrzymywania cząstek zawiesiny wiąże także z grubością geowłókniny. Im grubszy materiał, tym większe są szanse zatrzymania przezeń cząstek.

Togrol i in. [134] zaobserwowali, że kolmatacja geowłóknin zachodzi intensywniej w przypadku cyklicznego osuszania. Zjawisko to autorzy wiązali z przyklejaniem się drobnych cząstek w porach geowłókniny w okresie wysychania materiału syntetycznego, powodując w konsekwencji zmniejszenie przekroju porów i spadek wodoprzepuszczalności. Zachowując ciągły przepływ cieczy przez geowłókninę zapobiega się osadzaniu cząstek stałych. Z uwagi na pozostawianie zawiesin w stanie flotującym, umożliwia się swobodny przepływ cząstek przez materiał syntetyczny.

Palmeira i Gardoni [103] wykazali, że zjawisko odkładania cząstek na geowłókninie zachodziło intensywniej, gdy materiał syntetyczny był ściskany lub już częściowo zakolmatowany cząstkami, które mogły przedostać się do geosyntetyku w trakcie budowy danego urządzenia.

Beck [5] w badaniach nad zastosowaniem geowłóknin dla zapobiegania wnikania flory i fauny dennej w głąb gruntu wykazał, że o ilości przedostających się mikroorganizmów przez geowłókninę decyduje ich rozmiar oraz faza rozwoju. Glony i bakterie o małych wymiarach oraz organizmy zwierzęce w fazie jaj lub larw w łatwy sposób przedostawały się przez geowłókninę wraz z filtrującą wodą, a ich dalszy rozwój następował pod powierzchnią geosyntetyku.

2.7 Zasady projektowania urządzeń do infiltracji wód opadowych

Do infiltracji wód opadowych stosuje się różne rozwiązania projektowe. Podstawowe funkcje tych urządzeń to przyjęcie spływów powierzchniowych z terenu lub z dachów, krótkotrwałe retencjonowanie wód opadowych ujmowanych przez system kanalizacji deszczowej oraz infiltracja wód opadowych w głąb profilu gruntowego [39]. W tabeli 5 zestawiono parametry, które są uwzględniane podczas projektowania poszczególnych urządzeń chłonnych.

Tabela 5

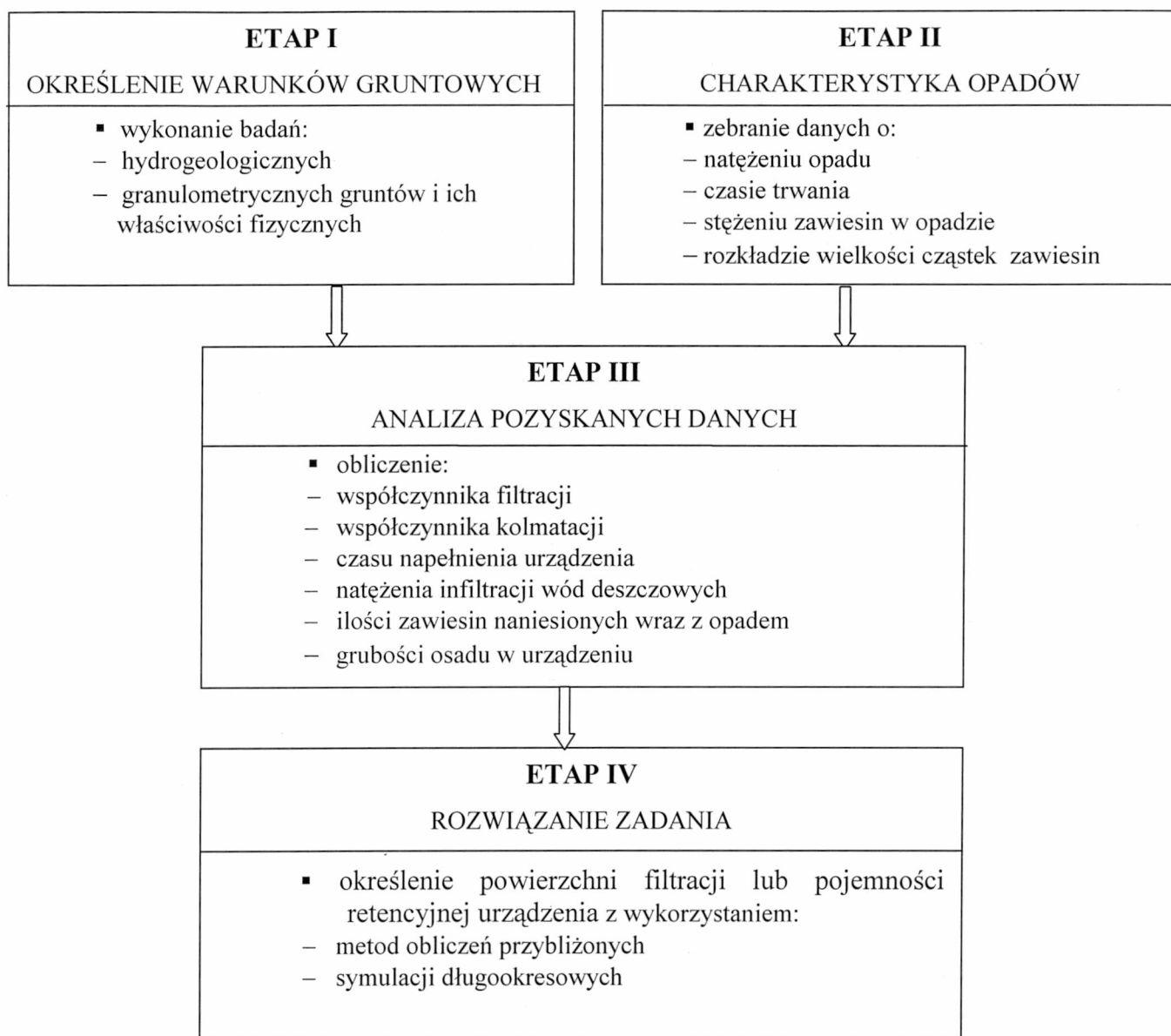
Zestawienie parametrów potrzebnych do projektowania urządzeń do infiltracji wód opadowych

Rozwiązanie konstrukcyjne		Parametr niezbędny dla projektowania							
		Powierzchnia spływu	Współczynnik filtracji	Natężenie opadu	Czas trwania opadu	Dostępna powierzchnia wsiąkania	Średnica urządzenia	Wysokość całkowita spiętrzenia wody	Powierzchnia infiltracji
Wsiąkanie z nadziemnym gromadzeniem wody (niecki, rowy, baseny infiltracyjne)		+	+	+	+	+		+	+
Wsiąkanie z gromadzeniem wody w zbiornikach podziemnych	Studnie chłonne	+	+	+		+	+	+	
	Systemy drenarskie	+	+	+		+	+	+	
	Zbiorniki z ażurowych elementów prefabrykowanych	+	+	+	+		+	+	

W Polsce brak jest krajowych wytycznych do projektowania urządzeń do infiltracji wód opadowych. Większość projektów wykonuje się w oparciu o wytyczną ATV-A138 *Budowa i wymiarowanie urządzeń do scentralizowanego wsiąkania w grunt wód opadowych bez szkodliwych zanieczyszczeń*.

Na rysunku 5 przedstawiono zakres prac badawczych, jakie są niezbędne do przeprowadzenia przy projektowaniu urządzeń do infiltracji wód do gruntu.

Do niezbędnych prac poprzedzających projekt należy zaliczyć przeprowadzenie badań hydrogeologicznych, mających na celu określenie warunków gruntowo-wodnych na terenie przyszłej lokalizacji obiektu do infiltracji wód opadowych, w tym rozpoznanie rodzaju gruntów i jego porowatości, ustalenie ich współczynników filtracji oraz maksymalnego poziomu zwierciadła wody gruntowej.



Rys. 5. Etapy prac związanych z projektowaniem urządzeń do infiltracji wód opadowych do gruntu

Urządzenia do infiltracji wód opadowych powinny być wykonywane w gruntach o współczynniku filtracji mieszczącym się w przedziale $10^{-3} - 10^{-6}$ m/s [1, 28]. Dla gruntów o współczynnikach filtracji mniejszych od 10^{-6} m/s, zachodzi potrzeba budowy zbiorników retencyjnych o dużej objętości i z tego powodu w tych warunkach gruntowych nie są one projektowane [41]. W przypadku gruntów o wysokich współczynnikach filtracji obserwuje się oddziaływanie składu chemicznego wód infiltracyjnych na jakość wód podziemnych. Poziom zalegania zwierciadła wody gruntowej nie ma w zasadzie istotnego wpływu na warunki wsiąkania wody do gruntu pod warunkiem, że podczas infiltracji nie dojdzie do powstania więzi hydraulicznej pomiędzy dnem urządzenia a wodami podziemnymi. Przyjmowana najczęściej minimalna odległość 1,0 m pomiędzy dnem warstwy rozsączającej a maksymalnym

poziomem wody gruntowej wynika z potrzeby ochrony jakości wód podziemnych. W warstwie aeracji zachodzą procesy biochemiczne oraz sorpcja z udziałem zanieczyszczeń zawartych w wodach opadowych.

Według Nowakowskiej-Błaszczuk [101] w przypadku spływów opadów atmosferycznych z dachów domów znajdujących się na obszarach nieobciążonych zanieczyszczeniami pochodzącymi z uciążliwego dla środowiska przemysłu dopuszczalna jest infiltracja do gruntu tych wód bez oczyszczania w systemach powierzchniowych i podziemnych. Dla spływów powierzchniowych z terenów osiedli mieszkaniowych, z nawierzchni utwardzonych np. z chodników, parkingów, ciągów pieszo-jezdných i ulic wewnętrznych o małym ruchu przed infiltracją konieczne jest wstępne oczyszczenie wód opadowych z zawiesin oraz ze smarów i olejów.

Wymiarowanie obiektów do infiltracji wód opadowych wymaga określenia natężenia opadu miarodajnego w zależności od przyjętego czasu jego trwania i prawdopodobieństwa wystąpienia. Parametry te określa się na podstawie statystycznie opracowanych danych opadowych. Godne uwagi są metody określenia tego parametru stosowane na terenie Niemiec. Pierwszą metodę opracował w latach 40. XX. wieku Reinhold [25]. Metoda ta po 40 latach została zmodyfikowana przez Pecher [25]. Systematyczne obserwacje opadów w sieci posterunków meteorologicznych prowadzonych na terenie Niemiec pozwoliły opracować atlas o opadach (atlas KOSTRA) [2]. Dane te są obecnie powszechnie wykorzystywane w projektowaniu systemów odwodnieniowych w Niemczech. W Polsce brak jest tak kompleksowego opracowania. Dane o opadach z posterunków obserwacyjnych IMGW nie zostały dotąd opracowane w stopniu niezbędnym dla współczesnych technik projektowania urządzeń do infiltracji wód opadowych [75, 76].

Najczęściej natężenie deszczu miarodajnego na obszarze Polski określa się wzorem Błaszczuka [7]:

$$q = \frac{6,63\sqrt[3]{CH^2}}{t^{0,67}} \quad (38)$$

gdzie: q jest natężeniem deszczu miarodajnego w l/s·ha, H jest średnim rocznym opadem w mm, C okresem jednorazowego przekroczenia danego natężenia w latach, a t jest czasem trwania deszczu w min.

Wielkość natężenia deszczu miarodajnego zależy od wyboru częstotliwości występowania deszczu C wyrażanej w latach. Przy wymiarowaniu urządzeń do infiltracji wód opadowych najczęściej przyjmuje się opad o czasie trwania 15 min i częstotliwości $C = 5$ (raz

na 5 lat). Nowakowska-Błaszczuk [101] dodatkowo zaleca na etapie wstępnego wymiarowania sprawdzenie możliwości przyjęcia deszczu długotrwałego 180 min oraz możliwości przyjęcia w krótkim czasie (po 1 godz.) następnego deszczu o natężeniu równym 0,8 natężenia deszczu miarodajnego.

Według arkusza roboczego ATV-A138 w obliczeniach urządzeń do przesączania wód deszczowych w grunt należy zakładać deszcz miarodajny występujący raz na 2 do 5 lat, przy czym dla zabudowy miejskiej, przemysłowej i usługowej trzeba przyjmować częstotliwość $C = 5$ (raz na 5 lat). Na obszarach, na których dobra gospodarcze nie wymagają zabezpieczenia przed podtopieniem, należałoby przyjąć częstotliwość $C = 1$ (raz na 1 rok).

Czas trwania deszczu miarodajnego według arkusza roboczego ATV-A138 powinno się przyjmować $t = 10$ min. W przypadku projektowania systemu odprowadzania wód opadowych z opóźnieniem odpływu, np. poprzez retencjonowanie części wód, czas ten można zwiększyć do 15 min, a przy systemach pozwalających na uruchomienie dodatkowych komór retencyjnych do 20 min. W urządzeniach bez retencji przyjmować można krótsze czasy trwania deszczu, np. 5 min.

W obliczeniach uproszczonych natężenie dopływających do urządzeń infiltracyjnych wód opadowych określa się z powszechnie stosowanej zależności:

$$Q = q \cdot \sum_{i=1}^k \psi_i F_i \quad (39)$$

gdzie: F_i jest i -tą powierzchnią cząstkową zlewni, z której spływają wody opadowe w ha, ψ_i współczynnikiem spływu charakterystycznym dla danej zlewni cząstkowej, a q spływem jednostkowym z powierzchni podczas trwania deszczu w l/s·ha.

Prędkość infiltracji w obliczeniach uproszczonych określa się ze wzoru Darcy'ego [39, 71, 127, 142]:

$$Q_f = v \cdot F \quad (40)$$

gdzie:

$$v = k_f \cdot i \quad (41)$$

k_f jest współczynnikiem filtracji w gruncie nasyconym wyrażonym w m/s, i spadkiem hydraulicznym, a F efektywnym przekrojem poprzecznym urządzenia do infiltracji wód opadowych w m².

W przypadku wykonywania na danym obszarze większej liczby urządzeń do wsiąkania wody deszczowej do gruntu oraz jej okresowego retencjonowania konieczne jest sprawdzenie wstępnie zwymiarowanych obiektów za pomocą obliczeń symulacyjnych. Narzędziami

używanymi do tego celu są dostępne programy komercyjne, w których przeprowadza się symulację długookresową z uwzględnieniem częstotliwości przeciążenia hydraulicznego urządzeń i wykorzystaniem danych pochodzących z wieloletnich obserwacji opadów deszczy. Przykładami dostępnych w Polsce takich programów są:

- RS 138 *Wymiarowanie obiektów do rozsączania wód opadowych* wraz z modulem dodatkowym RS 138-LZ *Sprawdzanie obiektów do rozsączania wód opadowych* w językowej wersji niemieckiej;
- R-Win SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*) dostępnym w wersji niemieckiej i angielskiej;
- TRINTSIM (*Trough-Infiltration-Trench-System*) w wersji angielskiej;
- MURI138 *Wymiarowanie urządzeń do zagospodarowania wód opadowych* w wersji niemieckiej.

Wersje demo tych programów za wyjątkiem R-Win SUDS są udostępniane do bezpłatnego korzystania przez okres 30 dni po zarejestrowaniu się na odpowiednich stronach internetowych. We wszystkich tych oprogramowaniach obliczenia wykonywane są w oparciu o wytyczną ATV- A 138.

W programie RS 138-LZ obliczenie spływu powierzchniowego odbywa się w oparciu o model, w którym straty na zwilżanie nawierzchni są uwzględniane na początku opadu deszczu. Straty wynikające z retencji terenowej obliczane są metodą wartości granicznych. Podczas symulacji są uwzględniane również okresy bezdeszczowe oraz straty wody wynikające z parowania. Wielkość parowania z systemów powierzchniowych wylicza się wyłącznie dla okresów bezdeszczowych. Do obliczania przesiąkania wód deszczowych na powierzchniach przepuszczalnych stosowane jest równanie Hortona (34). W okresach bezdeszczowych lub z niewielkimi opadami deszczu, w których intensywność opadu jest mniejsza od chwilowej prędkości infiltracji wody do gruntu, stosowane jest równanie Hortona zmodyfikowane przez Paulsena [105].

Przeprowadzenie symulacji długookresowych pozwala na ustalenie pracy urządzeń do infiltracji wód opadowych w zmiennych warunkach, zbliżonych do warunków rzeczywistych. W Polsce stosowanie tego typu programów jest jeszcze bardzo ograniczone. Wynika to z konieczności wprowadzenia do programu jako danych wejściowych danych o opadach z długiego okresu obserwacji. W przypadku programu RS 138-LZ minimalny ciąg nie powinien być krótszy od 10. lat.

Najczęściej wymiarowanie urządzeń do infiltracji wód opadowych jest prowadzone prostymi, przybliżonymi metodami obliczeniowymi. Podstawową wadą tych metod jest

uproszczenie charakterystyki opadu poprzez przyjęcie stałego natężenia deszczu miarodajnego. Z analizy właściwości opadów wynika, że są one zjawiskami nieciągłymi, a natężenie deszczu ulega w czasie ciągłym zmianom [42, 77]. Maksymalne natężenie występuje z reguły tylko w jednej fazie deszczu, zwaną deszczem głównym, często poprzedzaną i kończoną deszczem o dużo mniejszym natężeniu (tzw. deszcze początkowe i końcowe). Natężenie pojedynczego deszczu zależy od czasu trwania, zasięgu deszczu, czynników meteorologicznych i klimatycznych [43]. Najczęściej im większa intensywność opadu tym krótszy czas jego trwania. Przyjęcie tego stwierdzenia nie zawsze odzwierciedla rzeczywistość, ponieważ krótki czas trwania może być związany z deszczem o dużym jak i o małym natężeniu. Aby uniknąć tego typu pomyłek przy projektowaniu urządzeń chłonnych konieczna jest znajomość najczęstszych scenariuszy deszczu [79] przedstawianych w postaci hietogramów obrazujących zmienność intensywności natężenia opadu (warstwy opadu) w czasie jego trwania.

Przy wymiarowaniu urządzeń do infiltracji wód opadowych dodatkowo bagatelizuje się fakt systematycznego uszczelniania urządzeń chłonnych w wyniku odkładania się zawieszin wymywanych przez wody opadowe z powietrza i z powierzchni terenu (dachów). Wytyczna ATV-A 138 zaleca przyjmowanie do obliczeń powierzchni infiltracji wartości współczynnika filtracji na poziomie połowy wartości współczynnika filtracji gruntu [1], ale nie odzwierciedla to dynamicznych zmian współczynnika filtracji wywołanych procesem kolmatacji.

Dla ograniczenia ryzyka złego przyjęcia współczynnika filtracji gruntu powszechnie stosowana jest zasada przyjmowania do obliczeń najniższej wartości tego współczynnika ze zbioru wyników uzyskanych na etapie badań geotechnicznych. Działania takie pozwalają na uzyskanie swoistego rodzaju współczynnika bezpieczeństwa, ale tylko w początkowym okresie eksploatacji urządzenia. Uszczelniania się gruntu powoduje wzrost oporów hydraulicznych i spadek chwilowej prędkości infiltracji. Założenie, że współczynnik filtracji jest stały w czasie eksploatacji urządzeń jest nie tylko błędne, ale i szkodliwe gdyż w miarę upływu czasu zachodzi potrzeba przeprowadzenia modernizacji istniejących elementów systemu i zainwestowania dodatkowych środków finansowych.

Uwzględnienie zjawiska kolmatacji jest szczególnie ważne przy projektowaniu urządzeń do podziemnej infiltracji wód opadowych. Wszelkie prace związane z modernizacją systemu, w tym zabiegi dekolmatacji, są kosztowne i trudne do przeprowadzenia.

3 Cel pracy

Dla zapobiegania kolmatacji wgłębnej, jak już to sygnalizowano w rozdziale 2.6, znalazły zastosowanie geowłókniny. Geowłókniny są jednym z rodzajów geotekstylii powszechnie stosowanych w geotechnice, inżynierii wodnej oraz lądowej. Częstość podejmowania badań dotyczących procesu kolmatacji geowłóknin wskazuje na istotny wpływ tego zjawiska na właściwą pracę urządzeń i obiektów inżynierskich. Należy zwrócić uwagę, że w literaturze przedmiotu można znaleźć liczne publikacje poświęcone wynikom badań układów grunt/geowłóknina, natomiast jest mało doniesień poświęconych badaniom zawiesina/geowłóknina/grunt. Te układy będą występowały w przypadku infiltracji wód opadowych. Przy projektowaniu urządzeń do infiltracji wód opadowych i naturalnych z zastosowaniem geowłóknin istnieje konieczność uwzględnienia kolmatacji geowłóknin i gruntu. Kolmatacja ta jest wynikiem osadzania zawiesin nanoszonych wraz z infiltrującą wodą.

Celem przeprowadzonych badań było określenie przydatności geowłóknin, jako membrany mikrofiltracyjnej, na której dochodzi do powierzchniowego zatrzymania cząstek zawieszonych w infiltrującej wodzie. Badania miały wykazać, w jakim stopniu zastosowanie geowłóknin wpływa na ograniczenie kolmatacji powierzchni chłonnych urządzeń do infiltracji oraz czy możliwe jest modelowanie zmian chwilowej prędkości infiltracji wody do gruntu z uwzględnieniem procesu kolmatacji.

Badanie stopnia zakolmatowania geowłóknin eksploatowanych przy różnym składzie wody miało na celu określenie „żywności” geowłóknin. Zachowanie cech użytkowych geowłóknin tj. określenie czasu eksploatacji z uwzględnieniem właściwości hydraulicznych powierzchni chłonnych jest niezbędne na etapie projektowania urządzeń do infiltracji. Oszacowanie chwilowej prędkości infiltracji z uwzględnieniem wpływu potencjalnej ilości zanieczyszczeń wnoszonych przez infiltrującą wodę wywołujących zjawisko kolmatacji umożliwia z jednej strony określenie niezbędnych objętości zbiorników retencyjnych na wody opadowe, z drugiej określenie terminu, po którym konieczna jest wymiana geosyntetyku w celu przeprowadzenia zabiegu dekolmatacji.

W przypadku wód naturalnych głównym czynnikiem wywołującym kolmatację są zawiesiny organiczne i mineralne w tym nanoplankton oraz zawiesiny koloidalne. W przypadku wód opadowych, ilość i rodzaj zawiesin zależeć będzie od stanu czystości powietrza atmosferycznego oraz rodzaju powierzchni, na której będzie formułował się spływ powierzchniowy.

W Polsce ocenę stopnia czystości powietrza kontroluje Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska (PIOS) w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. Monitoring ten realizowany jest na trzech poziomach: krajowym, regionalnym i lokalnym. Prowadzone badania obejmują pomiary stężeń gazów znajdujących się w atmosferze, pyłu zawieszonego o średnicy równoważnej ziaren do 10 μm (PM10), pyłu zawieszonego ogółem (bez separacji frakcji TSP) oraz pyłu zawieszonego reflektometrycznego (*Black Smoke* BS). W przypadku oznaczeń zanieczyszczeń opadów atmosferycznych wykonuje się tylko analizy chemiczne.

Badania granulometryczne, istotne z punktu widzenia procesu kolmatacji systemów do infiltracji wód opadowych, polegające na określeniu objętości i wielkości zawiesin znajdujących się w opadach nie są prowadzone. Brak pełnych informacji o składzie granulometrycznym zawiesin zawartych w wodach opadowych, w śniegu oraz w spływach z dachów, był przesłanką do podjęcia badań w tym kierunku.

Celem badań było również sprawdzenie poprawności opracowanego oryginalnego modelu pozwalającego określić opór hydrauliczny zakolmatowanej geowłókniny.

Równanie Green-Ampta (10) można przekształcić do postaci

$$q(t) = \frac{H_s + Z - h_f}{\frac{Z}{K_f}} \quad (42)$$

Wartość w mianowniku ma wymiar czasu i będzie nazywana oporem hydraulicznym R strefy filtracji Z . W przypadku zakolmatowania powierzchni geowłókniny wysokość strefy nasycenia Z będzie ograniczona grubością warstwy osadów zdeponowanych na geowłókninie. Woda przesączająca się przez zakolmatowaną geowłókninę będzie szybko przemieszczała się przez obszar czoła zwilżania o niepełnym nasyceniu porów wodą. Przyjmując, że przerwanie więzi hydraulicznej będzie miało miejsce w strefie zakolmatowanej geowłókniny można przyjąć:

$$Z - h_f \cong 0 \quad (43)$$

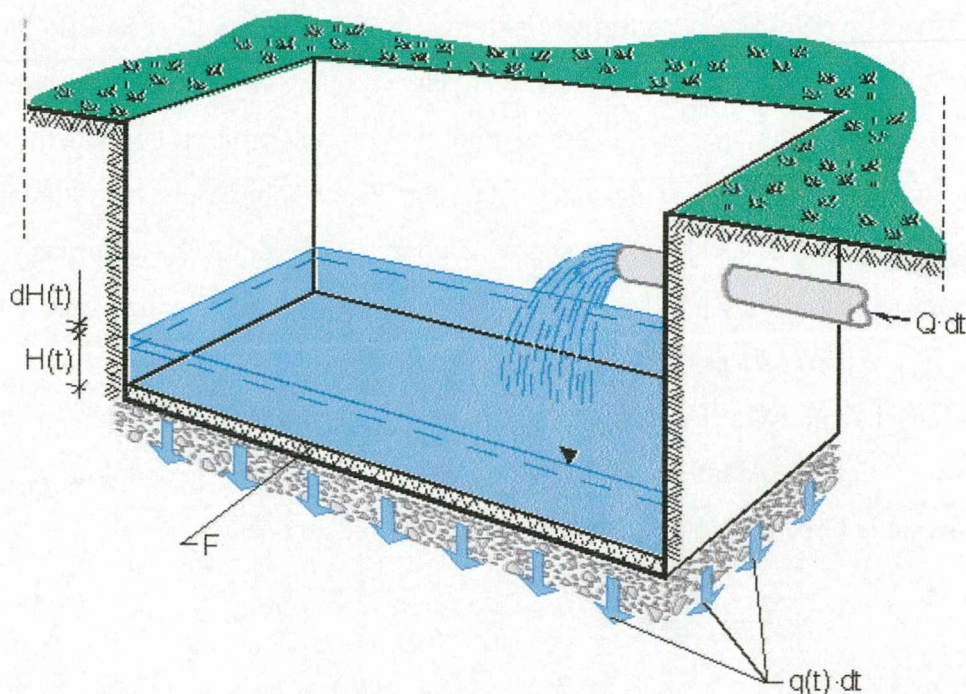
Przy warunku (43) i uwzględnieniu definicji oporu strefy filtracji Z równanie (42) można zapisać w postaci:

$$q(t) = \frac{H(t)}{R} \quad (44)$$

Przy zalewaniu powierzchni chłonnej o powierzchni F ze stałym natężeniem Q , pomijając wpływ infiltracji przez ściany boczne, z równania bilansu można napisać bilans objętości wody:

$$F \cdot dH(t) = Q \cdot dt - F \cdot q(t) \cdot dt \quad (45)$$

w którym lewa strona równania określa przyrost objętości wody w zbiorniku infiltracyjnym a prawa strona opisuje objętość wody dopływającej do zbiornika pomniejszoną o ilość wody infiltrującej do gruntu. Obrazuje to rysunek 6.



Rys. 6. Poglądowy rysunek obrazujący chwilowy bilans objętości wody podczas wsiąkania wody ze zbiornika

Z równania (44) wynika zależność:

$$q(t)dt = \frac{H(t)}{R} dt \quad (46)$$

po uwzględnieniu której w równaniu (45) i przekształceniu go otrzymamy:

$$dH(t) = \frac{Q}{F} dt - \frac{H(t)}{R} dt \quad (47)$$

Wprowadzając zmienną zdefiniowaną zależnością

$$Q_F = \frac{Q}{F} \quad (48)$$

równanie (47) przyjmie postać:

$$dH(t) = \frac{R Q_F - H(t)}{R} dt \quad (49)$$

które po przekształceniach i scałkowaniu w granicach od 0 do t

$$\frac{dH(t)}{R Q_F - H(t)} = \frac{1}{R} dt \quad (50)$$

$$\int_0^t \frac{dH(t)}{R Q_F - H(t)} = \int_0^t \frac{1}{R} dt \quad (51)$$

$$\ln \frac{Q_F R}{Q_F R - H(t)} = \frac{1}{R} t \quad (52)$$

$$\frac{Q_F R}{Q_F R - H(t)} = \exp\left(\frac{t}{R}\right) \quad (53)$$

$$H(t) = Q_F R \left(1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{t}{R}\right)} \right) \quad (54)$$

doprowadzi do równania opisującego zmiany wysokości zwierciadła wody w zbiorniku infiltracyjnym przy stałym natężeniu dopływającej do niego wody:

$$H(t) = Q_F R \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R}\right) \right) \quad (55)$$

W przypadku gdy do zbiornika nie będzie dopływać woda, obserwowane będzie opadanie zwierciadła wody wskutek infiltracji. Funkcję zmiany wysokości zwierciadła wody w zbiorniku opisywać będzie równanie różniczkowe:

$$dH(t) = -\frac{H(t)}{R} dt \quad (56)$$

które po scałkowaniu

$$\int_0^t \frac{dH(t)}{H(t)} = \int_0^t -\frac{1}{R} dt \quad (57)$$

będzie poszukiwanym równaniem opisującym zmiany zwierciadła wody w czasie opróżniania basenu infiltracyjnego:

$$H(t) = H(0) \exp\left(-\frac{t}{R}\right) \quad (58)$$

Wyprowadzone modele mogą być także wykorzystywane do obliczeń objętości zbiorników retencyjnych współpracujących z powierzchniowymi lub podziemnymi systemami infiltracyjnymi.

4 Zakres przeprowadzonych badań

Zakres pracy obejmował:

- badania składu granulometrycznego zawiesin występujących w deszczu, śniegu oraz spływach powierzchniowych z dachów;
- badania składu granulometrycznego zawiesin występujących w wodzie z rzeki Brdy;
- badania nad zachowaniem się geowłóknin przy infiltracji wód powierzchniowych z dużą ilością nanoplanktonu. Badania te zostały przeprowadzone na terenie ujęcia wody w Czyżkówku w Bydgoszczy. Do badań użyto wody z rzeki Brdy;
- badania nad zachowaniem się geowłóknin przy infiltracji wody z dużą ilością zawiesin mineralnych. Zostały one przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych a do badań użyto zawiesiny kaolinu, bentonitu i gliny pobranej z okolic Pawłowic koło Wrocławia;
- badania mające na celu sprawdzenie poprawności opracowanych modeli do określenia oporu zakolmatowanej geowłókniny. Badania te zostały przeprowadzone w skali półtechnicznej z zastosowaniem zawiesiny kaolinu i bentonitu.

5 Metodyka badań instrumentalnych

5.1 Pomiar wielkości cząstek

Do pomiaru objętości i rozmiaru cząstek zawiesin użyto granulometru laserowego zwanego także analizatorem dyfrakcyjnym. Analiz dokonywano na granulometrze Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd. Przyrząd pozwalał oznaczać cząstki od 0,02 do 2000 μm . Granulometr laserowy na którym prowadzono badania przedstawiono na rysunku 7.



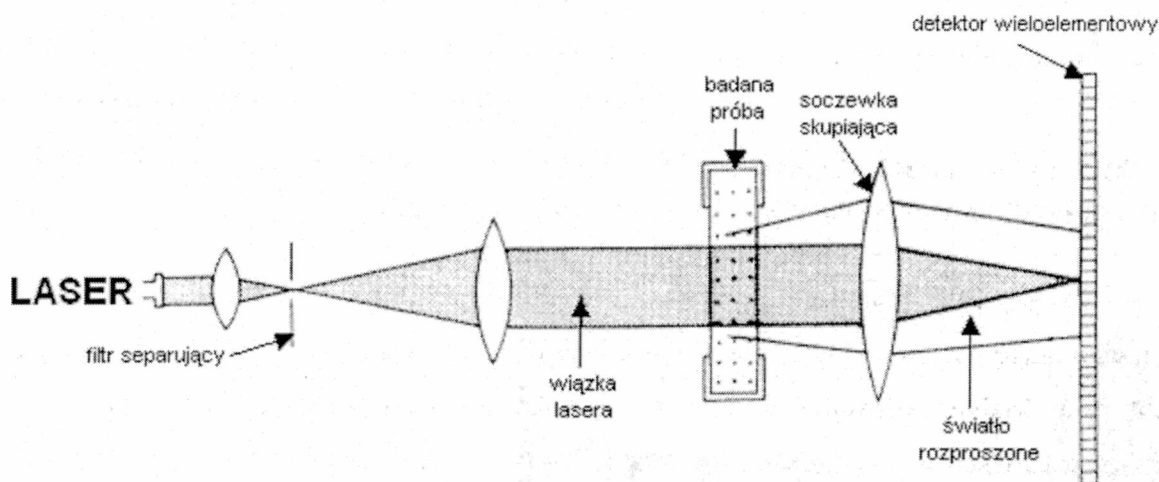
Rys. 7 Granulometr laserowy
Mastersizer 2000

Zasada działania tego urządzenia opiera się na zjawisku dyfrakcji światła laserowego, nazywanym też małokątowym rozpraszaniem światła laserowego (ang. LALLS- *Low Angle Light Laser Scattering*). Cząstki pozostające w zawiesinie rozpraszają światło lasera, przy czym kąt załamania światła jest odwrotnie proporcjonalny do ich wielkości. Przy cząstkach sferycznych dla małych kątów załamania zjawisko to można opisywać analogicznie do dyfrakcji przez szczelinę. Natężenie rozproszonego światła w różnych kierunkach $I(\theta)$ opisuje zależność [86]:

$$I(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\infty} r^2 n(r) J_1^2(kr\theta) dr \quad (59)$$

gdzie: θ jest kątem załamania się światła na cząstkach, r średnicą cząstki, $n(r)$ funkcją rozkładu wielkości cząstek, $k = 2\pi/\lambda$, λ długością fali światła, J_1 funkcją Bessela pierwszego rodzaju.

Pomiar natężenia rozproszonego światła odbywa się za pomocą detektorów wieloelementowych (rys. 8).



Rys. 8. Zasada działania granulometru laserowego [18]

5.2 Badania mętności wody

Do pomiarów mętności opadów atmosferycznych oraz spływów z dachów użyto mętnościomierza laboratoryjnego CyberScan TBD IR 1000 firmy Eutech Instruments (rys. 9). Metoda pomiarowa zastosowana w urządzeniu odpowiada normie ISO 7027: 2001 *Water quality-determination of turbidity*. Przyrząd dokonuje pomiaru mętności metodą nefelometryczną poprzez pomiar natężenia światła rozproszonego pod kątem 90° . Zakres pomiarowy urządzenia mieści się w granicach od 0 do 1000 NTU.



Rys. 9. Miernik mętności
TBD IR 1000

5.3 Badania skaningowe

W celu rozpoznania osadów odłożonych na powierzchni, wewnątrz i pod geowłókniną wykonano zdjęcia za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego firmy LEO (rys. 10), którego zdolność powiększania mieści się w granicach $300 \div 30000$ razy. W urządzeniu tym wiązka elektronów jest kierowana na badaną próbkę. W momencie, gdy wiązka pada na powierzchnię, część elektronów ulega rozproszeniu, część wnika do wnętrza próbki powodując emisję wtórnych elektronów, promieni rentgenowskich oraz światła widzialnego. Rozproszone promieniowanie wykorzystuje się do tworzenia obrazu próbki oglądanej na ekranie monitora. Obraz ten jest następnie zapisywany w postaci cyfrowej na dysku.



Rys. 10. Mikroskop skaningowy
firmy LEO

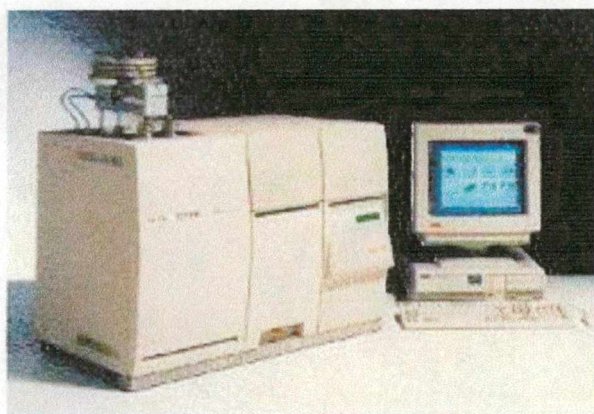
Mikroskop skaningowy posiada przystawkę rentgenowską firmy Röntek pozwalającą oznaczać skład pierwiastkowy badanej powierzchni. Urządzenie to umożliwiło oznaczenie wybranych pierwiastków, gdy ich zawartość była większa od 0,01%.

5.4 Badania składu elementarnego osadów

Oznaczenie zawartości azotu, węgla, wodoru i siarki w wybranych próbach przeprowadzono na analizatorze CHNSEA 1110 firmy CE Instruments.

Przygotowane do badania próby po zmieleniu i umieszczeniu w pojemniczkach cynkowych wprowadzane były do komory spalania. W komorze tej następuje spalanie tlenowe w temperaturze 1800 °C. Proces ten często nazywany jest spalaniem wybuchowym.

Powstające gazy są pochłaniane przez reaktor redukujący, który zamienia m.in. tlenki azotu w azot, SO₃ do SO₂. Rozdzielenia pary wodnej, N₂, CO₂ i SO₂ dokonuje się na kolumnie chromatograficznej, a wykrywanie tych gazów prowadzi się z użyciem detektora przewodności ciepła TCD (*Thermal Conductivity Detector*).



Rys. 11. Analizator CHNSEA 1110 firmy CE Instruments

6 Charakterystyka zastosowanych w badaniach geowłóknin

W badaniach w skali półtechnicznej przeprowadzonych w Bydgoszczy oraz w badaniach prowadzonych we Wrocławiu w skali laboratoryjnej użyto geowłóknin z polipropylenowych włókien ciągłych firmy Polyfelt. Dane techniczne o stosowanych w badaniach geowłókninach zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6

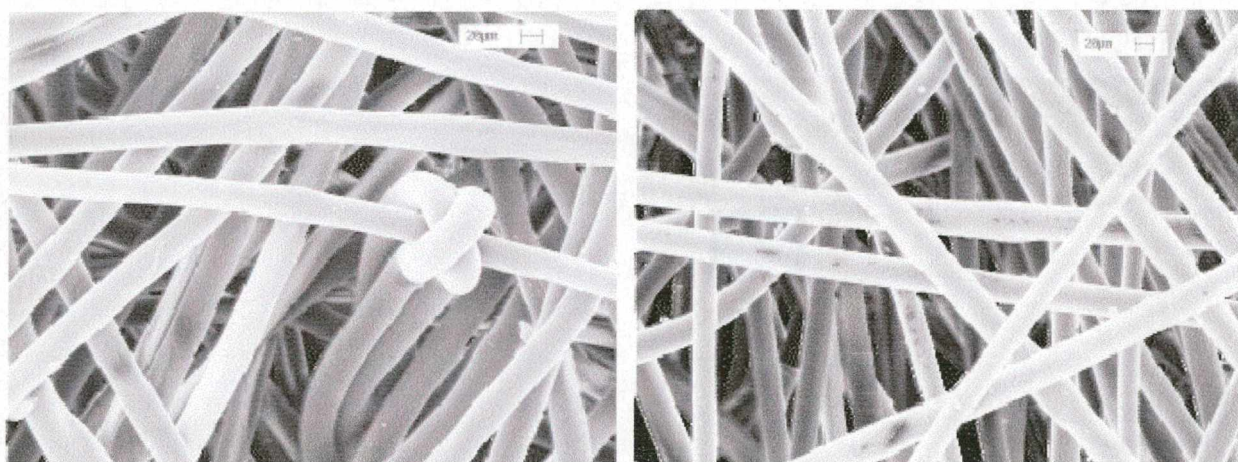
Dane techniczne geowłóknin firmy Polyfelt użytych w badaniach

Właściwości	Metodyka badań	Jednostka	Typ				
			TS 10	TS 20	TS 40	TS 50	TS 60
Umowny wymiar porów O ₉₀	EN ISO 12956	µm	105	105	100	100	95
Wodoprzepuszczalność prostopadła do płaszczyzny geowłókniny	EN ISO 11058	mm/s	130	115	90	85	72
Wodoprzepuszczalność w płaszczyźnie geowłókniny	EN ISO 12958	10 ⁻⁷ m ² /s	6	10	25	30	35
Grubość	PN-EN 964-1	mm	1,0	1,2	1,7	1,9	2,2

Z uwagi na analizowane w pracy zjawisko kolmatacji geosyntetyków w czasie infiltracji istotna była znajomość rozmieszczenia włókien w tkaninie filtracyjnej oraz rozmiar porów. W tym celu przed przystąpieniem do badań wykonano zdjęcia skaningowe czystych geosyntetyków. Przykładowe zdjęcia przedstawiono na rysunku 12.

Na stanowisku badawczym wykonanym w skali półtechnicznej we Wrocławiu, z użyciem skrzynek AZURA, zastosowano geowłókninę polipropylenową GEOTESS typ PP150.

Grubość geosyntetyku wynosiła 2,1 mm, a wodoprzepuszczalność prostopadła do płaszczyzny geowłókniny 0,0026 m/s. Wygląd geowłókniny PP150 i jej zdjęcie skaningowe przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 12. Zdjęcia skaningowe geowłóknin TS 10 (po lewej) i TS 20 (po prawej) przy powiększeniu 500 razy



Rys. 13. Wygląd geowłókniny PP150 oraz jej zdjęcie skaningowe

7 Badania składu granulometrycznego zawiesin zawartych w deszczach, śniegu i spływach z dachów

7.1 Wprowadzenie

Skład opadów atmosferycznych pozostaje w ścisłej korelacji z zanieczyszczeniem powietrza atmosferycznego. W powietrzu obok składników gazowych znajdują się cząstki (pyły) pochodzenia organicznego i nieorganicznego. Pyły organiczne pochodzenia roślinnego noszą nazwę aeroplanktonu. Zalicza się do niego pyłki roślin, zarodników grzybów i roślin zarodnikowych, bakterie oraz glony. W skład pyłów wchodzi także produkty spalania: sadza i popioły lotne, cząstki mineralne powstające w wyniku reakcji chemicznych zachodzących z udziałem obecnych w powietrzu gazów a także porywane w wyniku procesów eolicznych cząstki wchodzące w skład gleb lub powstające w wyniku działalności człowieka.

Przez większą część roku, głównie w okresie wegetacyjnym roślin, w powietrzu unoszą się ziarna pyłków roślinnych. Ich wielkość jest zmienna w zależności od wilgotności powietrza. Wymiary ziaren pyłków roślinnych mieszczą się w granicach od 5 do 200 μm [31, 32, 61]. Do największych należą ziarna pyłków dyni (ok. 140 μm) oraz kukurydzy (90–100 μm). Średni wymiar ziaren pyłków bylicy wynosi 19 μm , a wierzby 17 μm . Jedne z najmniejszych ziaren pyłku wytwarza niezapominajka (3–8 μm). Wielkości i fotografie pyłków wraz z ilustracjami roślin odpowiedzialnych za ich wytworzenie zestawiono w załączniku 1. Fotografie roślin zaczerpnięto ze zbiorów własnych oraz z pozycji [53], natomiast wielkości i wygląd pyłków ustalono na podstawie prac [27, 52, 54].

Najwięcej pyłku opada w pobliżu roślin macierzystych. Część jest transportowana na odległość kilku, kilkunastu kilometrów, a pyłek niektórych roślin może być przenoszony przez wiatr na odległość nawet kilku tysięcy kilometrów. Czasami nad Polską pojawia się pyłek roślin rosnących w oazach na Saharze lub na dalekich stepach [61]. Możliwości rozprzestrzeniania się pyłków roślinnych zależą od wielu zmiennych czynników. Dużą rolę odgrywa prędkość wiatru i jego kierunek. Deszcz wypłukuje pyłki roślin z atmosfery. W zawiesinach zawartych w wodach opadowych duży udział stanowi aeroplankton. Zjawisko oczyszczania powietrza z mikroskopowo drobnych zawiesin można zaobserwować w maju, w okresie największego nasilenia kwitnienia drzew iglastych. W tym czasie po opadzie deszczu na brzegach kałuż pojawiają się siarkowożółte obwódki utworzone z aeroplanktonu. Zjawisko to nosi nazwę deszczu siarczanowego.

Innym składnikiem aeroplanktonu są zarodniki grzybów, które pojawiają się wczesną wiosną, a szczytowe stężenie osiągają późnym latem i jesienią. W tym okresie stężenie

zarodników niektórych gatunków grzybów przekracza od 100 do 1000 razy stężenie ziaren pyłku roślin w atmosferze [52]. Są one jednak mniejsze niż wchodzące wraz z nimi w skład naturalnego bioaerozolu ziarna pyłku. W tabeli 7 zestawiono najczęściej występujące w atmosferze zarodniki grzybów oraz podano ich średni wymiar.

Przykłady wielkości cząstek nieorganicznych pochodzących z różnych źródeł antropogenicznych zestawiono w tabeli 8.

Tabela 7

Wielkość zarodników grzybów występujących najczęściej w atmosferze

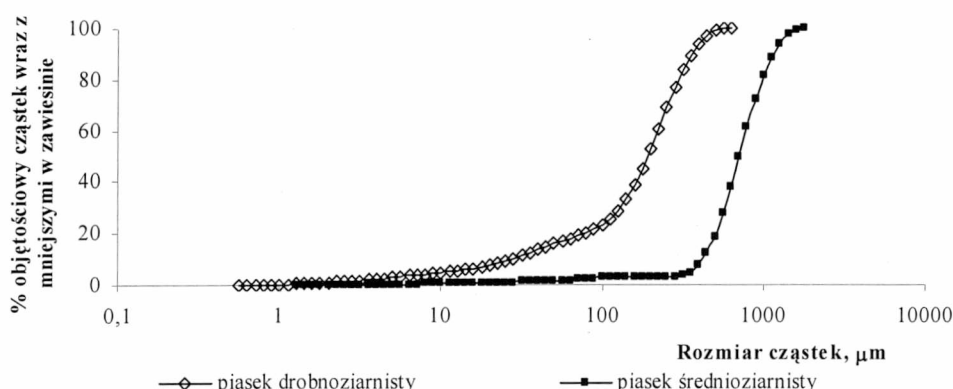
Nazwa grzyba	Wielkość zarodników w μm
<i>Alternaria alternata</i>	125 – 1500
<i>Cladosporium herbarum</i>	3 – 5
<i>Aspergillus fumigatus</i>	2,5 – 3

Tabela 8

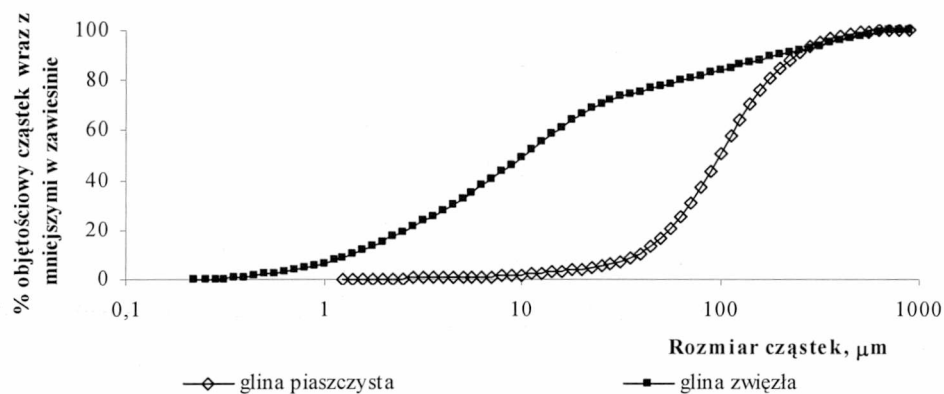
Wielkość pyłów pochodzenia antropogenicznego [6]

Typ cząstki pyłu	Wielkość cząstek pyłów μm
Pył z cementowni	80 – 90% < 30
Spaliny samochodowe	0,01 – 5000
Miejski pył uliczny	3 – 100
Popiół	1 – 2000
Pył węglowy	3 – 100

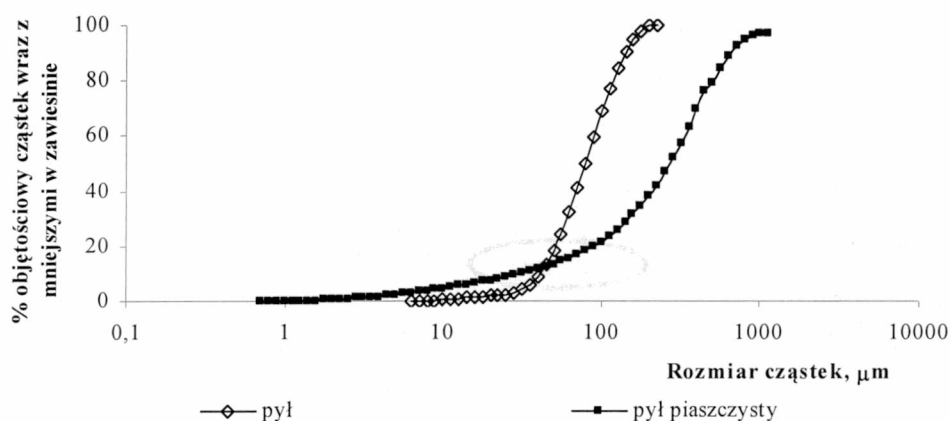
W celu poznania wymiarów cząstek gleb, które mogą być wynoszone do atmosfery w wyniku erozji wietrznej wykonano badania składu granulometrycznego różnych gruntów. Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 14 – 17.



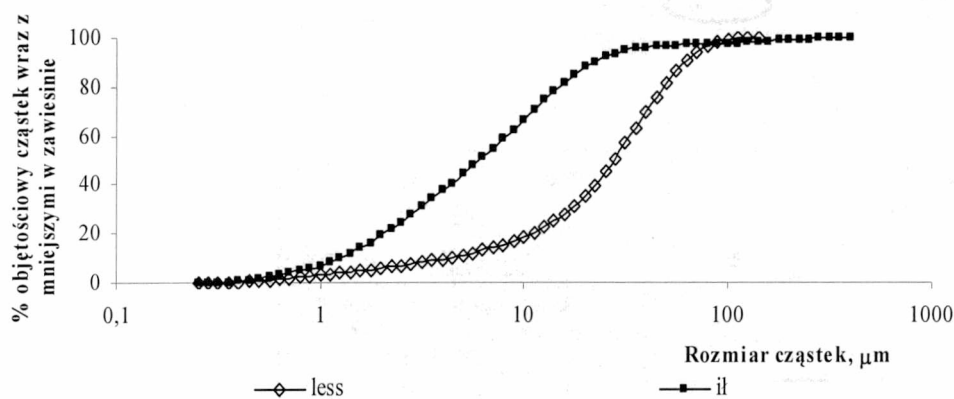
Rys. 14. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z piasku drobno i średnioziarnistego (badania własne)



Rys. 15. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z gliny piaszczystej i zwięzłej (badania własne)

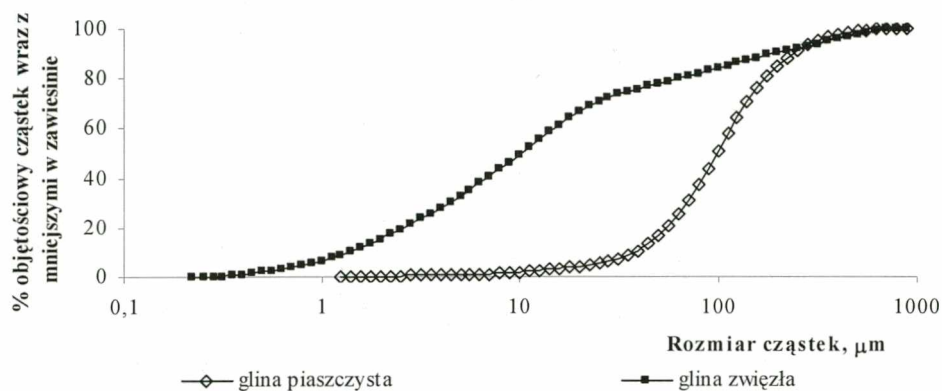


Rys. 16. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z pyłu i pyłu piaszczystego (badania własne)

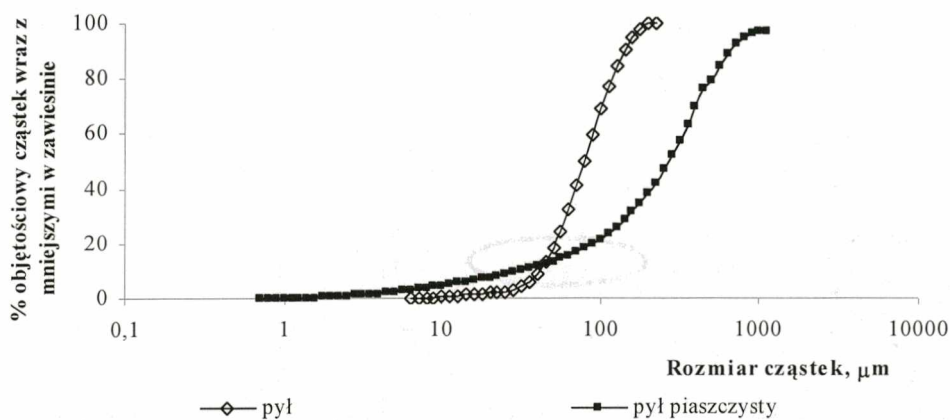


Rys. 17. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z lessu i łu (badania własne)

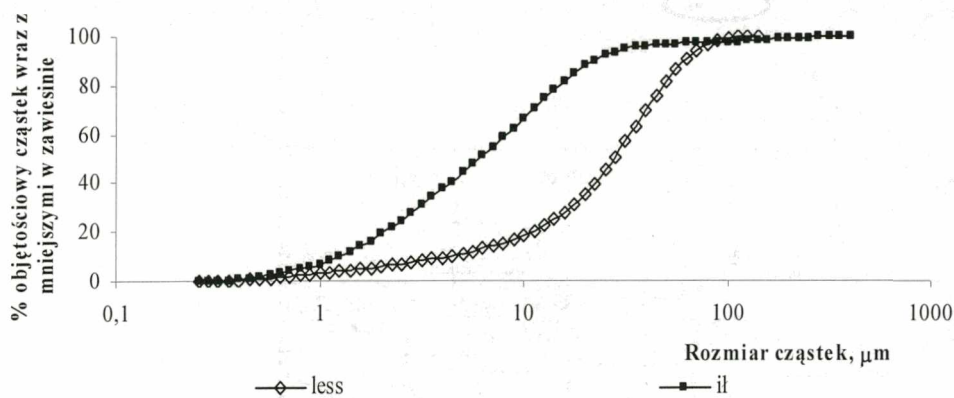
W większości analizowanych gruntów występowały cząstki o wymiarach od 0,2 µm do 800 µm. Najmniejszy wymiar cząstek stwierdzono w lessie. W badanym lessie największe



Rys. 15. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z gliny piaszczystej i zwięzłej (badania własne)

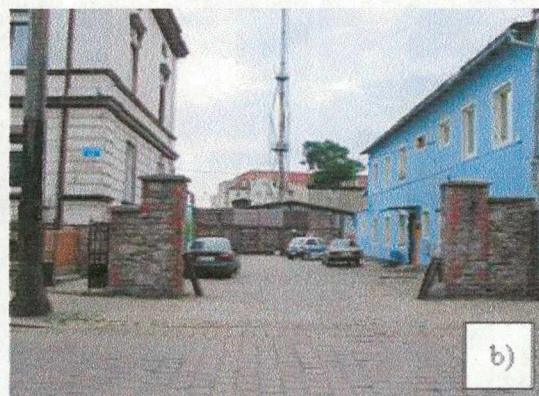
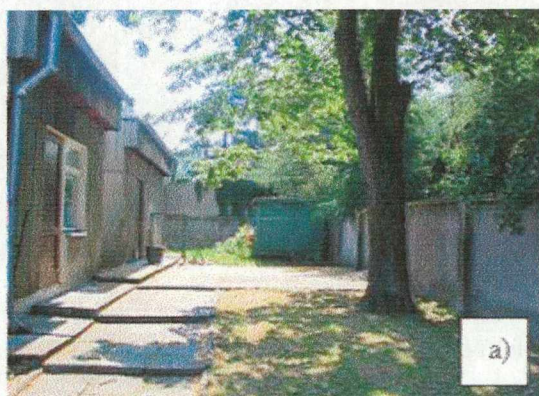


Rys. 16. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z pyłu i pyłu piaszczystego (badania własne)

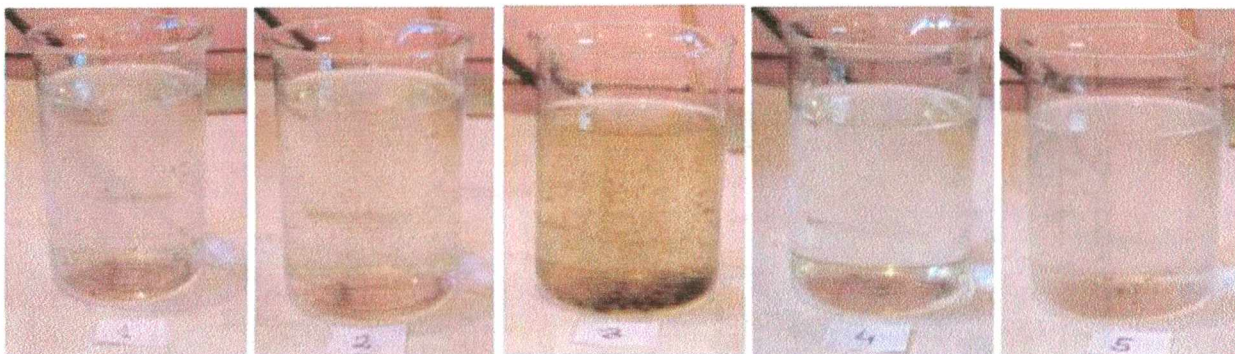


Rys. 17. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin wypłukanych z lessu i łu (badania własne)

W większości analizowanych gruntów występowały cząstki o wymiarach od 0,2 μm do 800 μm . Najmniejszy wymiar cząstek stwierdzono w lessie. W badanym lessie największe



Rys. 19. Zdjęcia punktów poboru prób opadów deszczu: a) we Wrocławiu, ul. Dicksteina; b) w Strzelinie, ul. Jana Pawła II; c) w Bielawie, osiedle XXV-lecia; d) w Kietrzu na terenie łąki; e) w Raciborzu blisko zakładów chemicznych „Henkel”



Rys. 20. Wybrane próby deszczy i spływów z dachów pobranych na analizowanych stanowiskach pomiarowych

1-deszcz z dnia 11.06.2004 ze Strzelina z ul. Jana Pawła II; 2-spływ z rynny z dachu pokrytego dachówką z dnia 11.06.2004 ze Strzelina z ul. Jana Pawła II; 3- spływ z rynny z dachu pokrytego papą pobrany w dniu 9.06.2004 we Wrocławiu na ul. Dicksteina; 4- deszcz z dnia 9.06.2004 pobrany w Bielawie na Oś. XXV-lecia; 5-deszcz pobrany w dniu 10.04.2004 w Raciborzu niedaleko zakładów chemicznych „Henkel”

7.3 Skład granulometryczny zawiesin w opadach śniegu

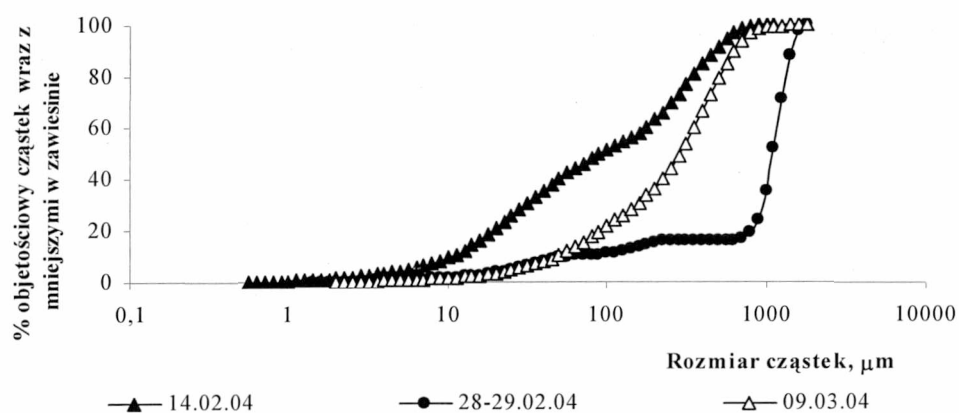
W tabeli 9 przedstawiono zakres cząstek zawiesin, jaki występował w różnych próbach roztopionego śniegu, a na rysunkach 21-25 udział procentowy cząstek składu granulometrycznego zawiesin zawartych w opadach .

Badania wykazały, że w próbach opadu śniegu pochodzących zarówno z Wrocławia jak i ze Strzelina największy udział procentowy w objętości zawiesin miały cząstki o rozmiarze do 400 μm . W próbie śniegu ze Strzelina z dnia 18 stycznia 2004 udział ten wyniósł aż 99%. W opadach śniegu z Bielawy najwięcej cząstek miało wymiar do 100 μm , przy czym cząstki o średnicy zastępczej 60 μm stanowiły około 60%. We wszystkich analizowanych próbach opadów śniegu pobranych na stanowiskach pomiarowych na Górnym Śląsku największy udział miały cząstki poniżej 200 μm . Stanowiły one 70 – 80% zawartości wszystkich cząstek w opadach śniegu. Widać duże zróżnicowanie składu granulometrycznego cząstek w zależności od miejsca poboru próby.

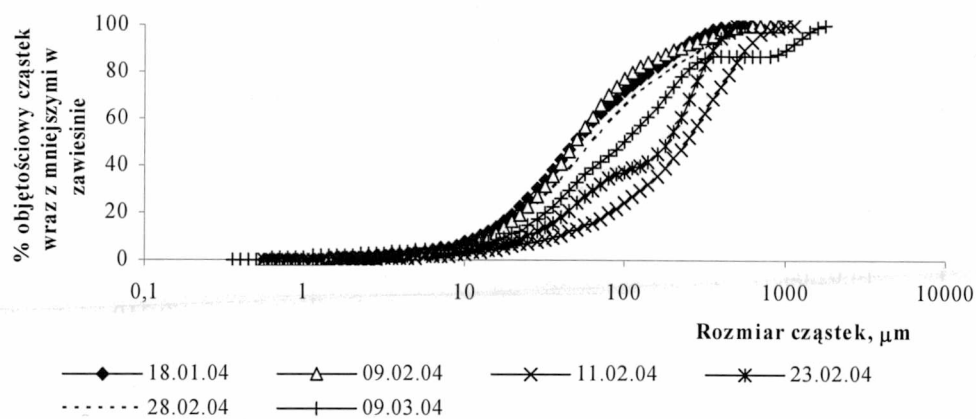
Tabela 9

Zakres wielkości cząstek oraz ilość zawieszin występujących w pobranych próbach śniegu

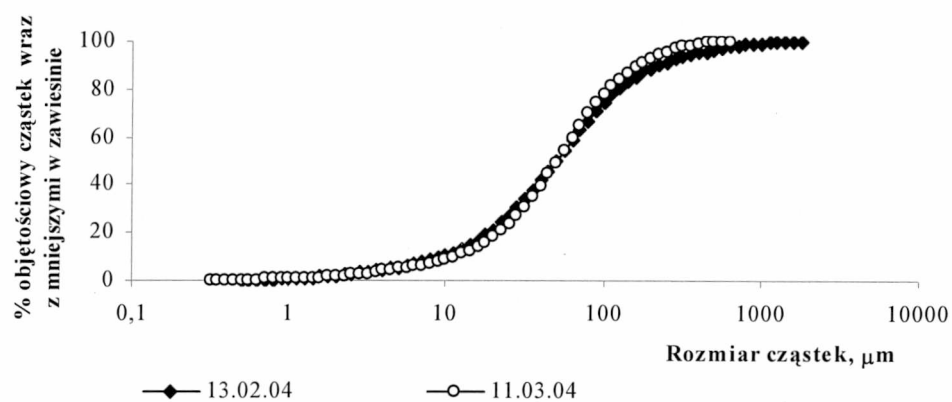
Data pomiaru	Zakres wielkości cząstek w μm	Ilość zawieszin w cm^3/dm^3
Wrocław, ul. Dicksteina		
12.02.04	0,8 – 893	0,131
14.02.04	0,6 – 1125	0,310
28-29.02.04	1,6 – 1783	0,310
09.03.04	2,2 – 1783	0,330
01.03.04	1,6 – 1783	0,310
Strzelin, ul. Jana Pawła II		
18.01.04	0,6 – 632	0,080
30.01.04	2,5 – 1783	0,830
09.02.04	0,6 – 796	0,520
11.02.04	1,6 – 1125	0,300
28.02.04	0,6 – 710	0,360
09.03.04	0,4 – 1783	0,130
23.04.04	0,6 – 564	0,060
Bielawa, osiedle XXV-lecia		
12.02.04	0,6 – 1783	0,044
11.03.04	0,4 – 632	0,093
Kietrz na terenie łąki		
16.02.04	0,6 – 632	0,033
23.02.04	0,4 – 632	0,016
01.03.04	0,4 – 632	0,005
06.03.04	1,8 – 632	0,069
13.03.04	1,3 – 632	0,023
Racibórz blisko zakładów "Henkel"		
16.02.04	0,6 – 252	0,072
23.02.04	0,4 – 632	0,007
01.03.04	0,7 – 632	0,075
06.03.04	0,7 – 159	0,091
13.03.04	1,6 – 710	0,169



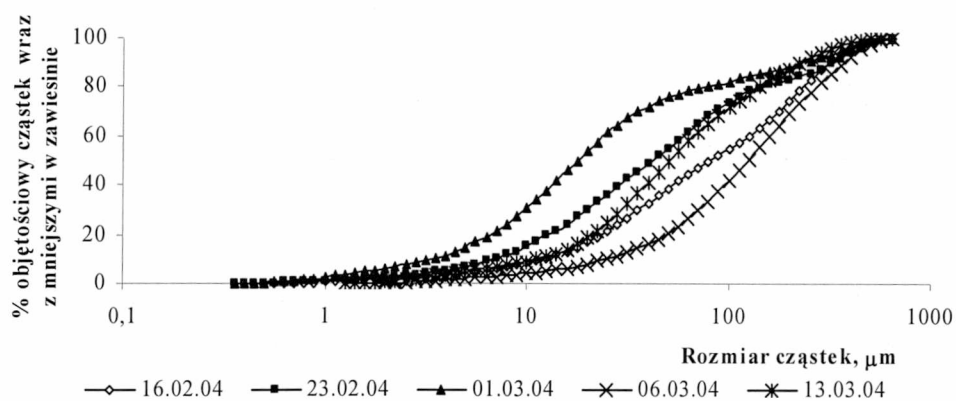
Rys. 21. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w próbach opadu śniegu pobranych we Wrocławiu na ul. Dicksteina



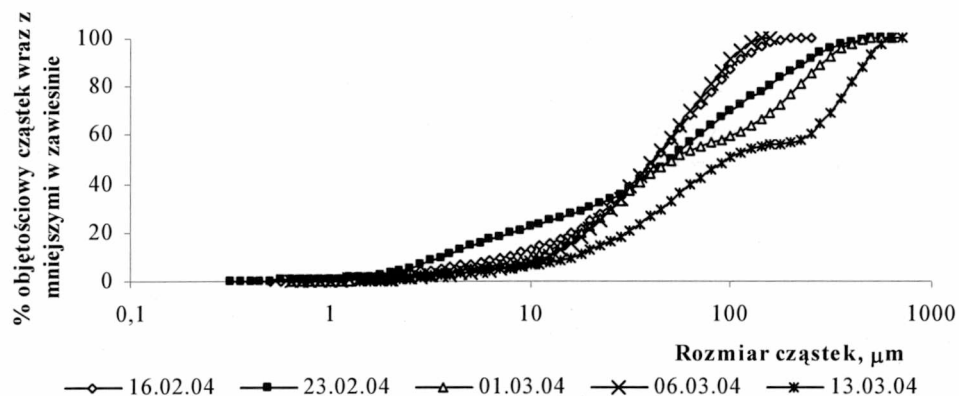
Rys. 22. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych w Strzelinie na ul. Jana Pawła II



Rys. 23. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych w Bielawie na osiedlu XXV-lecia



Rys. 24. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu pobranych w Kietrz na terenie łąki



Rys. 25. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach opadu śniegu z Raciborza blisko zakładów chemicznych „Henkel”

7.4 Skład granulometryczny zawiesin w opadach deszczu

W tabeli 10 przedstawiono zakresy średnic zastępczych cząstek stwierdzanych w badanych deszczach. Na rysunkach 26 –30 przedstawiono szczegółowo wybrane wyniki badań.

W opadach deszczu we Wrocławiu przy ulicy Dicksteina zaobserwowano, że w okresie zimowym największy udział w objętości zawiesin stanowiły cząstki do 400 µm, natomiast w okresie wiosennym zwiększył się udział cząstek dużych o średnicy zastępczej dochodzącej do 1000 µm. Najprawdopodobniej jest to związane ze zjawiskiem łączenia się pyłków roślinnych uwalnianych w dużych ilościach w czasie kwitnienia drzew. Ten punkt kontrolny znajdował się w bliskim sąsiedztwie z Parkiem Szczytnickim.

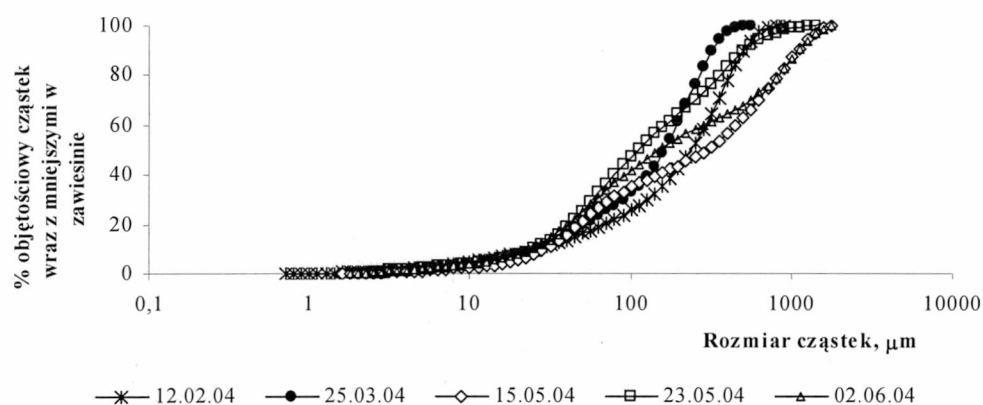
Tak znacznego udziału dużych cząstek nie zaobserwowano w próbach ze Strzelina, gdzie miejsce pomiarowe znajdowało się w dużej odległości od drzew i krzewów, które mogłyby dodatkowo wpływać na ilość aeroplanktonu. W próbach deszczu zebranych w Strzelinie największy udział stanowiły cząstki do 400 µm w całym okresie badawczym, za wyjątkiem próby z dnia 22.05.04, w której przeważały cząstki o wymiarze średnicy zastępczej poniżej 100 µm. W próbie tej cząstki o wymiarze 70 µm stanowiły 70% całej objętości zawiesin zawartych w opadach.

Wysoki udział zawiesin o małych 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.

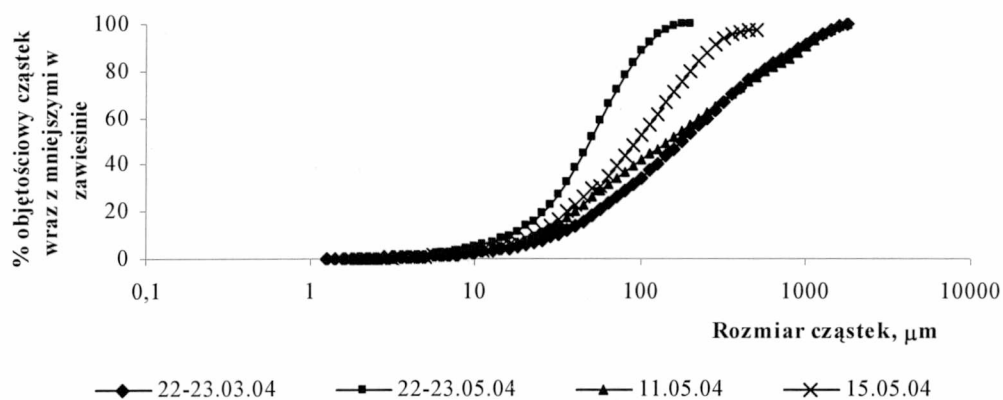
Tabela 10

Zakres wielkości cząstek oraz ilość zawiesin występujących w pobranych próbach deszczu

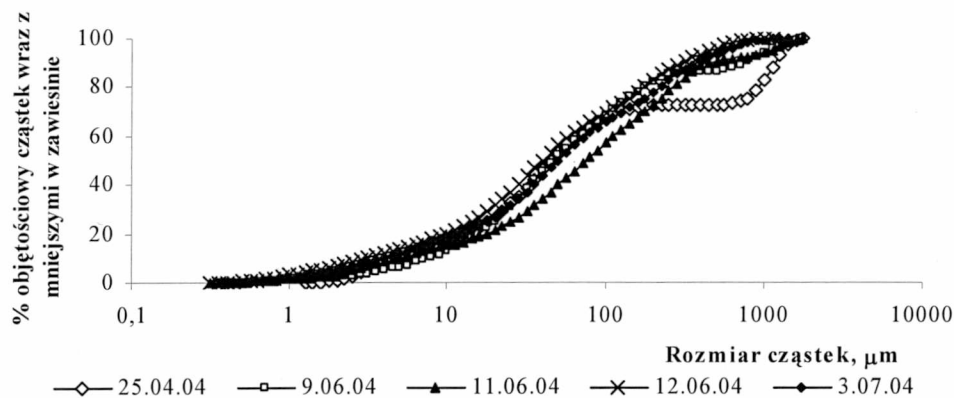
Data pomiaru	Zakres wielkości cząstek w μm	Ilość zawiesin w cm^3/dm^3	Mętność w NTU
Wrocław, ul. Dicksteina			
02.07.03	0,4 – 1783	0,051	–
03.07.03	1,6 – 1783	0,133	–
20.11.03	0,4 – 632	0,066	–
12.02.04	0,8 – 893	0,136	–
25.03.04	1,8 – 564	0,091	10,6
06.05.04	1,8 – 893	0,230	–
10.05.04	1,8 – 356	0,044	2,47
15.05.04	1,8 – 1783	0,218	82,90
23.05.04	2,2 – 1783	0,629	–
02.06.04	2,0 – 1783	0,380	16,9
20.07.04	1,4 – 1783	0,250	–
Strzelin, ul. Jana Pawła II			
22-23.03.04	1,6 – 1783	0,140	9,90
12.05.04	2,0 – 1783	0,180	16,2
15.05.04	2,0 – 502	0,090	14,5
22-23.05.04	2,5 – 182	0,014	–
11.06.04	2,2 – 1783	0,179	6,89
Bielawa, osiedle XXV-lecia			
24.04.04	1,3 – 417	0,130	2,54
25.04.04	1,3 – 2188	0,040	4,50
12.05.04	1,6 – 356	0,092	–
9.06.04	0,4 – 1783	0,031	2,89
10.06.04	0,4 – 1783	0,025	5,03
11.06.04	0,4 – 1783	0,007	1,97
12.06.04	0,4 – 1783	0,016	1,51
2.07.04	0,4 – 200	0,006	3,39
3.07.04	0,4 – 1416	0,026	–
12.07.04	0,4 – 356	0,020	–
Kietrz na terenie łąki			
19.03.04	0,4 – 356	0,030	10,00
26.03.04	1,0 – 1783	0,211	21,70
11.04.04	2,0 – 1783	0,138	15,30
20.04.04	1,8 – 1783	0,144	–
24.04.04	2,0 – 1783	0,112	19,80
Racibórz blisko zakładów „Henkel”			
22.03.04	0,3 – 399	0,210	14,50
26.03.04	0,4 – 564	0,012	6,23
07.04.04	1,6 – 632	0,040	–
11.04.04	1,8 – 1783	0,133	10,2
24.04.04	1,8 – 356	1,050	7,8



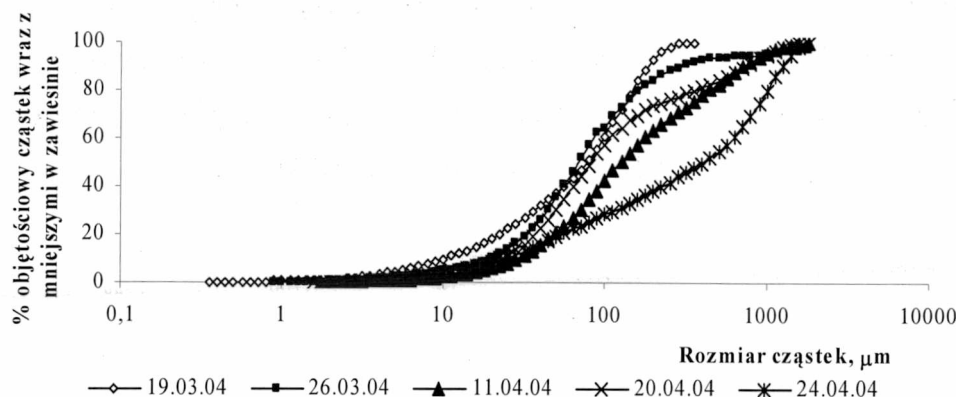
Rys. 26. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych we Wrocławiu na ul. Dicksteina



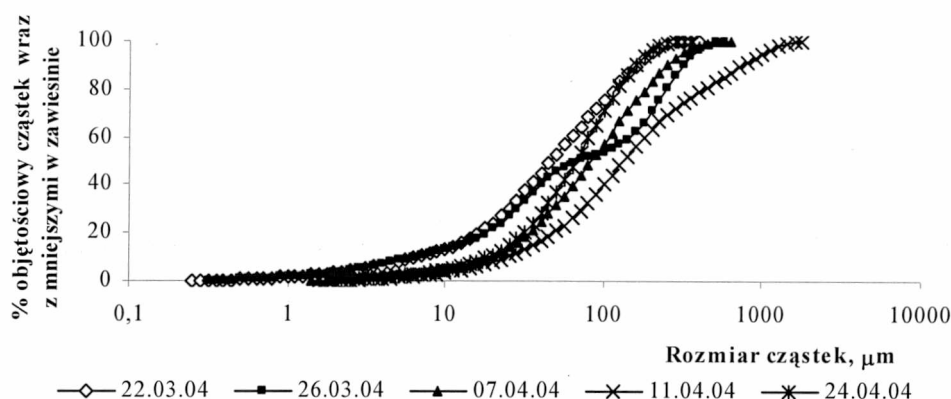
Rys. 27. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Strzelinie na ul. Jana Pawła II



Rys. 28. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Bielawie na osiedlu XXV-lecia



Rys. 29. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Kietrze na terenie łąki



Rys. 30. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach deszczu pobranych w Raciborzu blisko zakładów chemicznych „Henkel”

7.5 Skład granulometryczny zawiesin w wodach odprowadzanych rynnami

Znajomość składu granulometrycznego deszczówki odpływającej z dachów w różnych fazach opadu jest istotna dla projektowania systemów do infiltracji wód opadowych. Skład tych wód jest zależny od jakości wód deszczowych oraz zanieczyszczeń zdeponowanych na połaci dachowej w okresie bezopadowym. Można także podejrzewać, że na skład chemiczny wpływa rodzaj pokrycia dachowego oraz jego pochylenie. Na dachach o dużym kącie nachylenia nie będą gromadzić się makro zanieczyszczenia np. liście, które mogą zalegać na stropodachach. Spłukiwanie tych zanieczyszczeń, szczególnie w okresie jesiennym i wiosennym, powoduje, że wody odpływające z rynien mogą być silnie zanieczyszczone zbutwiałymi liśćmi, resztkami roślinności, guanem itp. Obrazuje to fotografia przedstawiona na rys. 31 wykonana w kwietniu 2004 r. we Wrocławiu na ul. Dicksteina.

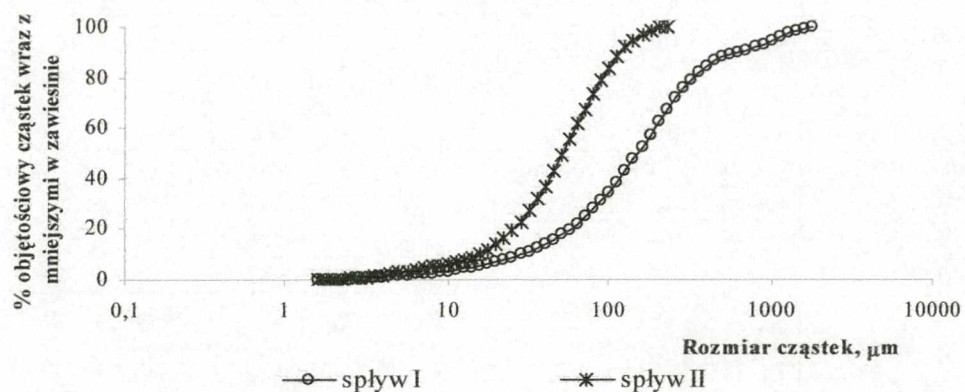
Obserwacje poczynione w czasie prowadzenia badań dowodzą, że przy projektowaniu podziemnych systemów do infiltracji wód deszczowych odprowadzanych z dachów konieczne

jest zaprojektowanie studzienek sedimentacyjnych, które oczyszczałyby wody z makrozawiesin. Dotychczas problem ten nie był sygnalizowany w publikacjach.

Wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w wodach odprowadzanych rynnami zostały przedstawione w tabeli 11 oraz na rysunku 32-36



Rys. 31. Przykład zanieczyszczeń naniesionych wraz ze spływem z dachu pobranym we Wrocławiu w kwietniu 2004 r.



Rys. 32. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach pierwszego i drugiego spływu wód opadowych z dachu pokrytego papą pobranych do badań we Wrocławiu w dniu 2.06.2004

Tabela 11

Zakres wielkości cząstek oraz ilość zawiesin występujących w pobranych próbach spływów z dachów

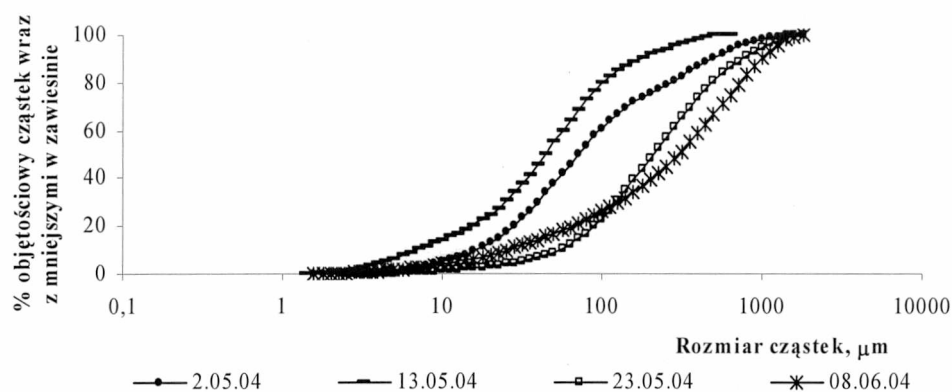
Data pomiaru	Zakres wielkości cząstek w μm	Ilość zawiesin w cm^3/dm^3	Mętność w NTU
Wrocław, ul. Dicksteina			
9.02.04	1 – 1262	0,048	–
23.02.04	1,6 – 317	0,074	–
1.03.04	1,6 – 1783	0,091	–
9.03.04	1,6 – 710	0,120	–
24.03.04	0,5 – 632	0,011	–
6.04.04	2,5 – 1905	1,410	44,40
2.05.04*	1,9 – 1905	4,410	197,00
10.05.04	2 – 632	0,210	16,50
13.05.04*	1,6 – 632	0,190	11,2
17.05.04*	1,4 – 1783	0,090	3,56
23.05.04*	1,6 – 502	0,837	6,19
2.06.04*	1,8 – 1783	0,365	10,8
2.06.04	1,8 – 224	0,180	7,05
8.06.04*	1,8 – 1783	0,990	172
9.06.04*	3,6 – 1783	1,450	14,3
28.06.04	1,6 – 1783	0,480	–
20.07.04	2,8 – 1783	1,090	–
Strzelin, ul. Jana Pawła II			
23.03.04p	2,2 – 1783	2,27	–
6.05.04p	1,6 – 502	1,90	–
12.05.04d	1,4 – 502	0,057	–
18.01.04p	0,8 – 1783	0,286	–
10.03.04p	0,6 – 632	0,087	–
17.04.04d	2,2 – 1096	0,45	20,5
25.04.04d	1,9 – 631	0,22	13,4
15.05.04d	1,6 – 159	0,054	9,14
11.06.04d	2,2 – 1783	0,23	7,14

* – próba pobrana w początkowej fazie opadu

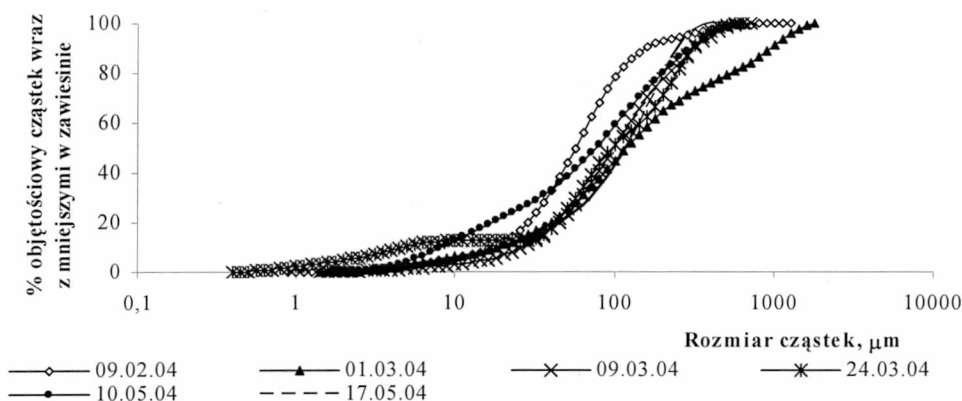
d – próby spływów z dachu pokrytego dachówką

p – próby spływów z dachu pokrytego papą

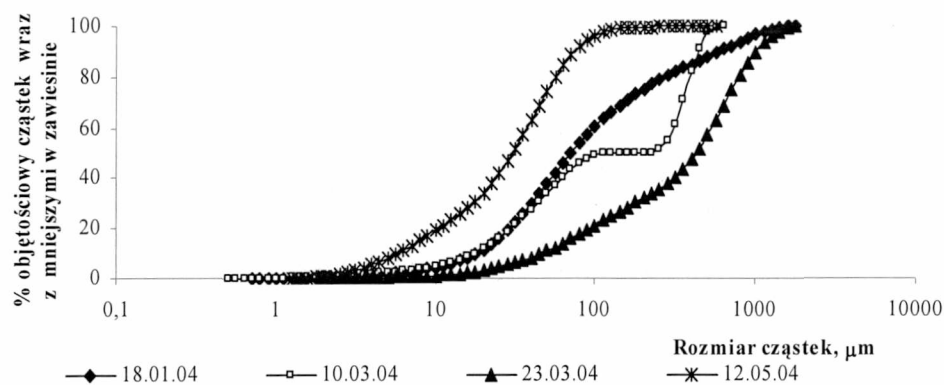
Brak przypisów oznacza, że próba odnosi się do uśrednionej wartości z całego opadu



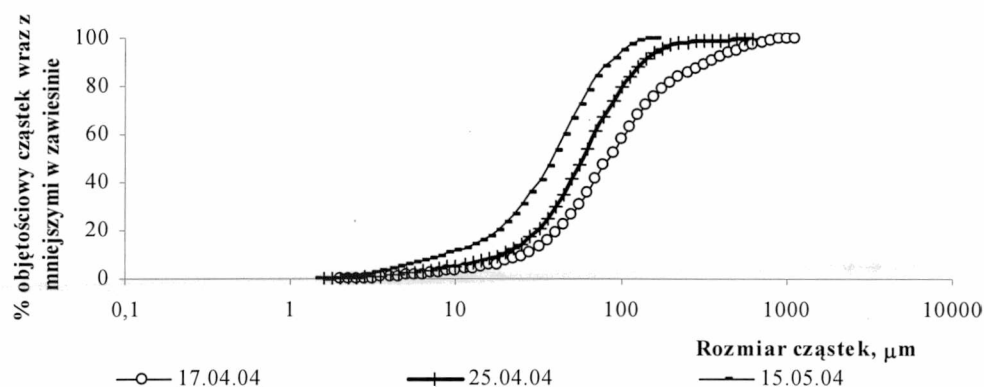
Rys. 33. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach spływów wód opadowych z dachu pobranych w początkowej fazie opadu we Wrocławiu



Rys. 34. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w uśrednionych próbach spływów wód opadowych z dachu pobranych we Wrocławiu



Rys. 35. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach spływów wód opadowych z dachu pokrytego papą pobranych w Strzelinie

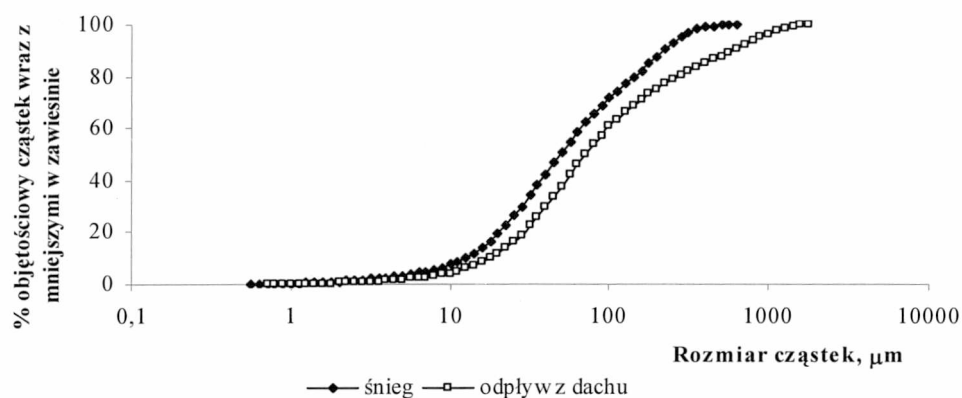


Rys. 36. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w próbach spływów wód opadowych z dachu pokrytego dachówką pobranych w Strzelinie

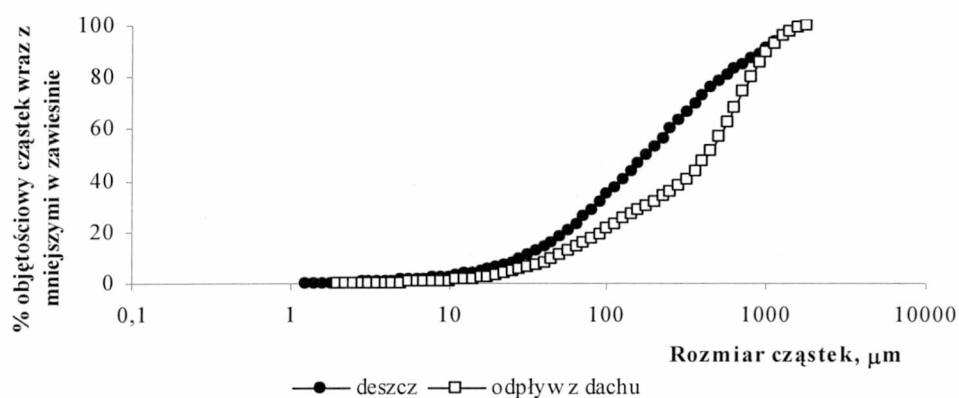
Przeprowadzone badania pokazują dużą zmienność składu granulometrycznego w wodach opadowych odprowadzanych rynnami. Objętość zawiesin w tych wodach mieściła się w przedziale od $0,011$ do $4,41 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Na rysunkach 37÷40 przedstawiono skład granulometryczny zawiesin w wodach odpływających z rynny oraz w opadach z których one powstawały. To porównanie miało na celu pokazanie w jaki sposób zmienia się skład granulometryczny wód opadowych w kontakcie z połącią dachową.

Na rysunku 37 przedstawiono wyniki badań prób pobranych do analizy w dniu 18.01.04 w Strzelinie. W dniu tym padał śnieg, który przy dodatniej temperaturze powietrza rozpuszczał się na dachu. Skład granulometryczny obu prób był zbliżony do siebie, jednakże następował wyraźny wzrost objętości zawiesiny. W opadzie śniegu całkowita objętość zawiesin wynosiła $0,080 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, a w spływach z dachów $0,286 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. W próbie śniegu udział cząstek do $100 \mu\text{m}$ stanowił 72% zawartości wszystkich cząstek w zawieszynie, natomiast w próbie odpływu stopionego śniegu z dachu pokrytego papą udział tych cząstek był mniejszy i wynosił 61%. Warto zwrócić uwagę na fakt, że w próbie śniegu, w przeciwieństwie do próby odpływu, nie było cząstek powyżej $700 \mu\text{m}$. Taki skład granulometryczny oraz wzrost objętości zawiesiny w spływie z dachu nasuwa przypuszczenie, że zanieczyszczenia powyżej $700 \mu\text{m}$ były splukiwane z powierzchni dachu. Czynnikiem, który miał prawdopodobnie istotny wpływ na wzrost zawiesiny o dużych wymiarach były pyły pochodzące z palenisk domowych użytkowanych intensywnie w okresie zimy.

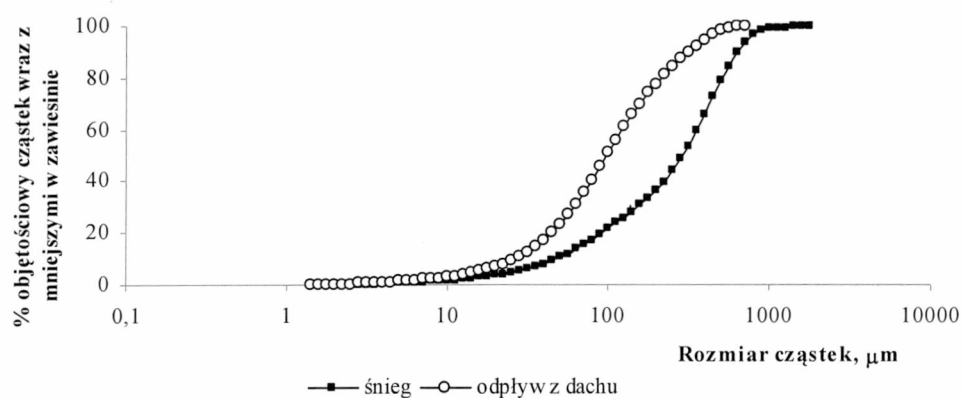
Przyrost objętości zawiesiny zaobserwowano także w próbach pobranych w Strzelinie w dniu 23.03.04 (rys. 38). W próbie deszczu objętość zawiesin wyniosła $0,140 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ a w spływie z dachu $2,27 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Procentowy udział cząstek zawiesiny był zbliżony do siebie w obu próbach. Można wnioskować, że cząstki splukiwane z dachu miały podobne wymiary do cząstek wyplukiwanych z powietrza. Badania te prowadzono w okresie grzewczym.



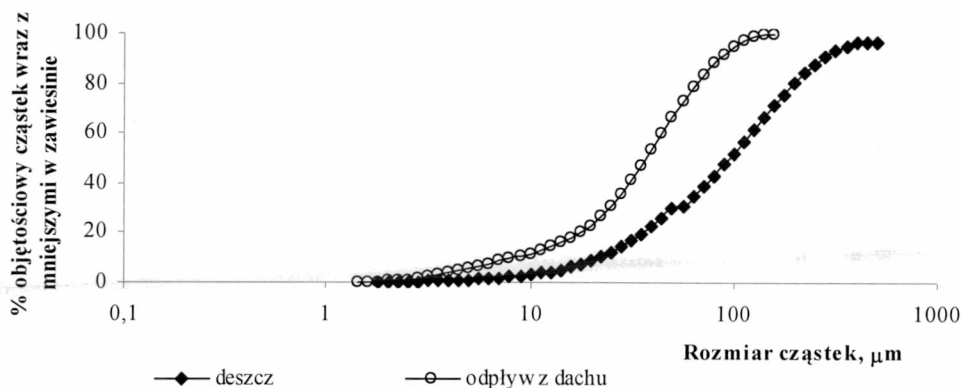
Rys. 37. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w śniegu i w odpływie stopionego śniegu wypływającego z rynny w dniu 18.01.2004 w Strzelinie



Rys. 38. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w deszczu i odpływie z rynny pobranych w dniu 23.03.2004 w Strzelinie



Rys. 39. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w opadzie śniegu i w odpływie stopionego śniegu z rynny pobranych w dniu 09.03.2004 we Wrocławiu



Rys. 40. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin w opadzie deszczu i w odpływie z rynny pobranych w dniu 15.05.2004 w Strzelinie

W dniu 09.03.04 we Wrocławiu w próbach śniegu w porównaniu z odpływami z dachów stwierdzono większy udział cząstek dużych (rys. 39). Podobne zjawisko, tym razem przy opadach deszczu zaobserwowano w dniu 15.05.04 w Strzelinie (rys. 40). W obu przypadkach obserwowano zmniejszenie objętości zawiesin w odpływach z dachów w porównaniu do wartości tego wskaźnika w opadach atmosferycznych.

W opadzie śniegu w dniu 09.03.04 we Wrocławiu stwierdzono objętość zawiesin $0,330 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, podczas gdy w spływie z dachu wartość ta wynosiła $0,120 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. W Strzelinie w opadzie deszczu stwierdzono objętość zawiesin $0,090 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ a w spływie z dachu $0,054 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. W tym przypadku obserwowano także zmniejszenie mętności. Mętność deszczu wynosiła 14,5 NTU a spływu 9,14 NTU.

Zjawisko to można wytłumaczyć zatrzymywaniem zawiesin na połaci dachowej lub niejednorodnością ilości zawiesin w różnych miejscach pola deszczu. Potwierdzenie tej tezy wymaga dalszych badań.

7.6 Mętność opadów

Najmniejszą mętnością, od 1,51 NTU do 5,03 NTU, charakteryzowały się opady deszczu w Bielawie. Mętności opadów charakteryzowały się dużym zróżnicowaniem podobnie jak i spływów z dachów.

Największą mętność w spływie z dachu, wynoszącą 197 NTU, zaobserwowano na początku opadu w dniu 02.05.04 we Wrocławia. W próbie tej stwierdzono również bardzo wysoką objętość zawiesiny wynoszącą aż $4,41 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Tak wysoką zawartość i mętność spływu można wytłumaczyć porą roku. Miejsce poboru prób na ul. Dicksteina zlokalizowane było w bezpośrednim sąsiedztwie Parku Szczytnickiego. W kwietniu i na początku maja

kwitnie w nim wiele drzew, krzewów i roślin zielnych, których pyłki kwiatowe są wypłukiwane przez wody opadowe.

Podjęto próbę skorelowania objętości zawiesin w deszczach a mętnością wody. Nie uzyskano związków statystycznie istotnych. Podobnie było ze spływami z dachów.

7.7 Podsumowanie badań

Zakres wielkości cząstek występujących w opadach jest zależny od rodzaju pyłów i stanu czystości powietrza atmosferycznego. Badania objętości zawiesin oraz ich składu granulometrycznego prowadzone w wybranych miastach Dolnego i Górnego Śląska wykazały dużą zmienność wartości tych wskaźników.

Największy udział w objętości zawiesin dla opadów pobranych z Wrocławia i Strzelina stanowiły cząstki do 400 μm , natomiast w Kietrze i Raciborzu do 200 μm . W Bielawie w próbach śniegu większość zawiesin stanowiły cząstki do 100 μm a w przypadku deszczu do 200 μm .

W próbach z Bielawy zaobserwowano dużą powtarzalność wyników badań składu granulometrycznego, w przeciwieństwie do prób ze Strzelina, Wrocławia, Kietrza i Raciborza.

Badania spływów wód opadowych z dachów wykazały, że największą objętością zawiesin charakteryzują się wody pierwszej fazy spływu. W tym okresie licznie występują cząstki o wymiarach przekraczających 500 μm . W miarę trwania deszczu wzrasta w objętości zawiesin udział cząstek małych do 100 μm . Wzrost udziału cząstek o małych średnicach zastępczych może być wynikiem rozpadu dużych cząstek zawartych w deszczu wskutek oddziaływania sił hydrodynamicznych w czasie kształtowania się spływu oraz przepływu wody w rynnach.

W tabeli 12 przedstawiono medianę, wartości minimalne i maksymalne oraz percentyl 10% i 90% zbiorów wyników badań objętości zawiesin w opadach deszczu, śniegu i spływach z dachów. Widać, że objętości zawiesin w śniegu i deszczach są porównywalne ze sobą. Najczęściej obserwowaną objętość zawiesin (mediana) w próbach deszczu określono na poziomie 0,102 cm^3/dm^3 , podczas gdy w śniegu wartość ta wyniosła 0,092 cm^3/dm^3 . Percentyl 90% dla prób deszczu wyniósł 0,25 cm^3/dm^3 , a dla śniegu 0,36 cm^3/dm^3 .

W spływach z dachów objętości zawiesin były znacznie większe w porównaniu do opadów deszczu i śniegu. Mediana objętości zawiesin w spływach z dachów wyniosła 0,225 cm^3/dm^3 a percentyl 90% 1,90 cm^3/dm^3 .

Tabela 12

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

Rodzaj próby	Objętość zawiesin w cm^3/dm^3				
	Mediana	Minimum	Maksimum	Percentyl 10%	Percentyl 90%
Opady deszczu	0,102	0,006	1,05	0,014	0,25
Opady śniegu	0,092	0,005	0,83	0,016	0,36
Spływy z dachów	0,225	0,011	4,41	0,054	1,90

8 Badania nad kolmatacją geowłóknin w czasie infiltracji wód powierzchniowych

8.1 Charakterystyka obiektu badawczego

Na terenie Zakładu Wodociągowego w Czyżkówku zlokalizowano stanowisko do badań nad wykorzystaniem geowłóknin dla ograniczenia kolmatacji gruntu przy infiltracji wód powierzchniowych z dużą ilością nanoplanktonu.

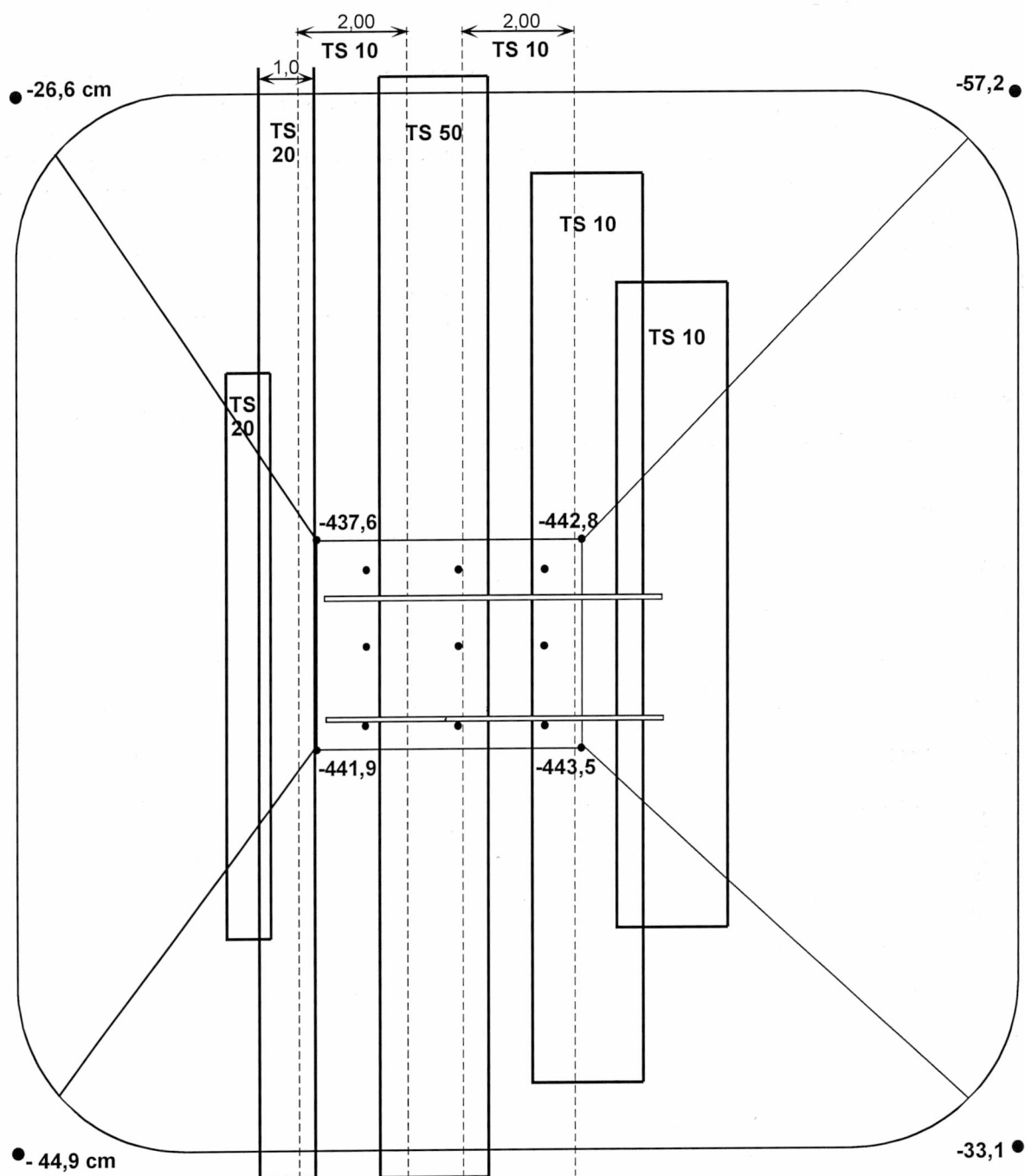
Stanowisko wykonane było w postaci wykopu o kształcie odwróconej ściętej pryzmy (rys. 41 i 42). Mniejsza podstawa pryzmy miała wymiary 4 x 5 m. Nachylenie skarp wynosiło od 1:1,5 do 1:2. Na dnie oraz częściowo na skarpach ułożono geowłókniny o różnej grubości (TS10 o grubości 1 mm, TS 20 o grubości 1,2 mm i TS 50 o grubości 1,9 mm) (rys. 42).

W dalszej części pracy, wykop w którym prowadzono badania będzie nazywany basenem infiltracyjnym lub rowem doświadczalnym.

Woda surowa pochodząca z rzeki Brdy doprowadzana była na dno basenu powierzchniowo za pomocą dwóch drenów przyłączonych poprzez wodomierz do rurociągu wody surowej.



Rys. 41. Widok stanowiska badawczego w Bydgoszczy



Rys. 42. Szkic stanowiska badawczego w Bydgoszczy wraz z planem rozmieszczenia geowłóknin różnego typu na dnie basenu infiltracyjnego (punkty opisane liczbami to rzędne terenu w odniesieniu do umownego repera o rzędnej 0,0; dane są podane w cm)

8.2 Metodyka przeprowadzonych badań

Przeprowadzono dwie serie badań. Pierwsza była prowadzona w dniach 22.04 – 5.05.2002. Basen doświadczalny zalewano dwukrotnie w ciągu doby za każdym razem około godziny z intensywnością zbliżoną do 30–35 m³/h. Druga seria była prowadzona w okresie 5.05.–02.09.2002. Obiekt doświadczalny zalewano dwukrotnie w ciągu doby po około godzinie z intensywnością zbliżoną do 50 m³/h. W dniach 3–4.09.2002 doświadczalny basen infiltracyjny osuszono. W dniu 5.09.2002 przeprowadzono zalewanie i odwodnienie rowu z dokładną kontrolą stanu wody w czasie badań. Po zakończeniu tych badań, pobrano próbki geowłókniny i gruntu do badań laboratoryjnych.

W trakcie prowadzenia badań napotkano na liczne trudności. Do najważniejszych należy zaliczyć:

- a) osuwanie się gruntu rodzimego na skarpach przez co następowały zmiany przekrojów wykopu. Wpływało to na wzrost błędu oszacowania objętości wody zgromadzonej w basenie infiltracyjnym w czasie jego zalewania;
- b) zmiany ciśnienia wody w rurociągu zasilającym powodowały, że natężenie dopływu wody nie było stałe w czasie;
- c) na stanowisku badawczym zamontowano limnigraf oraz łatę wodowskazową w celu pomiaru zmian wysokości zwierciadła wody w basenie infiltracyjnym. Przy dużych wahaniami zwierciadła wody dochodziło często do zawieszania się pływaka limnigrafu i błędnych zapisów na rejestratorze. Spowodowało to rezygnację z limnigrafu, a pomiaru poziomu zwierciadła wody dokonywano za pomocą łaty wodowskazowej jedynie po wyłączeniu zasilania basenu wodą surową;
- d) dużą odległość stanowiska badawczego od Wrocławia.

Przeprowadzenie badań było możliwe dzięki zaangażowaniu pracowników Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Bydgoszczy. Laboratorium tego przedsiębiorstwa wykonywało także badania składu wody surowej w rzece Brdzie. We Wrocławiu wykonano badania składu granulometrycznego wody surowej, składu granulometrycznego gruntu zalegającego na dnie basenu przed i po zakończeniu badań, składu chemicznego i granulometrycznego osadów, zdjęcia powierzchni próbek osadów, geowłóknin i gruntu pod geowłókniną z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego.

Na etapie budowy stanowiska doświadczalnego pobrano losowo 6 próbek gruntu z powierzchni dna basenu infiltracyjnego. Dla tych próbek wykonano analizę sitową oraz areometryczną według zasad metody Bouyoucosa w modyfikacji Prószyńskiego zgodnie z

metodyką opisaną w normie PN-R-04032:1998 *Gleby i utwory mineralne. Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego*. W próbkach gruntu oznaczono także zawartość węgla organicznego.

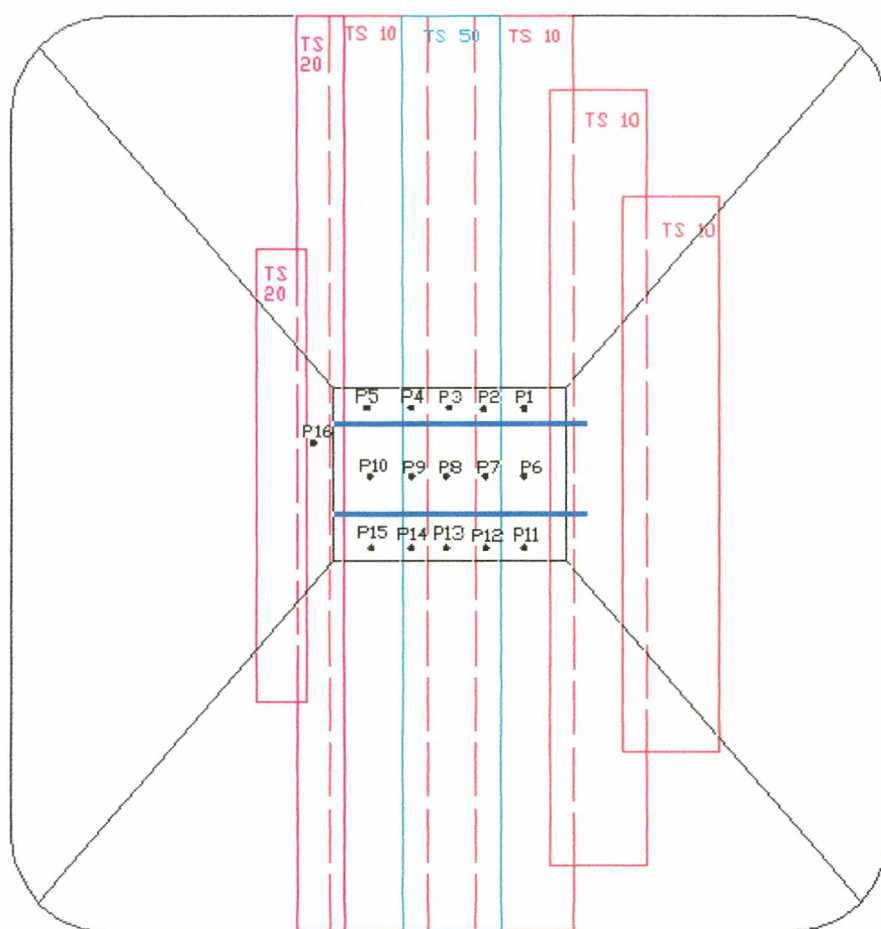
Na rysunku 43 przedstawiono basen doświadczalny po zakończeniu trzeciej serii badań. Z dna basenu pobrano próby osadów, geowłókniny i gruntu do badań laboratoryjnych (rys. 44). Lokalizację miejsc poboru prób przedstawiono na rysunku 45.



Rys. 43. Widok basenu infiltracyjnego po zakończeniu 2 serii badań



Rys. 44. Pobór próbek do badań laboratoryjnych



Rys. 45. Lokalizacja punktów poboru prób do badań laboratoryjnych

8.3 Wyniki badań

8.3.1 Skład wody surowej

W tabelach 13 i 14 przedstawiono podstawowe wskaźniki składu fizykochemicznego i biologicznego wody z Brdy.

Woda z rzeki Brdy charakteryzuje się specyficznym składem. Najważniejsze cechy tego składu to:

- niska mętność. Mętność wody z częstością występowania 99,9% jest mniejsza od 6 NTU;
- okresowy wzrost barwy wody do 40 mg Pt/dm³;
- podwyższona zawartość związków węgla, określanych pośrednio jako utlenialność wody zmieniająca się w przedziale 3 – 10 mg O₂/dm³;
- lekko alkaliczny odczyn wody, który zmienia się w przedziale 7,5 – 8,8 pH;
- stabilna twardość zmieniająca się w przedziale 155 – 180 mg CaCO₃/dm³;

- stabilna zasadowość wody zmieniająca się w przedziale 140 – 160 mg CaCO₃/dm³;
- okresowy sezonowy wzrost stężeń amoniaku (do 1,0 mg NH₄/dm³) i azotanów (do 15 mg NO₃/dm³);
- zły skład mikrobiologiczny;
- sezonowy wzrost liczby glonów wywołany zakwitami. Liczba komórek glonów w jednym litrze w czasie zakwitów przekracza 3 mln/dm³.

Tabela 13

Skład fizykochemiczny wody z rzeki Brdy (wybrane wskaźniki) w okresie prowadzenia badań w Bydgoszczy

Data pomiaru	Temperatura	Mętność	Barwa	Odczyn	Twardość
	°C	NTU	mg Pt/dm ³	pH	mg CaCO ₃ dm ³
25.04.2002	11,10	1,00	25	7,90	187
06.05.2002	15,70	1,00	25	8,20	188
09.05.2002	16,40	0,80	25	8,00	188
13.05.2002	18,30	1,40	20	7,90	177
16.05.2002	17,70	0,50	20	7,70	181
22.05.2002	18,20	0,90	20	8,10	175
23.05.2002	18,60	0,60	20	7,80	176
10.06.2002	18,60	0,60	17	7,80	174
13.06.2002	19,00	0,50	20	7,70	172
17.06.2002	19,20	0,50	20	7,80	179
27.06.2002	20,60	0,50	20	7,80	175
04.07.2002	19,70	1,10	20	7,70	175
08.07.2002	20,20	0,50	25	7,80	176
11.07.2002	22,50	0,50	20	7,80	174
17.07.2002	22,60	1,40	25	8,10	174
18.07.2002	22,20	0,80	20	7,80	174
22.07.2002	21,80	0,50	20	7,50	173
24.07.2002	22,00	0,60	20	7,80	177
25.07.2002	20,00	0,50	20	7,70	174
31.07.2002	21,80	0,50	20	7,60	171
01.08.2002	22,50	0,70	20	7,90	170
05.08.2002	22,60	1,50	25	7,70	168
07.08.2002	22,30	1,90	25	7,90	161
08.08.2002	21,80	1,60	30	7,94	164
12.08.2002	22,50	0,80	25	7,70	166
22.08.2002	21,90	1,30	25	7,70	165
05.09.2002	21,00	0,70	20	7,70	164

Tabela 14

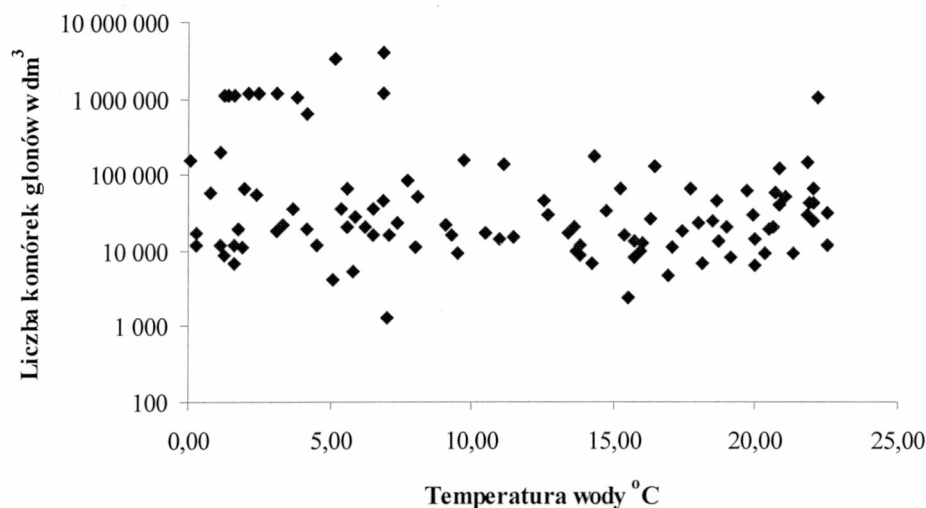
Skład biologiczny wody z rzeki Brdy w okresie prowadzenia badań w Bydgoszczy

Data pomiaru	Bakterie mezofilne oznaczane w temperaturze 37°C i inkubowane przez 24 h	Bakteria psychrofilne w temperaturze 22°C i inkubowane przez 72 h	NPL bakterii Coli	Ogólna liczba komórek glonów	Liczba okrzemek	Liczba sinicc
	komórek/cm ³			komórek/dm ³		
25.04.2002				139 260	126 720,0	660,0
06.05.2002	29	1000	15			
09.05.2002				128 040	122 100,0	0,0
13.05.2002	36	690	23			
16.05.2002				64 020	47 520,0	0,0
22.05.2002	17	350	43			
23.05.2002				46 860	25 080,0	0,0
10.06.2002	82	1300	15			
13.06.2002				20 000	17 000,0	0,0
17.06.2002	30	1200	20			
27.06.2002				20 500	8 400,0	200,0
04.07.2002				60 800	43 600,0	0,0
08.07.2002	108	2800	43			
11.07.2002				12 000	9 500,0	600,0
17.07.2002	148	2800	11			
18.07.2002				1 011 900	988 700,0	2 000,0
22.07.2002	185	2100	9	29 040	13 860	660,0
24.07.2002	170	2000	23			
25.07.2002				13 860	1 320,0	0,0
31.07.2002	188	2400	9			
01.08.2002				31 800	20 500,0	1 300,0
05.08.2002	300	3900	9			
07.08.2002	450	6200	23			
08.08.2002				143 400	106 300,0	30 400,0
12.08.2002	298		23			
22.08.2002				44 220	9 240,0	21 120,0
05.09.2002				52 800	27 720,0	5 280,0

Na rzece Brdzie pojawiają się krótkotrwałe silne zakwity, głównie okrzemek. Są to zakwity wiosenne. Na rysunku 46 przedstawiono zależność pomiędzy liczbą glonów w wodzie a jej temperaturą opracowaną na podstawie badań wykonanych w latach 1990–2002. Przy niskich temperaturach wody obserwuje się maksymalne liczebności glonów. W okresie letnim obserwuje się krótkotrwałe, kilkudniowe stany dużej liczebności glonów, co nie jest związane tylko z eutrofizacją Zbiornika Koronowskiego i innych akwenów zlokalizowanych w zlewni rzeki Brdy powyżej ujęcia w Czyżkówku, ale także z eksploatacją elektrowni wodnych na tej rzece i okresowym spuszczeniem zwiększonej ilości wody ze zbiorników górnych. W okresach

tych dochodzi do porywania glonów z zastoisk wodnych powstających w strefach przybrzeżnych.

Szczątkowa mętność wody oraz brak zawiesin łatwo sedimentujących umożliwiły poznanie skuteczności usuwania nanoplanktonu, głównie okrzemek, na geowłókninach. Wyniki badań składu granulometrycznego wody z rzeki Brdy będą szerzej omówione w rozdziale 8.3.3.



Rys. 46. Zależność pomiędzy liczbą glonów w wodzie rzeki Brdy a jej temperaturą

8.3.2 Zmiany skumulowanej infiltracji wody do gruntu i oporu hydraulicznego warstwy zakolmatowanej

Stopień zakolmatowania geowłókniny oraz gruntu w czasie badań określono pośrednio poprzez skumulowaną infiltrację wody do gruntu $I(t)$. Wartość $I(t)$ wyliczono z zależności:

$$I(t) = Q(t) - V(t) \quad (60)$$

gdzie:

$Q(t)$ – ilość wody dopływającej do obiektu doświadczalnego, m^3/h ;

$V(t)$ – ilość wody znajdującej się w obiekcie doświadczalnym po godzinie zalewania, m^3/h .

Wartość $V(t)$ wyliczono na podstawie wzoru na objętość pryzmy o wysokości h (wysokości wody), wymiarów podstawy dna obiektu doświadczalnego a i b oraz podstawy górnej a_1 , b_1 wyliczonych z nachylenia skarp oraz wysokości wody h :

$$V(t) = \frac{1}{6} h [(2a + a_1) \cdot b + (a + 2a_1) \cdot b_1] \quad (61)$$

Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tabelach 15–18.

Najszybszy spadek skumulowanej infiltracji wody zaobserwowano w połowie lipca. Było to związane z rozwojem glonów osiadłych na powierzchni dna basenu infiltracyjnego. W dniach 15–18.07.2002 pojawił się krótkotrwały zakwit. Liczba glonów w rzece Brdzie przekroczyła 1 500 000 komórek/dm³.

W ostatnim okresie badań nie dochodziło do całkowitego opróżniania basenu infiltracyjnego przed kolejnym wprowadzeniem wody surowej.

W okresie od 23.04.2002 do 3.09.2002 do basenu infiltracyjnego wprowadzono 12471 m³ wody z rzeki Brdy.

Tabela 15

Zestawienie wyników badań 1 serii

Data pomiaru	Godzina		Czas trwania zalewania minuty	Ilość wody doprowadzonej do basenu m ³	Maksymalny poziom spiętrzenia cm	Skumulowana infiltracja wody do gruntu m ³
	rozpoczęcia zalewania	zakończenia zalewania				
25.04.02	8 ¹⁰	9 ²⁰	70	33,44	23,00	27,93
25.04.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	43,13	18,00	38,98
26.04.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	33,84	23,00	28,33
26.04.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁰	55	30,32	22,00	25,09
27.04.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	29,87	23,00	24,36
27.04.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	31,39	23,00	25,88
28.04.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	30,61	23,00	25,10
28.04.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	32,26	23,00	26,75
29.04.02	7 ⁵⁵	8 ⁵⁵	60	33,84	23,00	28,33
29.04.02	18 ¹⁰	19 ⁰⁰	50	32,6	25,00	26,52
30.04.02	7 ⁵⁵	9 ⁰⁰	65	31,79	23,00	26,28
30.04.02	18 ¹⁵	19 ⁰⁰	45	32,36	23,00	26,85
1.05.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁰	55	32,88	23,00	27,37
1.05.02	18 ²⁰	19 ⁰⁰	40	32,53	23,00	27,02
2.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	32,00	22,00	26,77
2.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	34,17	19,00	29,75
3.05.02	7 ⁵⁵	8 ⁵⁵	60	33,22	23,00	27,71
3.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	34,85	23,00	29,34
4.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	31,12	10,00	28,95
4.05.02	16 ²⁰	17 ²⁵	60	39,5	23,00	33,99
5.05.02	7 ⁵⁵	8 ⁵⁵	60	31,23	16,00	27,60

Tabela 16

Zestawienie wyników 2 serii badań z okresu od 5.02–30.07.2002

Data pomiaru	Godzina		Czas trwania zalewania minuty	Ilość wody doprowadzonej do basenu m ³	Maksymalny poziom spiętrzenia cm	Skumulowana infiltracja wody do gruntu m ³
	rozpoczęcia zalewania	zakończenia zalewania				
1	2	3	4	5	6	7
5.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	45,18	14,00	42,05
6.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,12	51,00	36,12
7.05.02	7 ⁵⁵	8 ⁵⁵	60	50,04	35,00	40,86
7.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,86	50,00	38,26
8.05.02	7 ⁵⁵	8 ⁵⁵	60	50,25	45,00	37,56
8.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,32	50,00	36,72
9.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,34	44,00	38,02
9.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,71	49,00	35,50
10.05.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	51,91	42,00	40,32
10.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,12	45,00	38,43
11.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,91	42,00	39,32
11.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	48,6	41,00	37,37
12.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	41,27	34,00	32,42
12.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,03	40,00	41,15
13.05.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	53,28	45,00	40,59
13.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	58,51	49,00	44,30
14.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,7	40,00	38,82
14.05.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	50,46	50,00	35,86
15.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	47,85	50,00	33,25
15.05.02	18 ⁰⁵	19 ¹⁰	65	53,68	50,00	39,08
16.05.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	52,5	48,00	38,68
16.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	48,97	44,00	36,65
17.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,67	46,00	38,61
17.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,72	45,00	37,03
18.05.02	8 ²⁵	9 ²⁵	60	47,28	50,00	32,68
18.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	48,08	44,00	35,76
19.05.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	48,32	46,00	35,26
19.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,14	44,00	36,82
20.05.02	8 ¹⁵	9 ¹⁵	60	50,99	52,00	35,59
20.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	48,49	50,00	33,89
21.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,55	52,00	35,15
21.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	47,05	45,00	34,36
22.05.02	8 ⁰⁰	9 ¹⁰	70	51,75	53,00	35,94
22.05.02	17 ⁵⁵	18 ⁵⁵	60	48,8	48,00	34,98
23.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,11	53,00	35,30
24.05.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	51,59	50,00	36,99
24.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,45	50,00	34,85
25.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,28	51,00	36,28
26.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,05	50,00	35,45
26.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,3	54,00	35,08

Tabela 16 cd.

1	2	3	4	5	6	7
27.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,13	50,00	35,53
27.05.02	15 ⁵⁰	16 ⁰⁰	10	9,04	20,00	4,35
27.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,39	51,00	34,39
28.05.02	8 ⁴⁰	9 ⁴⁴	64	53,38	52,00	37,98
28.05.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	50,32	54,00	34,10
29.05.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	50,74	51,00	35,74
29.05.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,98	55,00	33,34
30.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,09	55,00	34,45
30.05.02	18 ⁰³	19 ¹⁵	72	50,11	45,00	37,42
31.05.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,22	48,00	36,40
31.05.02	18 ¹⁰	19 ¹⁵	65	51,88	50,00	37,28
1.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	52	49,00	37,79
1.06.02	18 ⁰⁹	19 ⁰⁹	60	50,01	50,00	35,41
2.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	54,61	45,00	41,92
2.06.02	18 ⁰⁵	19 ¹⁰	65	50,08	45,00	37,39
3.06.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	54,78	52,00	39,38
3.06.02	18 ⁰⁶	19 ⁰⁶	60	50,11	50,00	35,51
4.06.02	8 ¹⁰	9 ¹⁵	65	62,2	53,00	46,39
4.06.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	50,06	50,00	35,46
5.06.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	43,13	50,00	28,53
5.06.02	18 ¹⁵	19 ⁰⁰	45	50,38	48,00	36,56
6.06.02	8 ²⁰	10 ⁰⁰	100	111,07	55,00	94,43
6.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,52	50,00	37,92
7.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	53,68	55,00	37,04
7.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,28	50,00	36,68
8.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	50,88	55,00	34,24
8.06.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	51,77	55,00	35,13
9.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49	50,00	34,40
9.06.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	49,99	52,00	34,59
10.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,46	48,00	35,64
10.06.02	18 ²⁵	19 ²⁵	60	52,05	52,00	36,65
11.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,25	50,00	35,65
11.06.02	18 ⁰⁵	19 ²⁰	75	64,78	52,00	49,38
12.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	51,21	50,00	36,61
12.06.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	49	52,00	33,60
13.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,08	50,00	35,48
13.06.02	19 ⁰⁰	20 ⁰⁰	60	51,74	51,00	36,74
14.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	46,65	50,00	32,05
14.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	47,49	50,00	32,89
15.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	48,01	56,00	30,95
15.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,06	55,00	32,42

Tabela 16 cd.

1	2	3	4	5	6	7
16.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,4	56,00	32,34
16.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	47,01	52,00	31,61
17.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	52,47	57,00	34,99
17.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	55,25	50,00	40,65
18.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,75	55,00	35,11
18.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,63	40,00	41,75
19.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,37	56,00	32,31
19.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,12	50,00	35,52
20.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,7	55,00	35,06
20.06.02	17 ⁵⁵	18 ⁵⁵	60	51,32	50,00	36,72
21.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,75	55,00	35,11
21.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,82	52,00	34,42
22.06.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	49,98	50,00	35,38
22.06.02	17 ⁵⁵	18 ⁵⁵	60	54,6	55,00	37,96
23.06.02	8 ⁰⁶	9 ⁰⁶	60	49,9	55,00	33,26
23.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,23	52,00	33,83
24.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,08	54,00	33,86
24.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,62	50,00	36,02
25.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,93	50,00	35,33
25.06.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	52,51	52,00	37,11
26.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,06	55,00	34,42
26.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	53,27	50,00	38,67
27.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	50,2	52,00	34,80
27.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,05	58,00	33,14
28.06.02	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	50,01	59,00	31,66
28.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	49,94	60,00	31,16
29.06.02	7 ³⁰	8 ³⁰	60	49,38	59,00	31,03
29.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,72	58,00	32,81
30.06.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	47,87	65,00	26,82
30.06.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	54,24	69,00	31,29
1.07.02	8 ²⁰	9 ²⁰	60	52,4	65,00	31,35
1.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,75	73,00	27,81
2.07.02	10 ⁰⁵	11 ⁰⁵	60	51,77	65,00	30,72
2.07.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	50,77	73,00	25,83
3.07.02	8 ¹⁵	9 ¹⁵	60	53,56	63,00	33,43
3.07.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	50,39	63,00	30,26
4.07.02	8 ²⁰	9 ²⁰	60	50,74	58,00	32,83
4.07.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	49,74	65,00	28,69
5.07.02	8 ⁰⁵	9 ¹⁰	65	57,24	60,00	38,46
5.07.02	18 ¹⁵	19 ²⁰	65	49,46	60,00	30,68
6.07.02	8 ³⁵	9 ³⁵	60	55,28	60,00	36,50
6.07.02	18 ¹⁵	19 ¹⁰	55	50,72	60,00	31,94
7.07.02	7 ⁴⁰	8 ⁴⁰	60	49,81	60,00	31,03
7.07.02	18 ¹⁰	19 ²⁰	70	50,32	58,00	32,41
8.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	52,38	60,00	33,60

Tabela 16 cd.

1	2	3	4	5	6	7
8.07.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	50,15	60,00	31,37
9.07.02	7 ⁵⁰	8 ⁵⁰	60	51,73	60,00	32,95
9.07.02	18 ³⁰	19 ⁴⁰	70	52,95	65,00	31,90
10.07.02	7 ⁵⁵	8 ⁵⁵	60	46,72	65,00	25,67
10.07.02	18 ¹⁵	19 ¹⁵	60	51,28	65,00	30,23
11.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,83	65,00	30,78
11.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁵	65	56,82	68,00	34,35
12.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	46,97	60,00	28,19
12.07.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	49,4	60,00	30,62
13.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,95	60,00	31,17
13.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,66	60,00	33,88
14.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	52,24	60,00	33,46
14.07.02	18 ¹⁰	19 ¹⁰	60	48,77	60,00	29,99
15.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	52,12	64,00	31,53
15.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,74	64,00	32,15
16.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,4	80,00	22,79
16.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁵	65	57,08	70,00	33,64
17.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	45,75	86,00	13,79
17.07.02	18 ²⁰	19 ²⁰	60	50,6	86,00	18,64
18.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,88	84,00	19,06
18.07.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	46,26	81,00	17,11
19.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	46	82,00	16,30
19.07.02	17 ¹⁵	18 ¹⁵	60	51,19	82,00	21,49
20.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,77	89,00	18,06
20.07.02	17 ⁰⁵	18 ⁰⁵	60	48,58	80,00	19,97
21.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,83	83,00	19,57
21.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,44	82,00	20,74
22.07.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	50,11	85,00	18,72
22.07.02	18 ³⁰	19 ³⁰	60	43,24	88,00	10,12
23.07.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	49,95	86,00	17,99
23.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,7	85,00	21,31
24.07.02	7 ⁴⁰	8 ⁴⁰	60	50,19	88,00	17,07
24.07.02	17 ⁵⁵	18 ⁵⁵	60	54,34	87,00	21,81
25.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	52,06	88,00	18,94
25.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	47	88,00	13,88
26.07.02	9 ¹⁰	10 ¹⁰	60	50	89,00	16,29
26.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	53,76	90,00	19,46
27.07.02	8 ⁰⁴	9 ⁰⁴	60	49,95	88,00	16,83
27.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,51	88,00	17,39
28.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,01	89,00	16,30
28.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,57	88,00	17,45
29.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,98	86,00	18,02
29.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	51,12	90,00	16,82
30.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,36	88,00	18,24
30.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	52,99	90,00	18,69

Tabela 17

Zestawienie wyników 2 serii badań z okresu 31.07-13.08.2002

Data pomiaru	Godzina		Czas trwania zalewania minuty	Przedział czasu opadania wody	Czas trwania opadania wody minuty	Ilość wody doprowadzonej do basenu m ³	Maksymalny poziom spiętrzenia cm	Skumulowana infiltracja wody do gruntu w czasie zalewania m ³
	rozpoczęcia zalewania	zakończenia zalewania						
31.07.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	9 ⁰⁰ – 11 ⁵⁵	175	50,27	88	17,15
31.07.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 24 ⁰⁰	300	52,73	92	17,23
1.08.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	9 ⁰⁰ – 13 ³⁰	270	49,81	85	18,42
1.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 00 ¹⁵	315	49,37	84	18,55
2.08.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	9 ⁰⁰ – 16 ⁰⁰	420	49,87	88	16,75
2.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 24 ⁰⁰	300	50,08	95	12,73
3.08.02	9 ¹⁵	10 ¹⁵	60	10 ¹⁵ – 18 ⁰⁰	465	50,53	80	21,92
3.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 00 ³⁰	330	48,67	92	13,17
4.08.02	9 ¹⁵	10 ¹⁵	60	10 ¹⁵ – 18 ⁰⁰	465	49,30	90	15,00
4.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 24 ⁰⁰	300	49,06	92	13,56
5.08.02	8 ²⁵	9 ²⁵	60	9 ²⁵ – 17 ³⁰	485	49,88	92	14,38
5.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 1 ⁰⁰	360	59,29	97	20,67
6.08.02	7 ³⁰	8 ³⁰	60	8 ³⁰ – 18 ⁰⁰	570	52,21	95	14,86
6.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 1 ⁰⁰	360	48,68	99	8,78
7.08.02	9 ⁰⁵	10 ⁰⁵	60	10 ⁰⁵ – 18 ⁰⁰	475	48,39	98	9,14
7.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 1 ³⁰	390	58,66	100	18,11
8.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 2 ⁰⁰	420	49,99	102	8,12
9.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	19 ⁰⁰ – 2 ²⁰	440	50,02	100	9,47
10.08.02	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	9 ⁰⁰ – 18 ⁰⁰	540	49,17	100	8,62
10.08.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	19 ⁰⁰ – 2 ³⁰	450	50,10	102	8,23
11.08.02	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	9 ¹⁰ – 18 ⁰⁰	530	49,9	103	7,36
11.08.02	18 ⁰⁵	19 ⁰⁵	60	19 ⁰⁰ – 2 ²⁵	445	50,06	100	9,51
12.08.02	18 ⁰⁰	19 ⁰⁵	65	19 ⁰⁵ – 2 ¹⁵	435	50,01	100	9,46
13.08.02	17 ⁵⁰	18 ⁵⁰	60	18 ⁵⁰ – 2 ¹⁰	440	50,02	105	6,13

Tabela 18

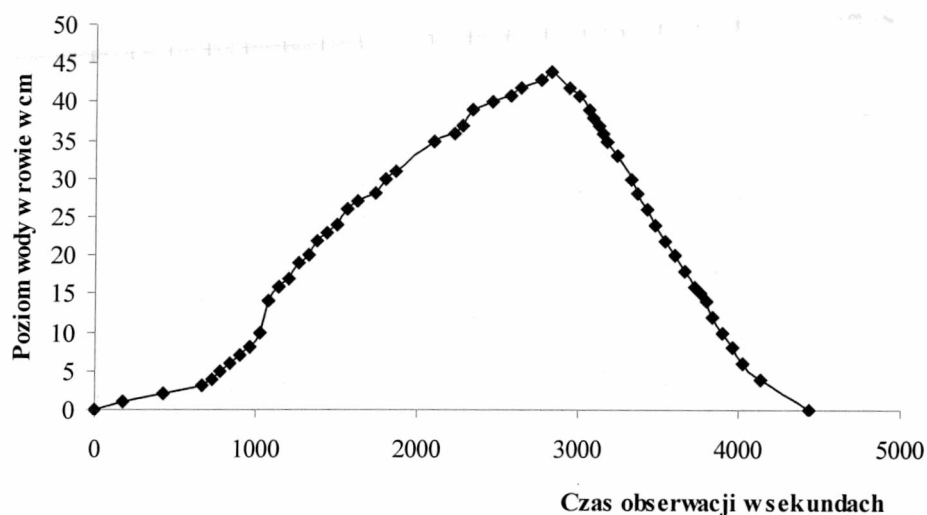
Zestawienie wyników 2 serii badań z okresu 14.08–3.09.2002

Data	Godzina		Czas trwania zalewania minuty	Ilość wody doprowadzonej do basenu m ³	Maksymalny poziom piętrzenia cm	Przedział czasu opadania wody	Poziom wody przed kolejnym zalaniem cm	Skumulowana infiltracja wody do gruntu w czasie zalewania m ³
	rozpoczęcia zalewania	zakończenia zalewania						
14.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	45,80	100,00	9 ⁰⁰ – 17 ⁵⁰	0	5,25
14.08.2002	17 ⁵⁵	18 ⁵⁵	60	50,05	100,00	18 ⁵⁵ – 2 ¹⁰	0	9,50
15.08.2002	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	57,25	100,00	9 ⁰⁵ – 18 ⁰⁰	0	16,70
15.08.2002	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	57,20	110,00	19 ⁰⁰ – 2 ¹⁵	0	9,82
16.08.2002	9 ⁵⁰	10 ⁵⁰	60	47,83	110,00	10 ⁵⁰ – 17 ²⁵	0	0,45
16.08.2002	17 ²⁵	18 ²⁵	60	47,83	110,00	18 ²⁵ – 2 ³⁰	0	0,45
17.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	48,62	110,00	9 ⁰⁰ – 18 ⁰⁰	0	1,24
17.08.2002	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	48,86	110,00	19 ⁰⁰ – 2 ²⁰	0	1,48
18.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	41,01	110,00	9 ⁰⁰ – 18 ³⁰	10	1,05
18.08.2002	18 ³⁰	19 ³⁰	60	49,70	110,00	19 ³⁰ – 3 ⁰⁰	0	2,32
19.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	47,76	110,00	9 ⁰⁰ – 18 ⁰⁰	7	1,86
19.08.2002	18 ⁰⁰	19 ⁰⁰	60	50,77	110,00	19 ⁰⁰ – 8 ⁰⁰	8	5,10
20.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	43,12	110,00	9 ⁰⁰ – 19 ⁰⁰	8	2,00
20.08.2002	19 ⁰⁰	20 ⁰⁰	60	49,91	110,00	20 ⁰⁰ – 8 ⁰⁰	10	4,70
21.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	48,05	110,00	9 ⁰⁰ – 17 ⁵⁰	10	2,84
21.08.2002	17 ⁵⁰	18 ⁵⁰	60	48,62	110,00	18 ⁵⁰ – 8 ⁰⁵	10	3,41
22.08.2002	8 ⁰⁵	9 ⁰⁵	60	47,78	110,00	9 ⁰⁵ – 18 ⁰⁰	10	2,57
22.08.2002	18 ⁰⁵	19 ⁰⁰	55	48,95	110,00	19 ⁰⁰ – 8 ⁰⁰	10	3,74
23.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	46,71	110,00	9 ⁰⁰ – 17 ⁰⁰	10	1,50
23.08.2002	17 ³³	18 ³³	60	59,47	110,00	18 ³³ – 8 ⁰⁰	7	13,57

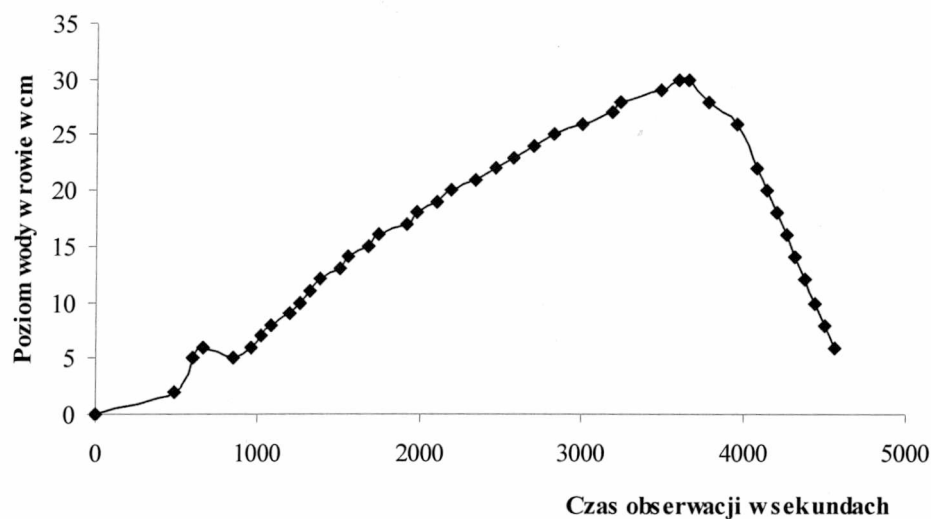
Tabela 18 cd

Data	Godzina		Czas trwania zalewania minuty	Ilość wody doprowadzonej do basenu m ³	Maksymalny poziom piętrzenia cm	Przedział czasu opadania wody	Poziom wody przed kolejnym zalaniem cm	Skumulowana infiltracja wody do gruntu w czasie zalewania m ³
	rozpoczęcia zalewania	zakończenia zalewania						
24.08.2002	8 ¹⁰	9 ¹⁰	60	40,53	110,00	9 ¹⁰ – 17 ⁰⁰	10	5,06
24.08.2002	17 ³⁰	18 ³³	63	50,01	110,00	18 ³³ – 8 ⁰⁰	7	4,11
25.08.2002	8 ¹⁵	9 ¹⁵	60	49,99	110,00	9 ¹⁵ – 17 ⁰⁰	10	4,78
25.08.2002	17 ²⁵	18 ²⁵	60	47,70	110,00	18 ²⁵ – 8 ⁰⁰	6	1,58
26.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,60	110,00	9 ⁰⁰ – 17 ⁰⁰	9	4,15
26.08.2002	17 ³⁰	18 ³⁰	60	47,91	110,00	18 ³⁰ – 8 ⁰⁰	7	2,01
27.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,00	110,00	9 ⁰⁰ – 17 ⁰⁰	8	4,33
27.08.2002	17 ³⁰	18 ³⁰	60	50,61	110,00	18 ³⁰ – 8 ⁰⁰	9	5,16
ZALEWANIE RAZ NA DOBĘ								
28.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	51,08	110,00	9 ⁰⁰ – 6 ³⁰	0	3,70
29.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,97	110,00	9 ⁰⁰ – 5 ⁰⁰	0	2,59
30.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,64	110,00	9 ⁰⁰ – 5 ³⁰	0	3,26
31.08.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,81	110,00	9 ⁰⁰ – 5 ³⁰	0	2,43
01.09.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,38	110,00	9 ⁰⁰ – 5 ⁰⁰	0	3,00
02.09.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	49,98	110,00	9 ⁰⁰ – 4 ⁵⁰	0	2,60
03.09.2002	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	60	50,10	100,00	9 ⁰⁰ – 4 ⁵⁰	0	9,55

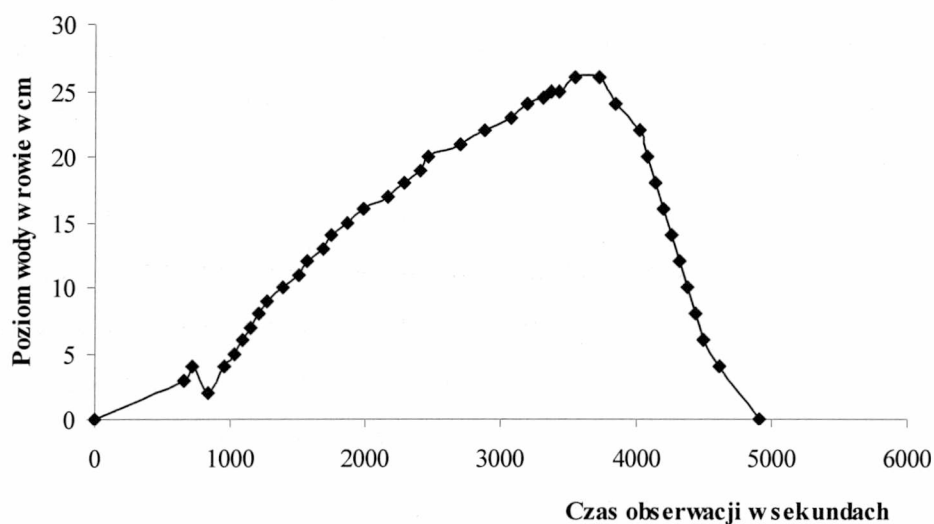
W pierwszych trzech dniach rozpoczęcia badań tj. 22 – 24.04.2002 przeprowadzono obserwacje podnoszenia się oraz opadania zwierciadła wody w basenie infiltracyjnym. Uzyskane dane zostały przedstawione na rysunkach 47 – 49.



Rys. 47. Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 22.04.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 36,00 m³)

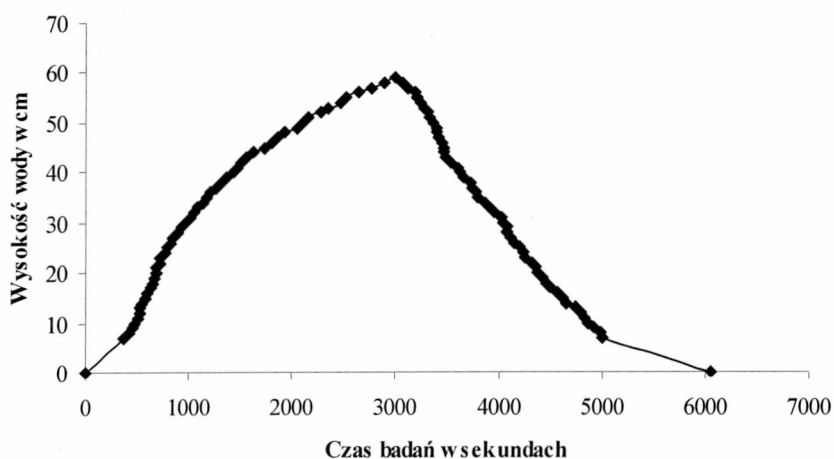


Rys. 48. Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 23.04.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła 39,23 m³)



Rys. 49. Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 24.04.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła $46,92 \text{ m}^3$)

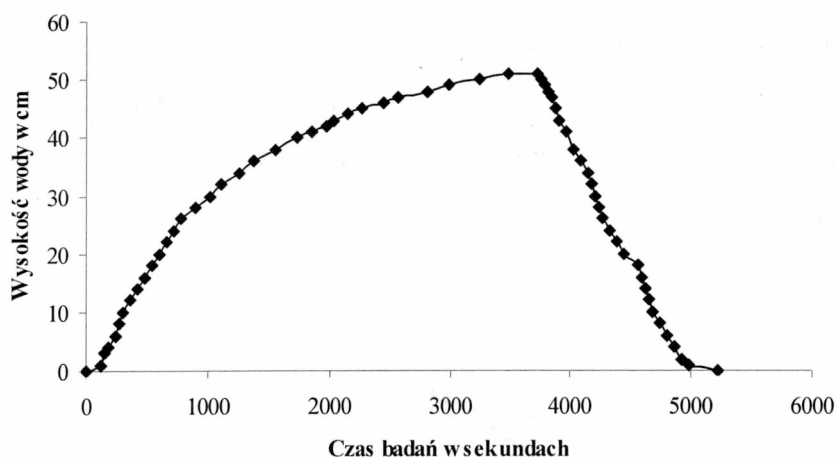
Rysunek 50 przedstawia zmiany zwierciadła wody w czasie zalewania i odwadniania się basenu infiltracyjnego obserwowane w dniu 5.09.2002 po zakończeniu drugiej serii badań i dwudniowym osuszeniu. Przy ilości wody podanej w ciągu godziny równej $42,22 \text{ m}^3$ skumulowana infiltracja wody do gruntu w czasie godzinowego zalewania wyniosła $23,88 \text{ m}^3$, podczas gdy przed osuszeniem w dniu 3.09.2002 przy ilości wody podanej w ciągu godziny równej $50,10 \text{ m}^3$ wartość tego wskaźnika wyniosła $9,55 \text{ m}^3$. Wartości skumulowanej infiltracji wody do gruntu w czasie godzinowego zalewania rzędu $20 - 30 \text{ m}^3$ były obserwowane w połowie lipca.



Rys. 50. Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 5.09.2002 (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła $42,22 \text{ m}^3$)

Osuszenie basenu przywróciło zdolności infiltracyjne gruntu. Zjawisko to można wytłumaczyć niszczeniem struktury warstwy osadów, w której przeważają układy koloidalne. Osuszenie zwiększa porowatość osadów i strefy zakolmatowanej, co wpływa na zwiększenie wartości współczynnika filtracji. Tym zjawiskiem można tłumaczyć również dużą zmienność skumulowanej infiltracji wody do gruntu w czasie godzinnego zalewania przy podobnych warunkach zasilania w okresie od maja do lipca. Skrócenie czasu przesuszania warstwy osadów i strefy zakolmatowanej, jakie nastąpiło w sierpniu wskutek uszczelnienia się dna basenu, skutkowało szybkim spadkiem wartości skumulowanej infiltracji wody do gruntu w czasie godzinnego zalewania (tabele 17 i 18). Doświadczenie to tłumaczy sens stosowania powierzchniowych metod infiltracji wód opadowych porośniętych roślinnością z okresowym przesuszaniem profilu glebowego.

Na rysunku 51 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych po usunięciu geowłóknin. Przy godzinowym dopływie wody do rowu $52,17 \text{ m}^3$ skumulowana infiltracja do gruntu w czasie godzinnego zalewania wyniosła $37,17 \text{ m}^3$ i była porównywalna z wartościami uzyskiwanymi na początku maja. Usunięcie geowłókniny z warstwą osadów spowodowało odtworzenie zdolności infiltracyjnych gruntu.



Rys. 51. Obserwacje zmian poziomu wody w czasie zalewania i opróżniania basenu infiltracyjnego wykonane w dniu 6.09.2002 po zdjęciu geowłóknin (ilość wody doprowadzonej do basenu w ciągu godziny wyniosła $52,17 \text{ m}^3$)

Wyniki obserwacji zmian zwierciadła wody w czasie wsiąkania poczynione w kwietniu i wrześniu zostały wykorzystane do sprawdzenia poprawności modelu opisanego równaniem (58). Estymacji parametrów modelu dokonano z wykorzystaniem programu STATISTICA 6.0 PL. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 19.

Dla wszystkich obserwacji uzyskano związki istotne statystycznie. Na początku eksperymentu zastępczy opór hydrauliczny wyniósł 10-16,1 minuty, a po osuszeniu basenu wzrósł do 22,1 minuty. Po zdjęciu geowłóknin, wynikający z równania (58) zastępczy opór hydrauliczny był porównywalny z wartościami na początku badań i wyniósł 12,5 minuty.

Tabela 19

Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym zlokalizowanym w Bydgoszczy wg równania (58)

Data pomiaru	Równanie opisujące zmiany zwierciadła wody w czasie opróżniania basenu	Współczynnik determinacji R^2	Zastępczy opór hydrauliczny
22.04.02	$H=44,0 \cdot \exp(-t/(16,1064))$	0,899	16,1
23.04.02	$H=15,5 \cdot \exp(-t/(10,0203))$	0,908	10,0
24.04.02	$H=26,0 \cdot \exp(-t/(13,0601))$	0,852	13,1
05.09.02	$H=58,0 \cdot \exp(-t/(22,0546))$	0,964	22,1
06.09.02 b.g	$H=51,0 \cdot \exp(-t/(12,4881))$	0,943	12,5

b.g - stanowisko po zdjęciu geowłóknin

8.3.3 Badania składu granulometrycznego gruntu i osadów

W tabeli 20 przedstawiono skład granulometryczny i zawartość węgla organicznego gruntu pobranego z dna basenu infiltracyjnego przed rozpoczęciem badań, a w tabeli 21 po zdjęciu z dna geowłóknin.

Tabela 20

Wyniki badań granulometrycznych gruntu pobranego na etapie budowy stanowiska badawczego w Bydgoszczy wykonanych metodą sitową i aerometryczną

Numer próbki	Udział procentowy		Procentowa zawartość frakcji o danej średnicy w częściach ziarnistych w mm							Zawartość węgla organicznego mg/kg
	≥ 1.0 mm (szkieletowe)	< 1.0 mm (ziemiste)	1.0 - 0.5	0.5 - 0.25	0.25 - 0.1	0.1 - 0.05	0.05 - 0.02	0.02 - 0.002	< 0.002	
1	2,5	97,5	29,2	59,0	8,7	0,3	0,3	0	0	20
2	1,8	98,2	33,5	58,9	3,9	0,9	0,5	0,5	0	10
3	2,2	97,8	39,8	51,8	3,7	1,5	0,5	0,5	0	5
4	2,2	97,8	43,3	45,6	5,5	2,0	0,6	0,4	0	60
5	0,9	99,1	39,1	58,1	1,4	0	0,5	0	0	10
6	1,4	98,6	30,6	63,0	4,5	0,5	0	0	0	20

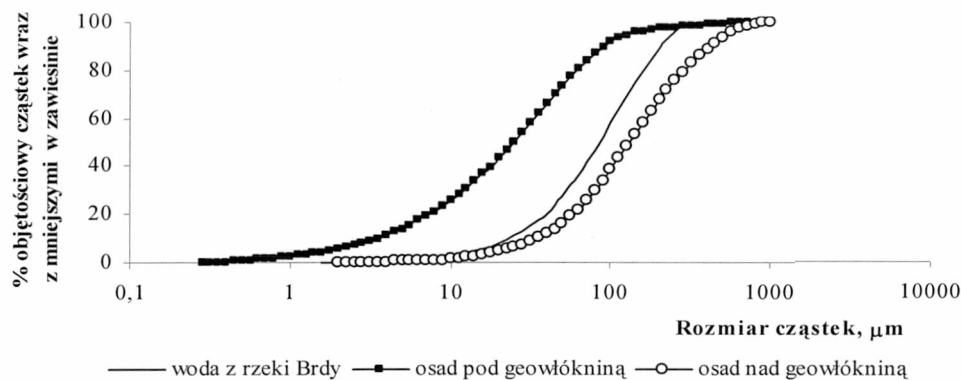
Tabela 21

Wyniki badań składu granulometrycznego gruntu pobranego w dniu 6.09.2002 po zdjęciu geowłóknin wykonanych metodą sitową i aerometryczną

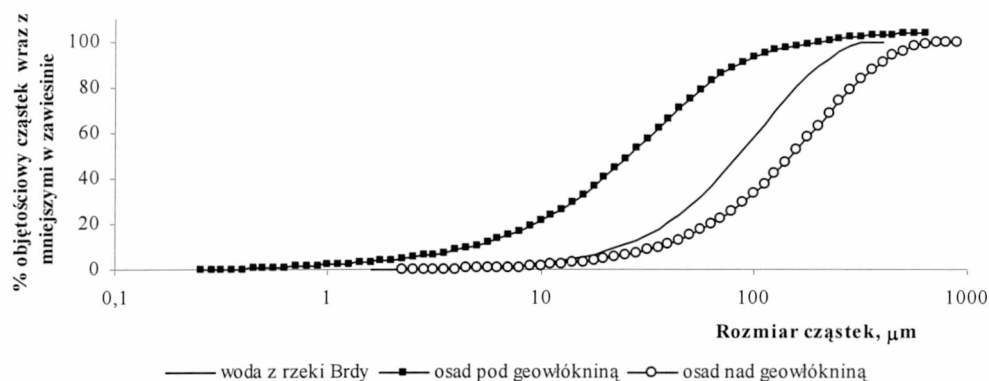
Numer próbki	Udział procentowy		Procentowa zawartość frakcji o danej średnicy w częściach ziarnistych w mm							Zawartość węgla organicznego mg/kg
	>1.0 mm (szkieletowe)	<1.0 mm (ziemiste)	1.0 - 0.5	0.5 - 0.25	0.25 - 0.1	0.1 - 0.05	0.05 - 0.02	0.02 - 0.002	<0.002	
P1	2,0	98,0	31,2	62,0	4,8	0,5	0,5	0,5	0,5	230
P2	1,6	98,4	21,5	68,9	7,6	0,5	0	1,0	0,5	230
P3	1,2	98,8	44,8	53,5	0,7	0	0	1,0	0	230
P4	3,2	96,8	33,3	64,7	0,5	0	0	1,5	0	180
P5	1,2	98,8	29,1	67,2	2,7	0	0	0	1,0	130
P6	0,4	99,6	28,1	67,0	3,5	0,5	0	0,5	0,5	80
P7	0,4	99,6	31,8	65,8	1,4	0	0	0	1,0	160
P8	2,8	97,2	40,9	56,1	1,5	0,5	0	1,0	0	160
P9	0,9	99,1	36,6	58,9	3,5	0	0,5	0	0,5	90
P10	5,6	94,4	30,6	65,8	2,6	0	0	0	1,0	260
P11	4,2	95,8	37,7	58,2	2,1	0	1	0,5	0,5	230
P12	2,0	98,0	32,5	61,5	5,0	0	0,5	0	0,5	230
P13	2,8	97,2	29,3	67,9	2,3	0	0	0	0,5	150
P14	1,2	98,8	15,6	81,7	1,7	0	0,5	0	0,5	90
P15	0,02	99,8	26,7	71,1	1,7	0	0	0	0,5	130

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że na dnie basenu infiltracyjnego zalegały piaski drobno- i średnioziarniste z pomijalną zawartością części spławialnych. W próbach pobranych z dna basenu bezpośrednio po jego wykonaniu stwierdzono znikomą zawartość węgla organicznego. Po czteromiesięcznym okresie eksploatacji basenu zawartość węgla organicznego kształtowała się na poziomie od 80–230 mg/kg. Przyrost zawartości węgla organicznego w gruncie świadczył o wnikanii materii organicznej do strefy poddennej gruntu. Ilość węgla organicznego w próbkach gruntu nie zależała od odległości wlotu wody do gruntu ani od grubości geowłókniny.

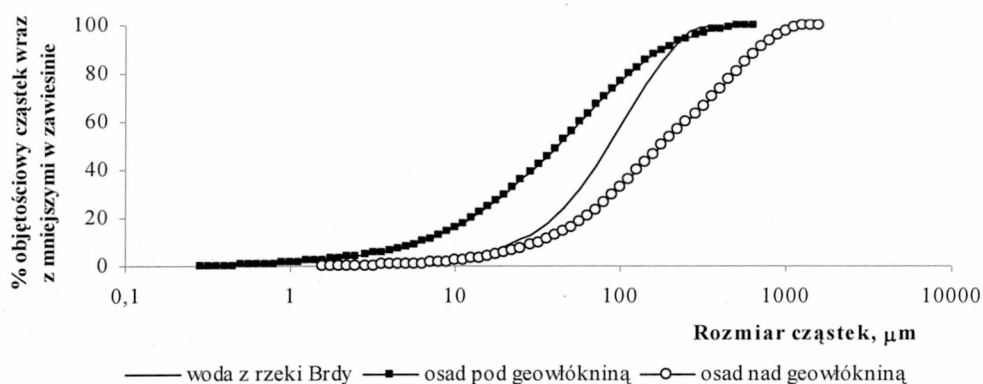
Na rysunkach 52–55 przedstawiono porównanie składu granulometrycznego zawiesin w wodzie z rzeki Brdy oraz osadów zakumulowanych na geowłókninie, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią w wybranych próbach kontrolnych. Cechą charakterystyczną jest to, że na osadach znajdowały się cząstki o wymiarach większych od występujących w rzece Brdzie, natomiast pod geowłókniną były to cząstki znacznie mniejsze. Ilość zawiesin zgromadzonych pod geowłókninami była niewielka (tab. 22). Okładanie się zawiesin na geowłókninach i w ich przestrzeniach strukturalnych potwierdziły wykonane zdjęcia skaningowe (rys. 56–62).



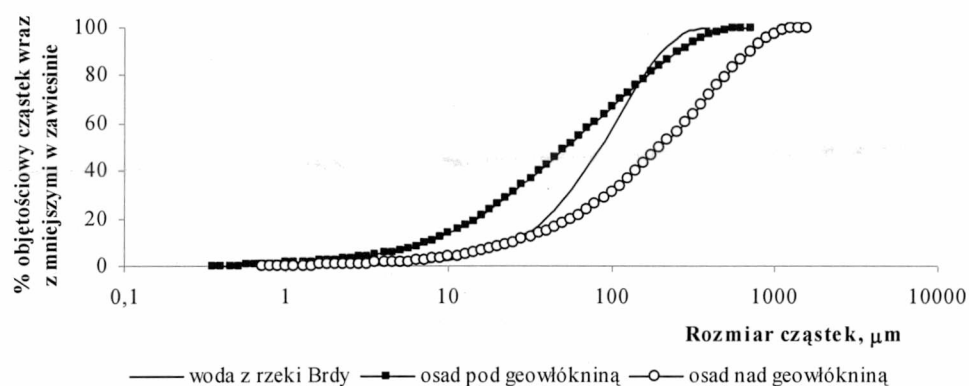
Rys. 52. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 10 pobranych w punkcie P6



Rys. 53. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 10 pobranych w punkcie P15



Rys. 54. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 50 pobranych w punkcie P8

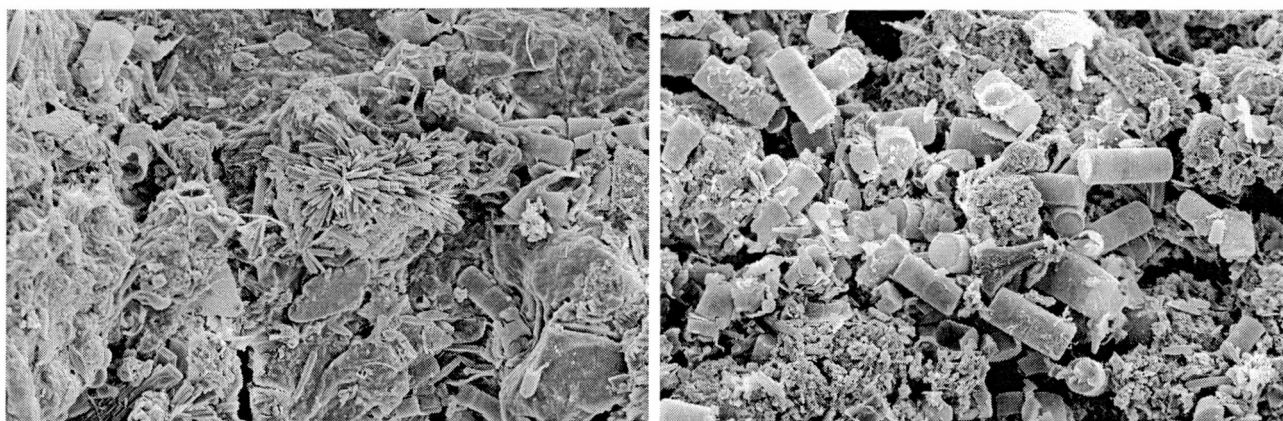


Rys. 55. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w wodzie z rzeki Brdy oraz w osadach nad i pod geowłókniną TS 50 pobranych w punkcie P3

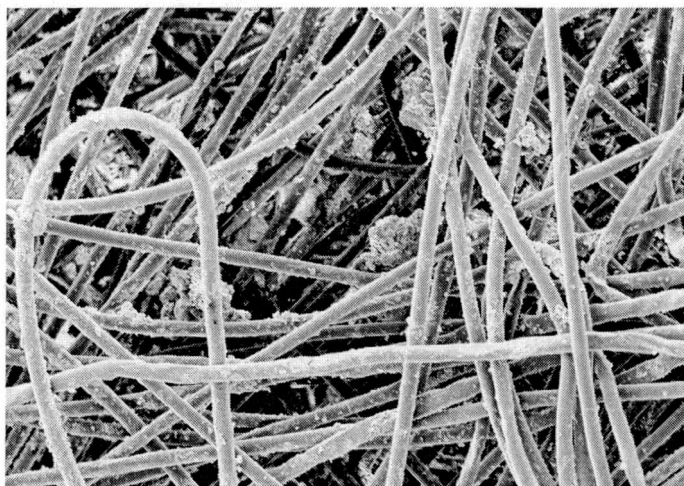
Tabela 22

Ilość zawieszin w przeliczeniu na kilogram suchej masy w próbach z wybranych punktów kontrolnych

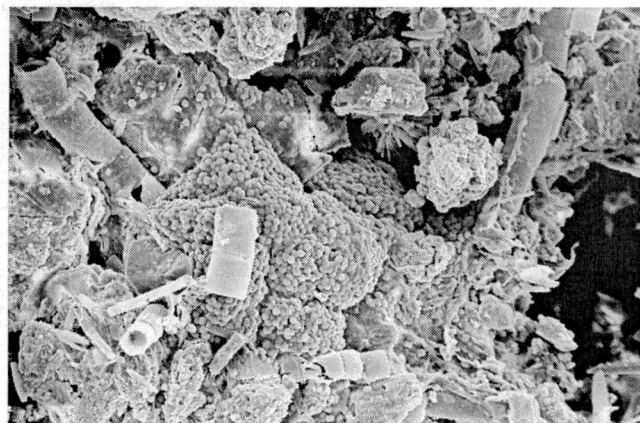
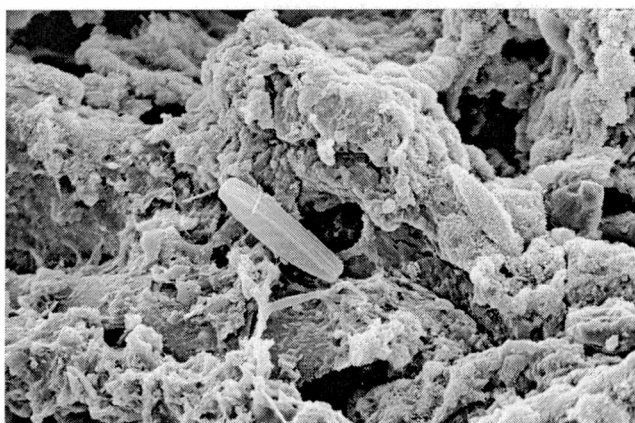
Ilość zawieszin w cm^3 w kilogramie suchej próby							
nad	pod	nad	pod	nad	pod	nad	pod
geowłókniną TS 10 w punkcie P3		geowłókniną TS 10 w punkcie P8		geowłókniną TS 50 w punkcie P6		geowłókniną TS 50 w punkcie P15	
222,6	2,6	216	3,6	271,4	3,5	106,0	5,44



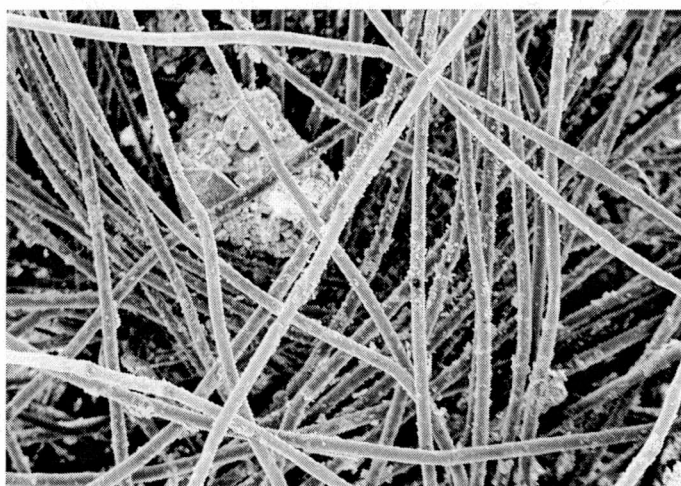
Rys. 56. Zdjęcia skaningowe osadu zgromadzonego na geowłókninie TS 10 w punkcie P6 wykonane przy powiększeniu 3000 razy (po lewej) oraz 1000 razy (po prawej)



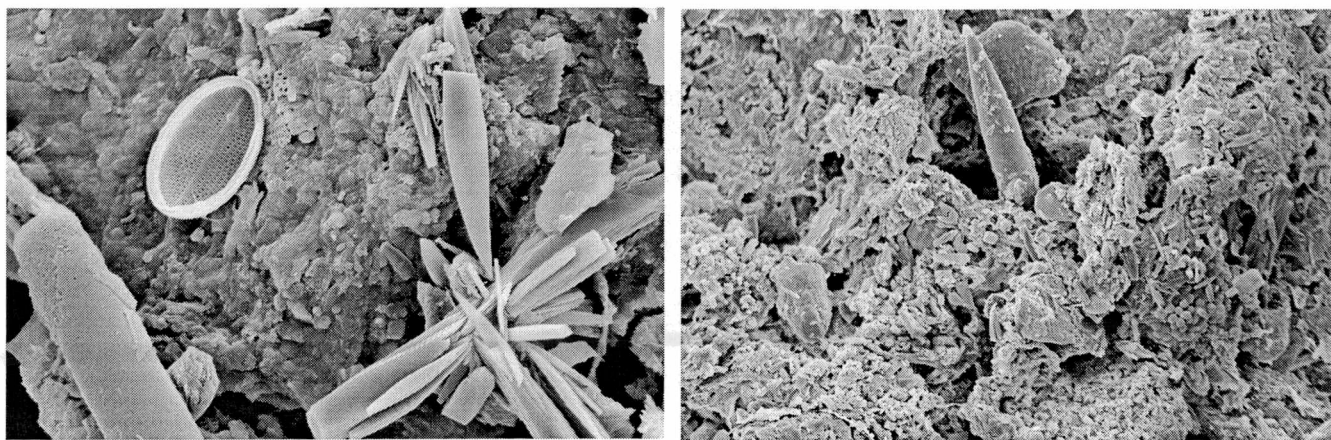
Rys. 57. Zdjęcie skaningowe osadu odłożonego wewnątrz geowłókniny TS 10 w miejscu poboru próby P6 przy powiększeniu 200 razy



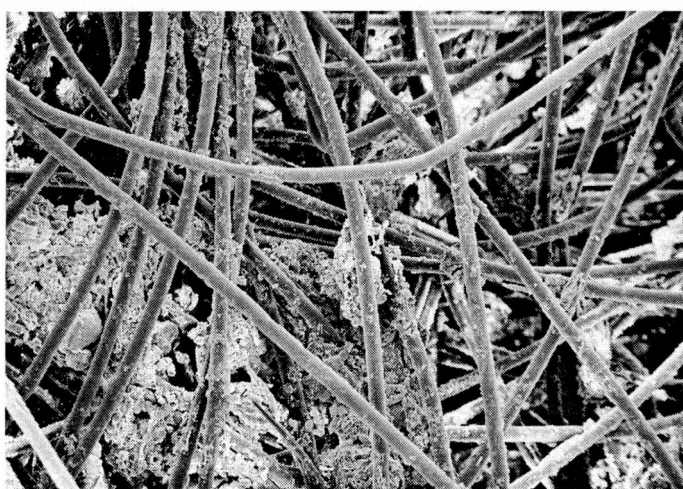
Rys. 58. Zdjęcia skaningowe osadu zakumulowanego na geowłókninie TS 20 w punkcie P16 wykonane przy powiększeniu 1000 razy



Rys. 59. Zdjęcie skaningowe osadu odłożonego wewnątrz geowłókniny TS 20 w punkcie P16 wykonane przy powiększeniu 200 razy



Rys. 60. Zdjęcia skaningowe osadu zgromadzonego na geowłókninie TS 50 w punkcie P8 wykonane przy powiększeniu 1000 razy (po lewej) oraz 5000 razy (po prawej)



Rys. 61. Zdjęcie skaningowe osadu odłożonego wewnątrz geowłókniny TS 50 w punkcie P8 wykonane przy powiększeniu 200 razy



Rys. 62. Zdjęcie skaningowe złoża pod geowłókniną TS 50 w miejscu poboru próby P8 wykonane przy powiększeniu 50 razy

Większe średnice zastępcze cząstek w osadach w porównaniu do zawiesin nanoplanktonu w rzece Brdzie można wytłumaczyć odkładaniem się detritusu w osadach oraz powstawaniem błony biologicznej z udziałem bakterii zoogloalnych. Na zdjęciach skaningowych na powierzchni osadów można zidentyfikować okrzemki i inne glony, a także dużo materii bezpostaciowej. W porach geowłókniny przeważa materia bezpostaciowa. Pod osadami i geowłókniną mogą rozwijać się zarówno bakterie saprofityczne jak i autotroficzne osiadłe na ziarnach gruntu. Dowodem na to może być wzrost węgla organicznego w gruncie w wyniku infiltracji wody do gruntu. W początkowej fazie biologicznego uaktywniania się gruntu mogą powstawać kolonie drobnoustrojów o małych średnicach zastępczych. Nie można wykluczyć wytrącania się z wody minerałów węglanów oraz siarczków.

8.3.4 Skład chemiczny osadów

W osadach zgromadzonych na geowłókninie w punktach P6, P8, P16 oznaczono skład chemiczny za pomocą analizatora chemicznego firmy Röntek. Przeprowadzono również badania nagromadzonego osadu pod geowłókniną TS 50 w punkcie P3. Próbkę tę oznaczono symbolem P0. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 23.

Dodatkowo na analizatorze CHNSEA 1110 firmy CE Instruments wykonano badania zawartości azotu, wodoru, węgla i siarki w próbach pobranych w punktach P6 i P8. Próby te podzielono na trzy części. Warstwę dolną stanowiła geowłóknina wraz z osadem znajdującym się w jej przestrzeniach strukturalnych. Warstwą środkową był osad zgromadzony bezpośrednio na geosyntetyku, natomiast warstwę górną stanowiła najbardziej zewnętrzna część osadu. Każdą z warstw analizowano indywidualnie. Dla porównania wykonano badania składu chemicznego czystej geowłókniny TS 20. Wyniki badań zestawiono w tabeli 24.

Znajomość składu elementarnego osadów umożliwia określenie ich pochodzenia. Porównując zawartości poszczególnych pierwiastków znajdujących się w próbach osadów z występującymi powszechnie ich zawartościami w mikroorganizmach wodnych, można ocenić udział detritusu. W przypadku osadów z dużym udziałem detritusu stosunek makropierwiastków powinien być zbliżony do stosunku w organizmach wodnych (tab. 25).

W wierzchniej warstwie osadów stosunek C/Si mieścił się w przedziale 0,63–4,18. W biomasie okrzemek stosunek ten mieścił się w przedziale 0,8–2,0. Stosunek C/P w biomasie okrzemek wynosił 40, a na powierzchni wytrąconych osadów 5–11. Można wnioskować, że

osady na powierzchni powstawały w wyniku wytrącania się detritusu okrzemek i innych glonów oraz węglanu wapnia i apatytów (wysoki udział wapnia i fosforu w osadach).

Stosunek Al/Si w analizowanych osadach przyjmował niskie wartości. Mieścił się on w przedziale 0,08–0,26 i odbiegał od wartości dla minerałów ilastych. Udział minerałów ilastych w osadach był niewielki.

Tabela 23

Ilość zawiesin w przeliczeniu na kilogram suchej masy w próbach z wybranych punktów kontrolnych

Pierwiastek	Udział procentowy pierwiastków w osadach pobranych w punktach kontrolnych (rodzaj geowłókniny)			
	P6 (TS 10)	P16 (TS 20)	P8 (TS 50)	P0 (pod TS 50)
Węgiel (C)	21,29	15,50	23,63	11,4
Wapń (Ca)	5,31	5,09	1,01	4,67
Tlen (O)	54,50	54,70	61,80	56,81
Mangan (Mn)	1,17	2,25	0,26	0,94
Żelazo (Fe)	2,49	4,08	0,19	2,53
Sód (Na)	1,15	1,70	3,18	0,98
Aluminium (Al)	1,43	1,35	1,47	1,62
Krzem (Si)	10,07	11,54	5,64	18,02
Fosfor (P)	1,92	2,85	2,28	2,23
Potas (K)	0,30	0,42	0,12	0,72
Siarka (S)	0,33	0,44	-	-
Magnez (Mg)	0,04	0,09	0,41	0,07

Tabela 24

Wyniki analizy elementarnej wykonanej w analizatorze CHNSEA 1110 firmy CE Instruments

Nazwa próby	Azot (N)	Węgiel (C)	Wodór (H)	Siarka (S)
	[%]	[%]	[%]	[%]
Czysta geowłóknina	0,13	84,8	13,6	0,00
P6 – geowłóknina	0,33	74,2	12,2	0,01
P6 – warstwa górna	1,05	10,8	1,46	0,06
P6 – warstwa środkowa	0,73	7,28	1,08	0,09
P8 – geowłóknina	0,71	31,9	3,9	0,08
P8 – warstwa górna	0,92	9,19	1,12	0,03
P8 – warstwa środkowa	0,32	3,43	0,44	0,05

Tabela 25

Zawartości węgla, azotu, fosforu i krzemu w różnych mikroorganizmach wodnych [60]

Rodzaj mikroorganizmów wodnych	Średnia procentowa zawartość			
	węgla	azotu	fosforu	krzemu
Ogólnie wszystkie rodzaje glonów	40 – 50	8 – 9	1,5	—
Okrzemki	40	7,2	1,0	20 – 24 max.50%
Zielelenica	40	7,2	1,0	—
Sinice	40	7,2	1,0	—
Pierwotniaki	37 – 47	3,3 – 5,0	0,6 – 1,1	—
Orzęski	40	7,2	1,0	—
Głony bentosowe	40	7,2	1,0	—

W miarę wzrostu głębokości w strefie osadów zmniejszała się w osadach zawartość węgla, azotu i wodoru, a wzrastała zawartość siarki. Wzrost zawartości siarki może być związany z okresowym powstawaniem warunków beztlenowych i wytrącaniem się siarczków metali ciężkich. Nie ulegał natomiast zmianie stosunek C/N, który kształtował się na poziomie 10:1. W organizmach bakteryjnych C/N mieści się w przedziale 3,5–9,5 średnio 4,5, w glonach 4,0–5,0, w pierwotniakach 6,0–7,5 a w grzybach wodnych od 8,0–9,0. Oznaczony stosunek C/N w osadach był wyższy od tych wartości. Prawdopodobnie było to związane z tworzeniem się związków humusowych w warstwie osadów. Spadek zawartości węgla organicznego i azotu świadczy o intensywnym przebiegu procesów mineralizacji materii organicznej w strefie osadów.

8.4 Wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w Bydgoszczy

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Na geowłókninach powstaje filtr namywany, na którym zatrzymuje się nanoplankton o średnicy zastępczej od 10 do 130 μm . Badania potwierdziły możliwość zastosowania geowłóknin dla ochrony warstwy filtracyjnej dna urządzeń chłonnych przed wgłębną kolmatacją przy infiltracji wód powierzchniowych.
2. Nie stwierdzono istotnego wpływu grubości geowłókniny na ilość odłożonych na nich osadów.

3. Pod powierzchnią geowłóknin stwierdzono wzrost zawartości węgla organicznego, co prawdopodobnie było związane z uaktywnieniem biologicznym warstwy gruntu pod dnem basenu.
4. Przesuszenie warstwy osadów wpływa korzystnie na wielkość infiltracji wody do gruntu. Zjawisko to jest prawdopodobnie związane z niszczeniem silnie uwodnionej struktury osadów.
5. Badania wykazały, że równanie (58) może służyć do modelowania zmian zwierciadła wody w basenach infiltracyjnych przy braku dopływu wody do basenu. Równanie to pozwala estymować wartość zastępczego oporu hydraulicznego zakolmatowanej warstwy dna basenu infiltracyjnego.

9 Badania przeprowadzone w skali laboratoryjnej

9.1 Cel badań laboratoryjnych i charakterystyka użytych zawiesin

Badania przeprowadzone na stanowisku w Bydgoszczy wykazały dużą skuteczność zatrzymywania nanoplanktonu na utworzonym na geowłókninie filtrze namywanym. Celem badań laboratoryjnym było wykazanie, czy w przypadku cząstek o mniejszych lub większych średnicach zastępczych o budowie mineralnej proces cedzenia na filtrze namywanym będzie równie skuteczny.

Do badań laboratoryjnych użyto zawiesin sporządzanych z bentonitu pochodzącego z Zakładów Górniczo-Metalowych w Żębcu, kaolinu produkowanego przez Kopalnię Surowców Mineralnych Surmin w Nowogrodźcu oraz gliny pobranej z pól w okolicach Pawłowic koło Wrocławia.

Bentonit jest osadową skałą ilastą o barwie szarej, której głównym składnikiem jest montmorylonit. Mineral ten wykazuje silne właściwości sorpcyjne a cząstki pod wpływem wody pęcznią. Bentonit może absorbować 5 razy więcej wody niż sam waży, a przy pełnym nasyceniu może zajmować objętość 12–15 razy większą niż w stanie suchym. Analizę mineralogiczną użytego do badań bentonitu przedstawiono w tabeli 26.

Tabela 26

Skład mineralogiczny bentonitu (według danych producenta)

Minerał	Montmorylonit	Ilit	Kaolinit	Skalenie (anortit)	Krzemień
Udział procentowy	56–62%	17–18%	10–12%	5–7%	1–2%

Kaolin jest osadową skałą ilastą o barwie białej, zbudowanej głównie z minerału kaolinitu. W stanie suchym jest pylasty, zmoczony staje się plastyczny. W porównaniu z bentonitem, kaolin nie wykazuje tak silnych zdolności do pęcznienia. Skład chemiczny użytego do badań kaolinu, za materiałami udostępnionymi przez producenta, zestawiono w tabeli 27

Tabela 27

Skład chemiczny kaolinu (według danych producenta)

Skład chemiczny	Udział procentowy	Skład chemiczny	Udział procentowy
SiO ₂	51,4%	MgO	0,14%
Al ₂ O ₃	34,3%	K ₂ O	0,64%
Fe ₂ O ₃	0,50%	Na ₂ O	0,01%
TiO ₂	0,51%	P ₂ O ₅	0,16%
CaO	0,07%	BaO	0,02%

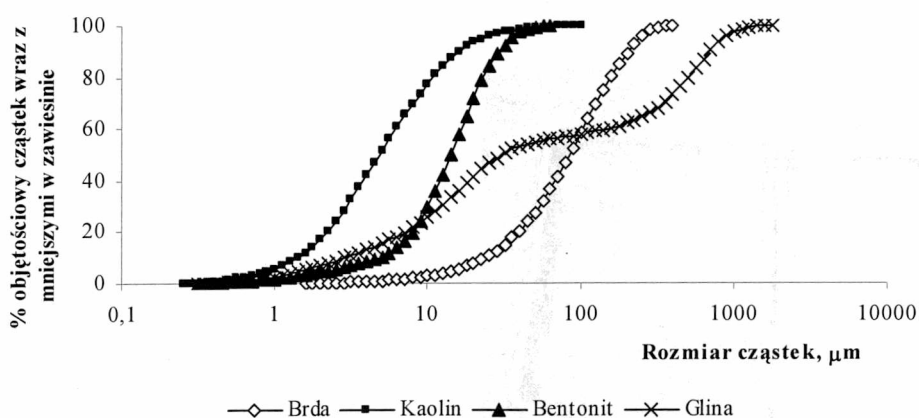
Skład chemiczny zastosowanej w badaniach gliny pobranej z pól koło Pawłowic ustalono przy użyciu analizatora chemicznego firmy Röntek (tab. 28).

Tabela 28

Zawartość głównych pierwiastków w glinie użytej do badań

Pierwiastek	Krzem (Si)	Glin (Al.)	Żelazo (Fe)	Potas (K)	Sód (Na)	Magnez (Mg)	Wapń (Ca)
Udział procentowy	26,83%	8,65%	3,46%	1,70%	1,08%	1,01%	0,7%

Na rysunku 63 porównano skład granulometryczny zawieszin występujących w rzece Brdzie ze składem granulometrycznym używanych do badań zawieszin bentonitu, kaolinu i gliny.



Rys. 63. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin mineralnych użytych do badań ze składem granulometrycznym zawieszin występujących w wodzie z rzeki Brdy

Kaolin jest osadową skałą ilastą o barwie białej, zbudowanej głównie z minerału kaolinitu. W stanie suchym jest pylasty, zmoczony staje się plastyczny. W porównaniu z bentonitem, kaolin nie wykazuje tak silnych zdolności do pęcznienia. Skład chemiczny użytego do badań kaolinu, za materiałami udostępnionymi przez producenta, zestawiono w tabeli 27

Tabela 27

Skład chemiczny kaolinu (według danych producenta)

Skład chemiczny	Udział procentowy	Skład chemiczny	Udział procentowy
SiO ₂	51,4%	MgO	0,14%
Al ₂ O ₃	34,3%	K ₂ O	0,64%
Fe ₂ O ₃	0,50%	Na ₂ O	0,01%
TiO ₂	0,51%	P ₂ O ₅	0,16%
CaO	0,07%	BaO	0,02%

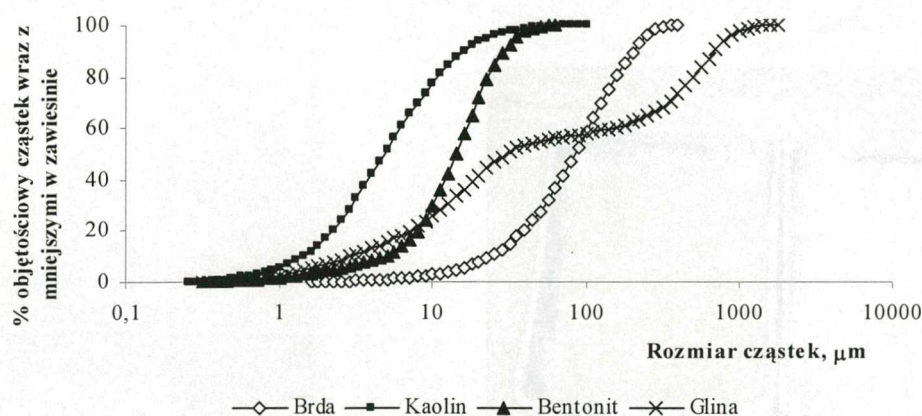
Skład chemiczny zastosowanej w badaniach gliny pobranej z pól koło Pawłowic ustalono przy użyciu analizatora chemicznego firmy Röntek (tab. 28).

Tabela 28

Zawartość głównych pierwiastków w glinie użytej do badań

Pierwiastek	Krzem (Si)	Glin (Al.)	Żelazo (Fe)	Potas (K)	Sód (Na)	Magnez (Mg)	Wapń (Ca)
Udział procentowy	26,83%	8,65%	3,46%	1,70%	1,08%	1,01%	0,7%

Na rysunku 63 porównano skład granulometryczny zawiesin występujących w rzece Brdzie ze składem granulometrycznym używanych do badań zawiesin bentonitu, kaolinu i gliny.



Rys. 63. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin mineralnych użytych do badań ze składem granulometrycznym zawiesin występujących w wodzie z rzeki Brdy

9.3 Przebieg badań

Każdy pojemnik był zalewany raz na dobę przez okres trzydziestu dni objętością 20–21 dm³ zawiesiny bentonitu, kaolinu lub gliny. Zawiesinę bentonitu (kaolinu) o stężeniu 120 g/m³ sporządzano na wodzie wodociągowej. Stężenie gliny w zawiesinach wynosiło 510 g/m³. W celu uzyskania spęczenia cząstek minerałów zawiesinę przygotowywano dzień wcześniej przed użyciem. Czas zalewania poszczególnych pojemników trwał od 21–58 minut.

Na podstawie badań przeprowadzonych z użyciem granulometru laserowego ustalono, że objętość cząstek w zawieszynie bentonitu wynosiła 0,258 cm³/dm³, kaolinu 0,088 cm³/dm³, a gliny 0,210 cm³/dm³. Dzieląc ilość zużytego do sporządzenia zawiesiny materiału przez oznaczoną objętość cząstek zawiesiny można określić pozorną gęstość cząstek zawiesin. Dla bentonitu pozorna gęstość cząstek zawieszonych wyniosła 0,465 g/cm³. Wartość ta jest mniejsza od gęstości wody co świadczy, że dla cząstek bentonitu oznaczona granulometrem laserowym objętość jest obarczona dużym błędem. Cząstki bentonitu wykazują duże zdolności do pęcznienia. Rozbudowane przestrzennie cząstki bentonitu są identyfikowane przez przyrząd jako cząstki kuliste o większych średnicach zastępczych niż rzeczywiste ich wymiary. Badania wykazały, że w przypadku minerałów pęczniejących oznaczony skład granulometryczny przy użyciu granulometru laserowego może dalece odbiegać od składu rzeczywistego.

Dla kaolinu wyliczona pozorna gęstość wyniosła 1,36 g/cm³, a dla gliny 2,42 g/cm³.

Zawiesinami bentonitu i gliny zalewano pojemniki z ułożoną na powierzchni piasku geowłókniną TS 40 i TS 10, natomiast zawiesiną kaolinu zalewano pojemniki w których użyto geowłóknin TS 20 i TS 60. Podczas całego okresu badań do każdego pojemnika zalewanego zawiesinami bentonitu i kaolinu wprowadzono 75 g minerałów ilastych, natomiast w przypadku stanowisk zalewanych zawiesiną gliny ilość to wyniosła 321 g.

W pierwszych dniach badań określono objętość cząstek zawiesin i ich skład granulometryczny w odciekach. Po zakończeniu badań określono objętość i skład granulometryczny zawiesin zgromadzonych na geowłókninach, wewnątrz i pod ich powierzchnią, a także wewnątrz złoża na głębokościach 1,5; 4,5; 7,5 i 19 cm. Ponadto metodą wagową określono masę osadów odłożonych na geowłókninach oraz masę zawiesin wypłukanych z geowłóknin.

Ubytek objętości złoża na poszczególnych warstwach określono w oparciu o objętość cząstek zawiesin wypłukanych z poszczególnych warstw złoża.

Wykonano także zdjęcia skaningowe osadów oraz badania ich składu chemicznego.

Sposób zalewania pojemników przedstawiono na rysunku 65.

9.3 Przebieg badań

Każdy pojemnik był zalewany raz na dobę przez okres trzydziestu dni objętością 20–21 dm³ zawiesiny bentonitu, kaolinu lub gliny. Zawiesinę bentonitu (kaolinu) o stężeniu 120 g/m³ sporządzano na wodzie wodociągowej. Stężenie gliny w zawiesinach wynosiło 510 g/m³. W celu uzyskania spęcznienia cząstek minerałów zawiesinę przygotowywano dzień wcześniej przed użyciem. Czas zalewania poszczególnych pojemników trwał od 21–58 minut.

Na podstawie badań przeprowadzonych z użyciem granulometru laserowego ustalono, że objętość cząstek w zawieszynie bentonitu wynosiła 0,258 cm³/dm³, kaolinu 0,088 cm³/dm³, a gliny 0,210 cm³/dm³. Dzieląc ilość zużytego do sporządzenia zawiesiny materiału przez oznaczoną objętość cząstek zawiesiny można określić pozorną gęstość cząstek zawiesin. Dla bentonitu pozorna gęstość cząstek zawieszonych wyniosła 0,465 g/cm³. Wartość ta jest mniejsza od gęstości wody co świadczy, że dla cząstek bentonitu oznaczona granulometrem laserowym objętość jest obciążona dużym błędem. Cząstki bentonitu wykazują duże zdolności do pęcznienia. Rozbudowane przestrzennie cząstki bentonitu są identyfikowane przez przyrząd jako cząstki kuliste o większych średnicach zastępczych niż rzeczywiste ich wymiary. Badania wykazały, że w przypadku minerałów pęczniejących oznaczony skład granulometryczny przy użyciu granulometru laserowego może dalece odbiegać od składu rzeczywistego.

Dla kaolinu wyliczona pozorna gęstość wyniosła 1,36 g/cm³, a dla gliny 2,42 g/cm³.

Zawiesinami bentonitu i gliny zalewano pojemniki z ułożoną na powierzchni piasku geowłókniną TS 40 i TS 10, natomiast zawiesiną kaolinu zalewano pojemniki w których użyto geowłóknin TS 20 i TS 60. Podczas całego okresu badań do każdego pojemnika zalewanego zawiesinami bentonitu i kaolinu wprowadzono 75 g minerałów ilastych, natomiast w przypadku stanowisk zalewanych zawiesiną gliny ilość to wyniosła 321 g.

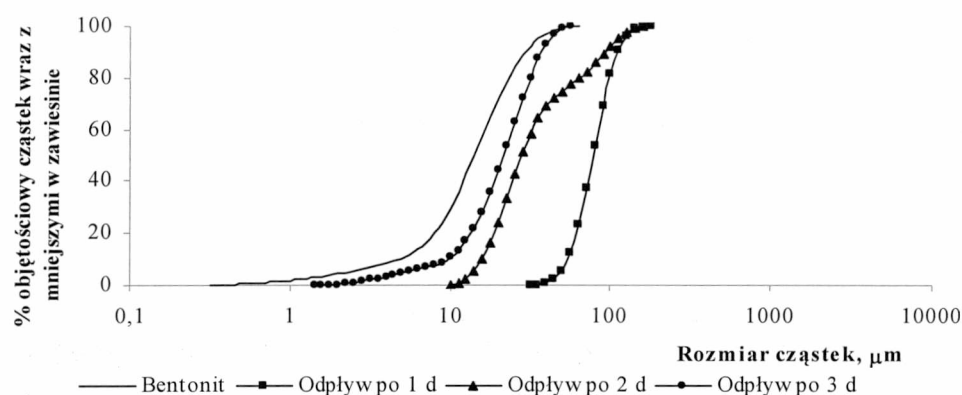
W pierwszych dniach badań określono objętość cząstek zawiesin i ich skład granulometryczny w odciekach. Po zakończeniu badań określono objętość i skład granulometryczny zawiesin zgromadzonych na geowłókninach, wewnątrz i pod ich powierzchnią, a także wewnątrz złoża na głębokościach 1,5; 4,5; 7,5 i 19 cm. Ponadto metodą wagową określono masę osadów odłożonych na geowłókninach oraz masę zawiesin wypłukanych z geowłóknin.

Ubytek objętości złoża na poszczególnych warstwach określono w oparciu o objętość cząstek zawiesin wypłukanych z poszczególnych warstw złoża.

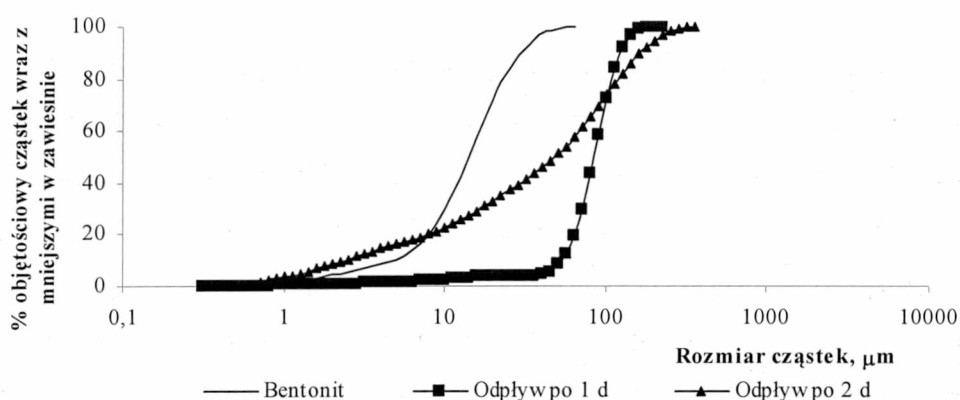
Wykonano także zdjęcia skaningowe osadów oraz badania ich składu chemicznego.

Sposób zalewania pojemników przedstawiono na rysunku 65.

Przyrost wielkości średnic zastępczych cząstek w odpływie, można wytłumaczyć powstawaniem koloidalnych cząstek o bardzo rozbudowanej strukturze przestrzennej, które granulometr identyfikuje jako cząstki kuliste.

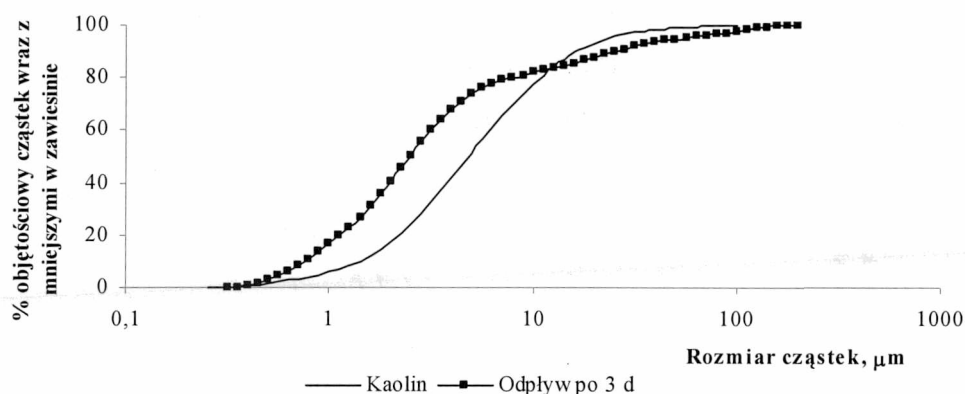


Rys. 66. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach z pojemnika z geowłókniną TS 10 oraz po 1, 2 i 3 dobach badań

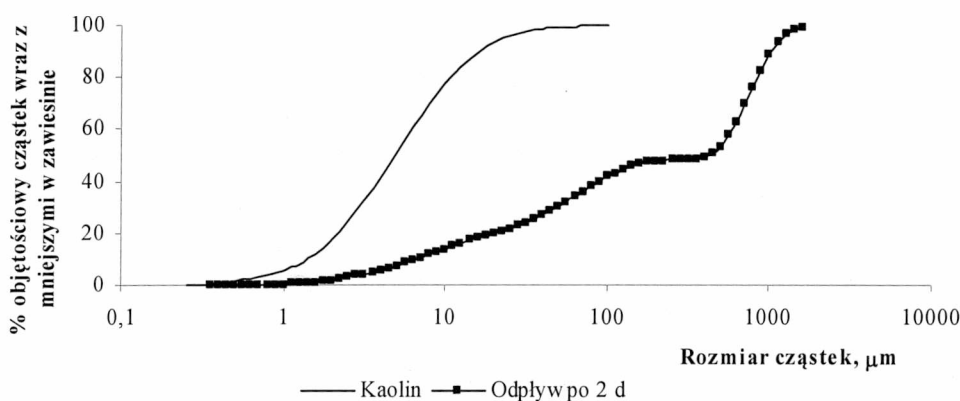


Rys. 67. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach ze stanowiska z geowłókniną TS 40 oraz po 1 i 2 dobie badań

W wodzie odpływającej z pojemnika zalewanego zawiesziną kaolinu z ułożoną na powierzchni piasku geowłókniną TS 20 nie zaobserwowano wzrostu udziału cząstek o większych średnicach zastępczych w porównaniu ze składem granulometrycznym zawiesin kaolinu (rys. 68). W tym wypadku obecność cząstek zawiesin w odpływie z pojemnika stwierdzono tylko w trzecim dniu badań. Objętość zawiesin dla tej próby wyniosła $0,002 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. W przypadku geowłókniny TS 60 cząstki zawiesin w wodzie odpływającej z pojemnika doświadczalnego stwierdzono tylko w drugim dniu badań na poziomie $0,0085 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ (rys. 69).



Rys. 68. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływie z pojemnika z geowłókniną TS 20 po 3 dobie badań

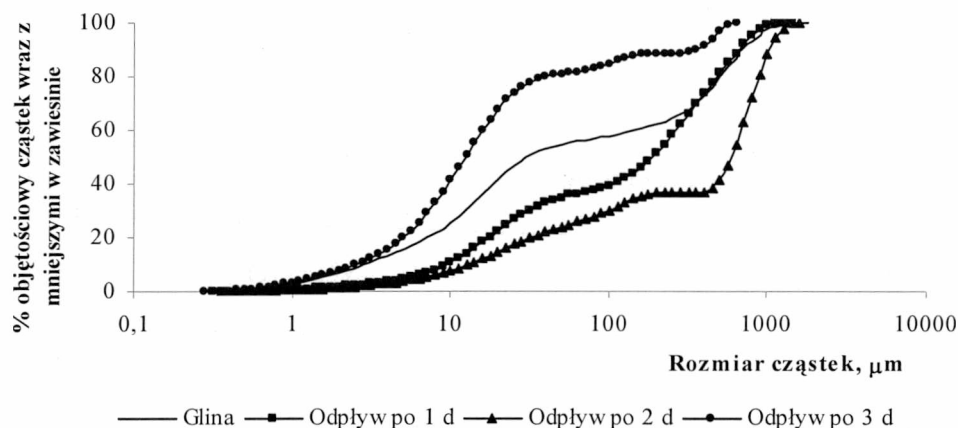


Rys. 69. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinitu ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływie po 2 dobie badań z pojemnika z geowłókniną TS 60

W porównaniu z doświadczeniem z bentonitem w przypadku kaolinu stwierdzano mniejsze wynoszenie cząstek z odpływającą wodą. Biorąc pod uwagę, że kaolin jest zbudowany z cząstek wykazujących małą zdolność do pęcznienia można sądzić, że uzyskane wyniki dla eksperymentu z bentonitem są obarczone dużym błędem wywołanym obecnością w wodzie cząstek o strukturze koloidalnej powodujących pozorny wzrost średnic zastępczych mierzonych granulometrem laserowym.

Przyrost średnic cząstek zastępczych zawiesin w odpływach w porównaniu ze składem granulometrycznym zawiesin gliny użytej do badań miał miejsce w 1 i 2 dniu badań dla pojemnika z geowłókniną TS 10 (rys. 70). Na trzeci dzień nastąpiło zmniejszenie się średnic cząstek w zawieszynie zawartej w odpływającej wodzie. W pierwszym dniu objętość cząstek zawieszyny wyniosła $0,154 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ i była o 30% mniejsza od objętości cząstek w zawieszynie użytej do zalewania. Objętość ta w drugim dniu badań zmniejszyła się do wartości

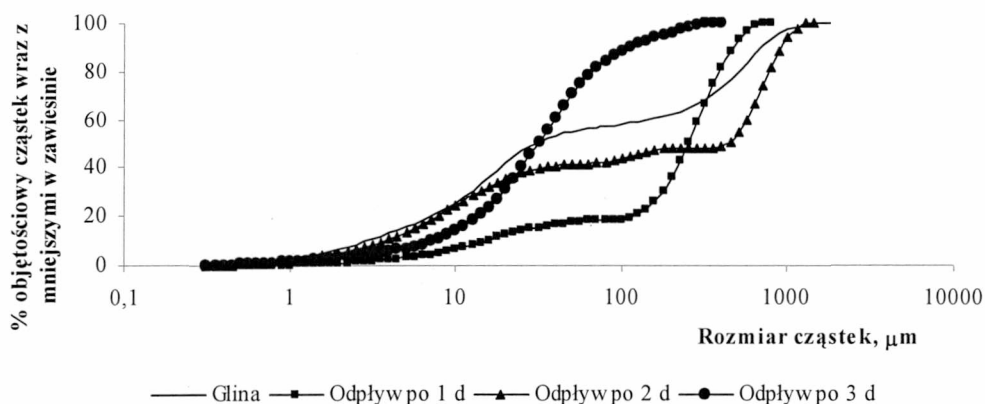
0,068 cm³/dm³ a w trzecim spadła do poziomu 0,022 cm³/dm³. W następnych dniach woda odpływająca była wolna od zawiesin.



Rys. 70. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach ze stanowiska z geowłókniną TS 10 po 1, 2 i 3 dobie badań

Objętość zawiesin w odpływie z pojemnika z geowłókniną TS 40 po pierwszej dobie wynosiła 0,0365 cm³/dm³, w drugiej 0,035 cm³/dm³, a w trzeciej dobie 0,032 cm³/dm³. Skład granulometryczny zawiesin zawartych w odciekach z tego pojemnika przedstawiono na rysunku 71. W kolejnych dniach nie stwierdzano zawiesin w odciekach zarówno dla pojemnika z geowłókniną TS 10 jak i TS 40.

Z uzyskanych danych wynika, że w pierwszych dniach badań z użyciem zawiesiny gliny dochodziło do przenikania cząstek przez złożę. Szybszy zanik tego zjawiska nastąpił dla geowłókniny TS 40. Dowodzi to wpływu grubości geowłókniny na proces kolmatacji złoża pod geowłókniną.



Rys. 71. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny ze składem granulometrycznym zawiesin w odpływach ze stanowiska z geowłókniną TS 40 po 1, 2 i 3 dobie badań

Badania składu granulometrycznego odcieków wykazały, że do czasu uszczelnienia się powierzchni złoża dochodzi do wnikanie cząstek wewnątrz złoża. Proces ten jest zależny od wielkości cząstek, stopnia ich spęczenia, składu granulometrycznego zawiesiny oraz zastosowanej geowłókniny.

9.4.2 Badania stopnia zakolmatowania warstwy piasku pod geowłókninami

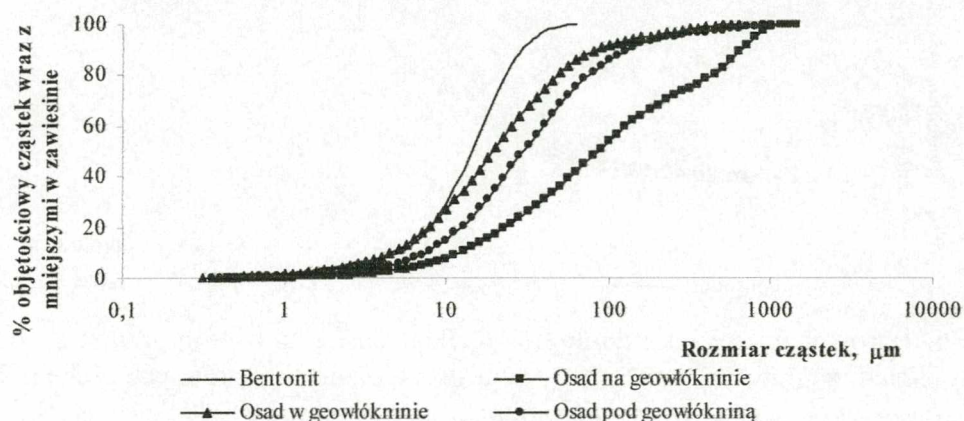
Na rysunku 72 przedstawiono zdjęcia wybranych pojemników po zakończeniu eksperymentów.

Na powierzchni geowłóknin TS 10 i TS 40 zatrzymało się w ciągu całego okresu badań odpowiednio 42,9 g i 41 g bentonitu, co stanowiło w pierwszym przypadku 57,2 % a w drugim 54,6% całej ilości minerału wprowadzonego z zawiesiną. Wewnątrz geowłóknin ilość zatrzymanego bentonitu wynosiła w przypadku geowłókniny TS 10 23,3 g (31,1%), a dla geowłókniny TS 40 25,9 g (34,5%). Pozostała ilość bentonitu, stanowiąca około 11% całej masy tego minerału wprowadzonego w formie zawiesiny, została zatrzymana wewnątrz złoża. Zawiesiny w odpływie oznaczano tylko w pierwszych 3 dniach eksperymentu. Całkowita objętość zawiesin, która odpłynęła w pierwszych trzech dniach eksperymentu z pojemnika z geowłókniną TS 10 wyniosła $0,525 \text{ cm}^3$, co stanowiło 0,32% całej objętości zawiesin wprowadzonych do pojemnika ($165,54 \text{ cm}^3$). Masę zawiesin odpływających ze złoża można pominąć w bilansie. Podobne zjawisko miało miejsce dla filtracji zawiesiny bentonitu przez złoża piaskowe przykryte geowłókniną TS 40.

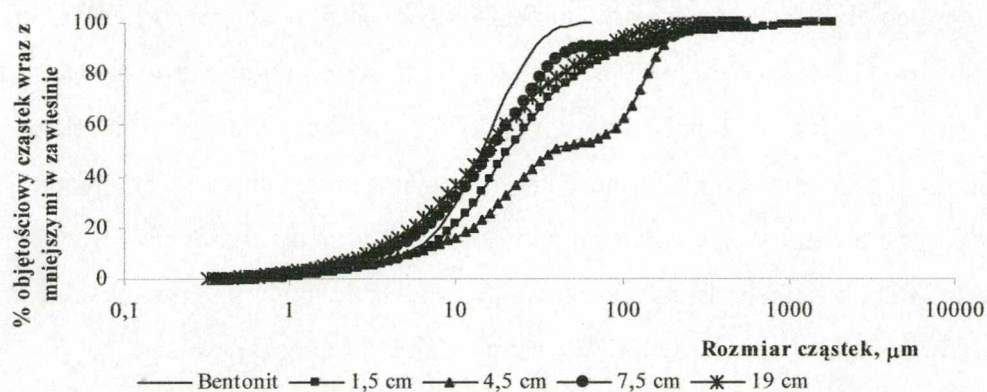
Skład granulometryczny osadów zgromadzonych na powierzchni, wewnątrz i pod geosyntetykiem oraz wypłukanych z poszczególnych warstw filtrów doświadczalnych przedstawiono na rys. 73–76.



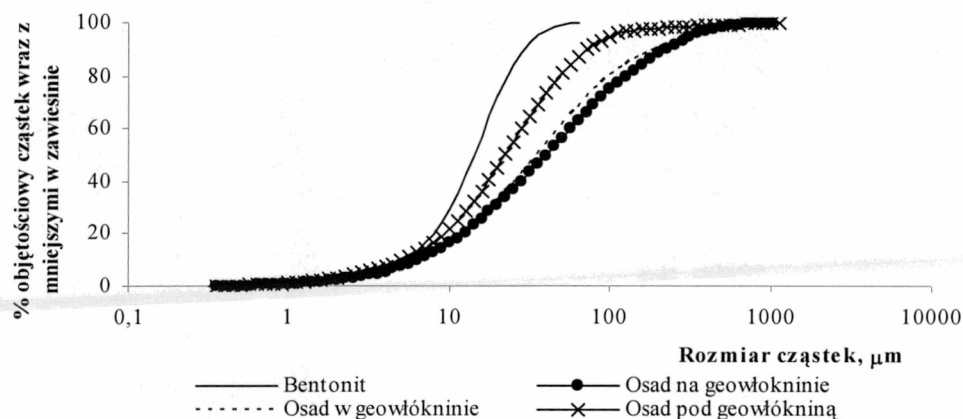
Rys. 72. Widok osadu (od lewej) bentonitu odłożonego na powierzchni geowłókniny TS 10, kaolinu odłożonego na geowłókninie TS 20 i gliny odłożonej na geowłókninie TS 20



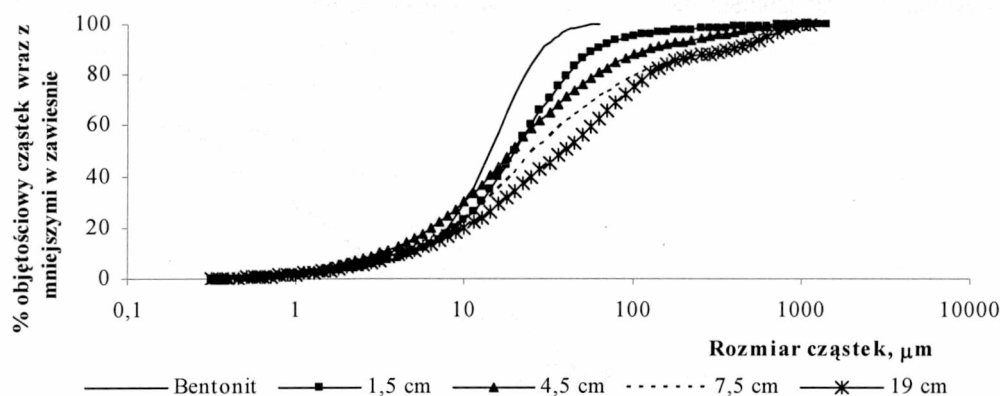
Rys. 73. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 10, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią



Rys. 74. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionej geowłókniną TS 10



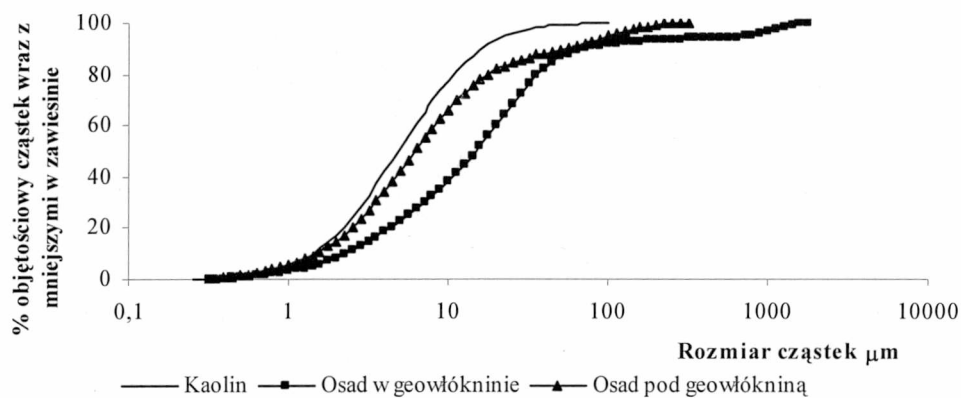
Rys. 75. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawieszin odłożonych na geowłókninie TS 40, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią



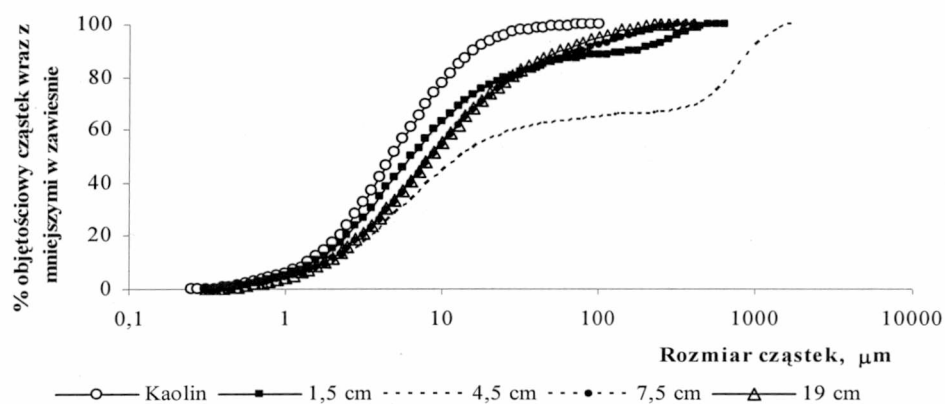
Rys. 76. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawieszin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 40

W przypadku pojemników zalewanych zawiesiną kaolinu na powierzchni geowłóknin nie wytworzyła się w czasie trwania eksperymentu zwarta warstwa osadów. Kaolin zgromadził się wewnątrz geowłókniny. Masy zatrzymanego w geowłókninach TS 20 i TS 60 kaolinu były do siebie zbliżone i stanowiły około 43% całkowitej ilości minerału wprowadzonego na złożo. Pozostała ilość kaolinu wniknęła w głąb warstwy piasku. Podobnie do eksperymentu z bentonitem można również pominąć masę kaolinu wyniesioną z odpływającą wodą.

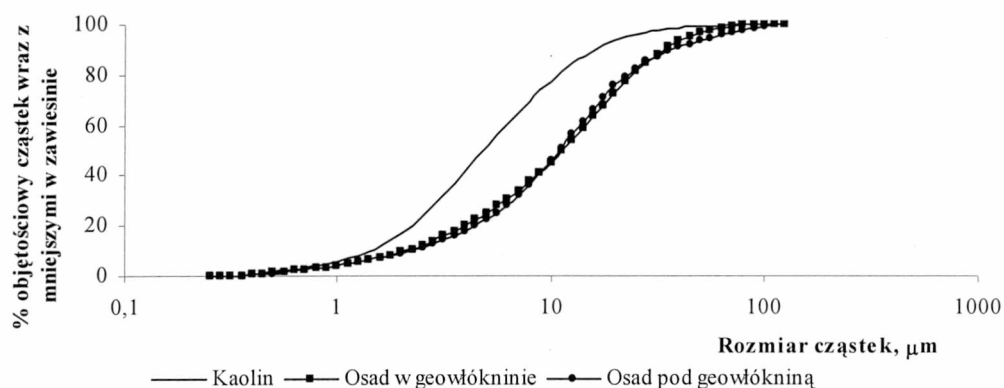
Skład granulometryczny zawieszin zatrzymanych w geowłókninach TS 20 i TS 60 oraz na różnych głębokościach filtra piaskowego przedstawiono na rysunkach 77–80. We wszystkich przypadkach stwierdzono wzrost średnicy zastępczej cząstek w porównaniu ze składem granulometrycznym zawieszin kaolinu użytego w eksperymencie. Zjawisko to można wytłumaczyć aglomeracją cząstek kaolinu, do której dochodziło w geowłókninach i w złożu piaskowym.



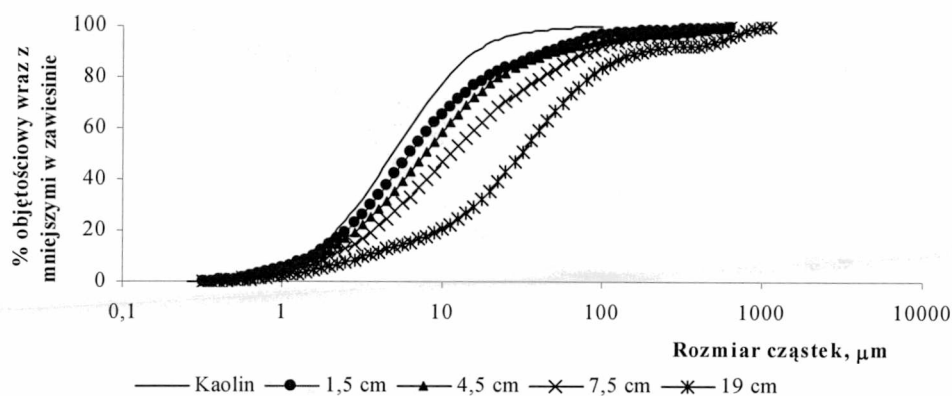
Rys. 77. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 20, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią.



Rys. 78. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 20



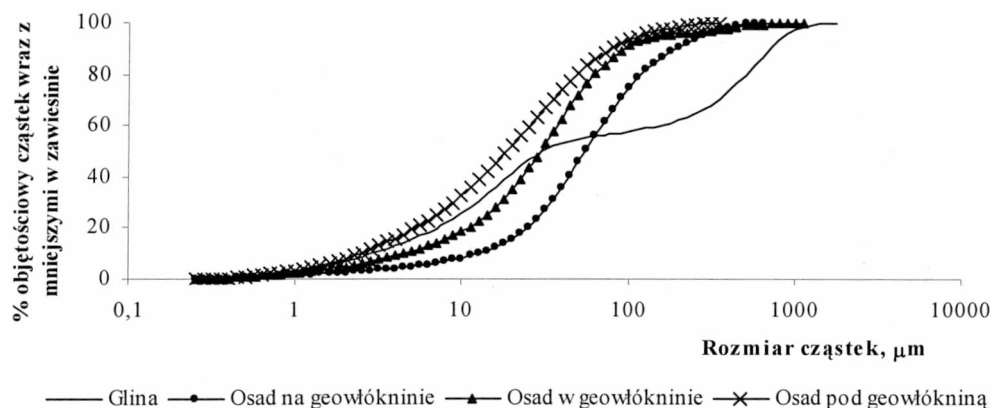
Rys. 79. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 60, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią.



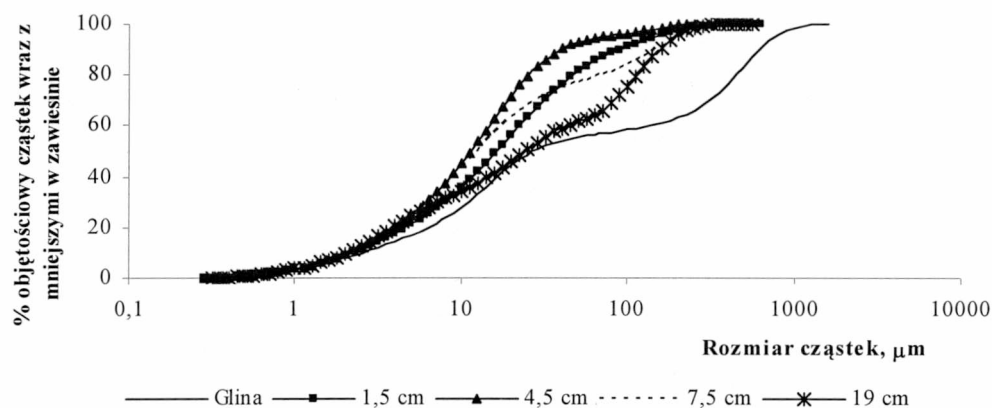
Rys. 80. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną TS 60

Masa osadu z gliny zgromadzona na geowłókninie TS 10 wynosiła 173,6g, co stanowiło 54,1% całej ilości gliny wprowadzonej w postaci zawiesiny, podczas gdy wewnątrz geowłókniny odłożyło się 66,7 g (20,8%) gliny. W przypadku geowłókniny TS 40 więcej gliny zgromadziło się na geowłókninie (56,7%) niż w jej wnętrzu (14,6%). W pierwszym z analizowanych pojemników z gliną pozostała część osadu stanowiąca 25,1% wniknęła w głąb złoża, w drugim pojemniku z geowłókniną TS 40 ilość ta była większa i stanowiła 28,7% ogólnej masy gliny użytej w eksperymencie. Największa ilość gliny zatrzymała się na głębokości 4,5 cm pod powierzchnią geowłókniny.

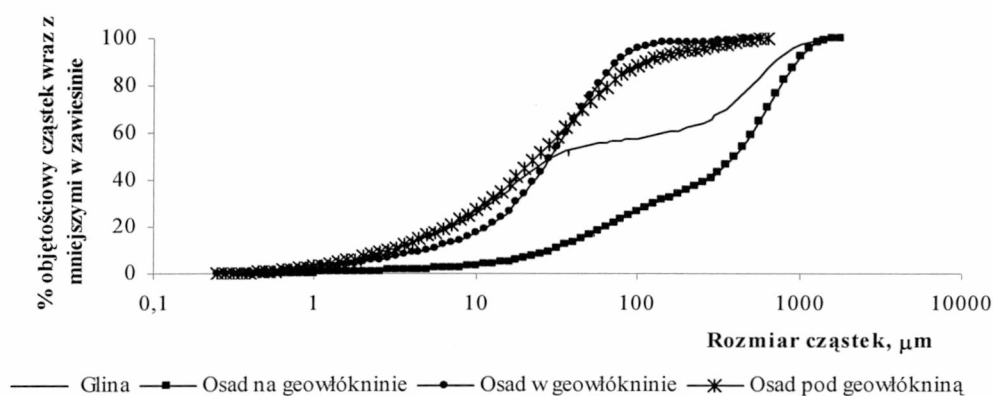
Skład granulometryczny zawiesin w różnych warstwach został przedstawiony na rys. 81-84.



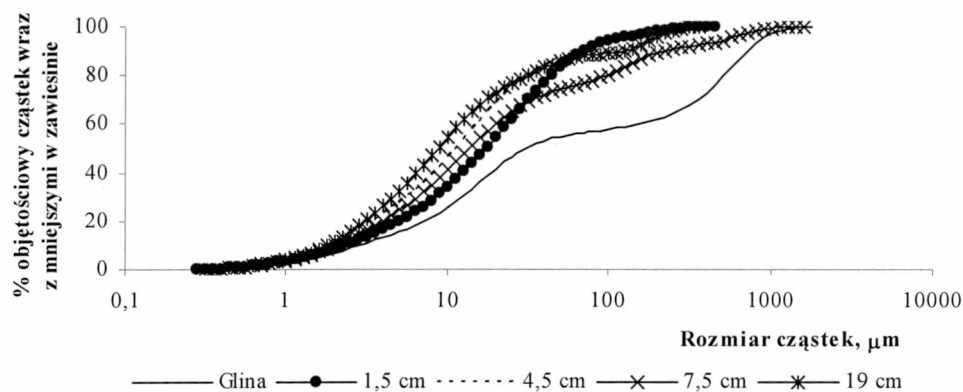
Rys. 81. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 10, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią



Rys. 82 Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża w stanowisku z geowłókniną TS 10



Rys. 83. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie TS 40, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią



Rys. 84. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin gliny użytej do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża w stanowisku z geowłókniną TS 40

Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano procentowy ubytek porowatości złóż na poszczególnych ich głębokościach. Dane te zostały przedstawione w tabeli 29. W obliczeniach przyjęto, że początkowa porowatość złoża piaskowego wyniosła 35%.

Tabela 29

Porównanie ubytku porowatości materiału filtracyjnego po 30 dobach zalewania zawiesiną kaolinu, bentonitu i gliny stanowisk z różną grubością geowłóknin

Warstwa złoża [cm]	Procentowy ubytek porowatości złoża filtracyjnego zalewanego zawiesiną [%]					
	bentonitu		gliny		kaolinu	
	TS 10	TS 40	TS 10	TS 40	TS 20	TS 60
0 – 1,5	7,01	3,44	1,81	2,43	4,30	1,49
1,5 – 4,5	1,47	1,06	1,25	1,47	8,86	1,98
4,5 – 7,5	1,31	0,92	0,88	1,16	2,03	0,95
7,5 – 19	0,85	0,77	0,33	0,40	1,89	0,53

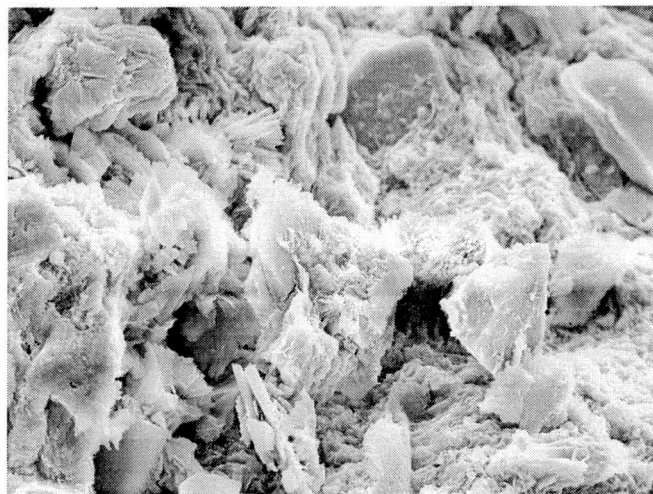
Procentowy ubytek porowatości na poszczególnych głębokościach złoża był największy w przypadku złożów zalewanych zawiesiną kaolinu. Zawiesina kaolinu charakteryzowała się składem granulometrycznym cząstek o najmniejszych średnicach zastępczych i słabych zdolnościach do pęcznienia. Wyniki badań wskazują, że przy bardzo małych cząstkach ochronę przed kolmatacją można uzyskać stosując geowłókninę o większej grubości. Przy geowłókninie TS 20 spadek porowatości w warstwie 0–1,5 cm pod geowłókniną wyniósł 4,3%, a w warstwie 1,5–4,5 cm 8,8%, podczas gdy przy zastosowaniu geowłókniny TS 60 wartości te wyniosły odpowiednio 1,49% i 1,98%.

W przypadku zalewania zawiesiną bentonitu nie zaobserwowano tak istotnych ubytków porowatości złoża piaskowego jak to miało miejsce dla zawiesiny kaolinu, lecz i w tym wypadku zauważa się korzystny wpływ grubości geowłóknin na zasięg kolmatacji. Bentonit jako substancja mocno pęczniejąca szybko tworzył warstwę filtra namywanego.

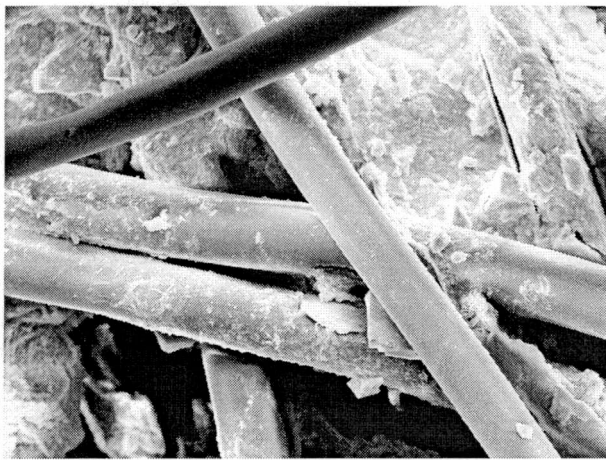
Skład granulometryczny zawiesiny sporządzonej z gliny był najbardziej zbliżony do składu granulometrycznego zawiesin w odpływach z dachów. Dla zawiesiny gliny uzyskano zaskakujący wynik. W przypadku grubszej geowłókniny TS 40 doszło do głębszego wnikania cząstek w warstwę piasku. Jest to tym bardziej zastanawiające, że dla geowłókniny TS 40 obserwowano szybszy spadek objętości cząstek zawiesiny w wodzie odpływającej z pojemnika badawczego. Różnice ubytku porowatości w poszczególnych warstwach dla eksperymentu z geowłókniną TS 10 i TS 40 były podobnego rzędu i nie można wykluczyć, że oba wyliczone spadki porowatości złoża mieściły się w granicach błędów analizy. Na podstawie jednej serii badań nie można wytłumaczyć przyczyn tego zjawiska.

9.4.3 Zdjęcia skaningowe

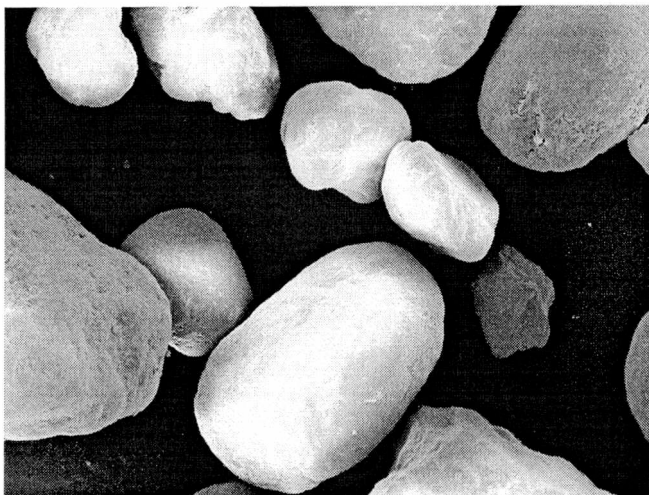
W celu dokładniejszego przeanalizowania struktury powstałych na geowłókninie osadów, odłożonych wewnątrz niej i w piasku wykonano zdjęcia pobranych próbek przy użyciu mikroskopu skaningowego. Na rysunkach 84–91 przedstawiono wybrane fotografie.



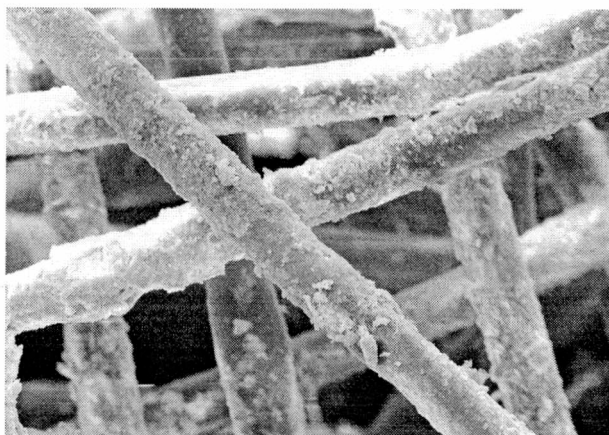
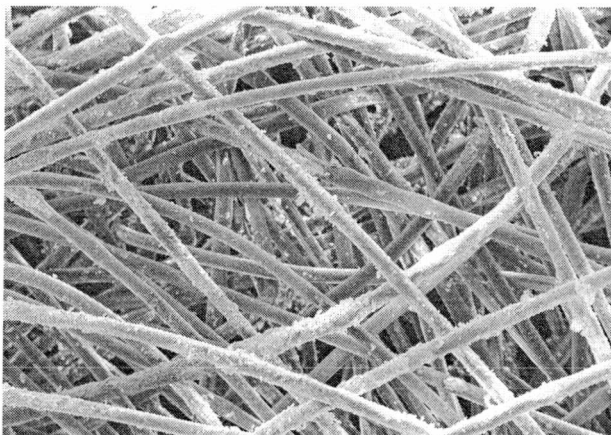
Rys. 85. Zdjęcie skaningowe osadu bentonitu odłożonego na geowłókninie TS 10 wykonane przy powiększeniu 3000 razy



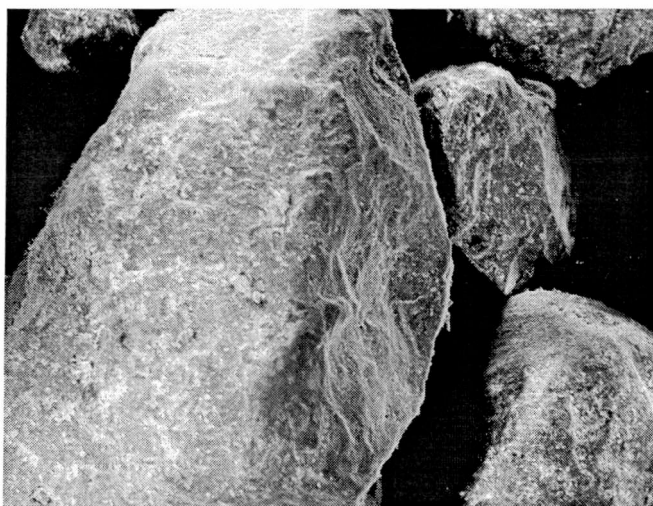
Rys. 86. Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie TS 10 wykonane przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



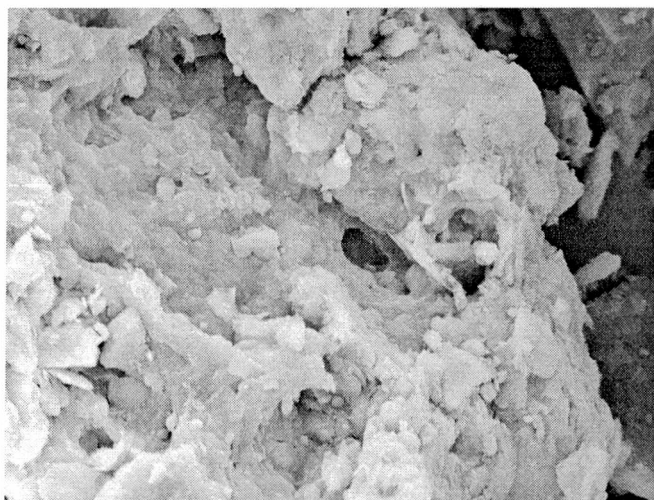
Rys. 87. Zdjęcie skaningowe złoża pod geowłókniną TS 10 zalewaną zawiesiną bentonitu wykonane przy powiększeniu 100 razy



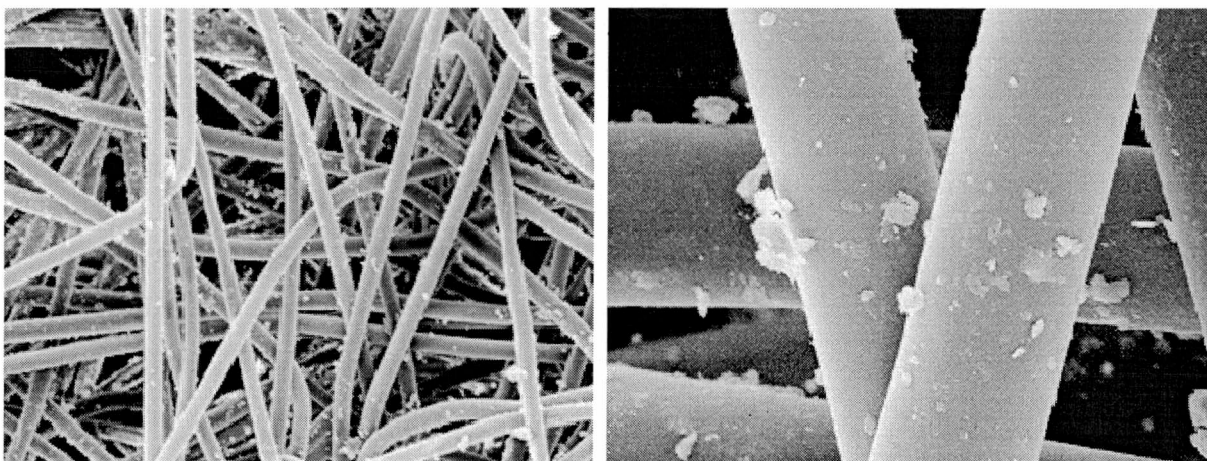
Rys. 88. Zdjęcia skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie TS 20 wykonane przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



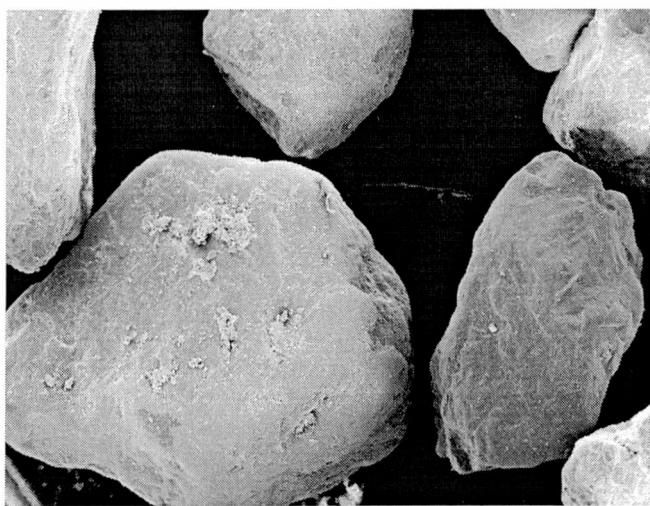
Rys. 89. Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego pod powierzchnią geowłókniny TS 20 przy powiększeniu 100 razy



Rys. 90. Zdjęcie skaningowe osadu gliny odłożonego na powierzchni geowłókniny TS 10 wykonane przy powiększeniu 4000 razy



Rys. 91. Zdjęcia skaningowe osadu gliny odłożonego w geowłókninie TS 10 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 2500 razy (po prawej)



Rys. 92. Zdjęcie skaningowe złoża pod powierzchnią geowłókniny TS 10 przy powiększeniu 100 razy

W przypadku bentonitu (rys. 85–86) powierzchnia osadów tworzyła pierzastą zwartą strukturę. Podobnymi osadami wypełnione były przestrzenie pomiędzy włóknami tworzącymi strukturę geowłókniny. Piasek pod geowłókniną był czysty na powierzchni, a osady były odłożone w szczelinach międzyziarnowych.

Na zdjęciach geowłóknin zasilanych zawiesiną kaolinu widać „przyklejone” ziarna kaolinu do włókien strukturalnych (rys. 88). Brak jest wypełniania przestrzeni międzywłóknowej, jak to stwierdzono dla bentonitu (rys. 86). Cząstki kaolinu odkładały się na powierzchni ziaren piasku tworząc charakterystyczną chropowatość powierzchni (rys. 89).

Przy infiltracji zawiesiny gliny, powstawały na powierzchni geowłóknin osady o strukturze zbliżonej do struktury osadów bentonitowych (porównaj rys. 85 z rys. 90). W tym wypadku jednak w geowłókninie nie stwierdzono tak silnego stopnia zakolmatowania przestrzeni strukturalnych syntetyku. Cząstki gliny odkładały się w geowłókninie podobnie do cząstek kaolinu (rys. 88 i rys. 91). Taki obraz tłumaczy mechanizm wnikania drobnych cząstek gliny w głąb złoża piaskowego. Przy braku placka osadów na powierzchni geowłókniny w

początkowej fazie eksperymentu drobne cząstki gliny przenikały przez geowłókninę i wnikały w pory piasku. Na zdjęciach złoża pod geowłókniną zalewaną zawiesiną gliny były widoczne cząstki odłożone zarówno na powierzchni ziaren, jak i w przestrzeniach międzyziarnowych.

Ciekawe jest porównanie zdjęć wykonanych mikroskopem elektronowym osadów odłożonych na powierzchni, wewnątrz i pod geowłókniną w czasie infiltracji zawiesiny z nanoplanktonem na ujęciu w Czyżkówku (rys. 60–62) z omawianymi zdjęciami. Skład granulometryczny zawiesin z rzeki Brdy znajdował się pomiędzy składem granulometrycznym zawiesin bentonitu a zawiesinami gliny (rys. 63). Na powierzchni osadów powstałych w Czyżkówku widać charakterystyczne formy dla nanoplanktonu oraz wykrystalizowanych minerałów, czego nie stwierdzono na zdjęciach przy infiltracji zawiesiny bentonitu lub gliny. Obraz zakolmatowania geowłókniny bentonitem lub gliną jest jednak podobny do kolmatacji geowłókniny w czasie infiltracji wody z rzeki Brdy (porównaj rys. 86 i 91 z rys. 57, 59 i 61).

Zdjęcia wykonane mikroskopem elektronowym pozwoliły wyjaśnić przyczyny większej kolmatacji złoża piaskowego kaolinem w porównaniu z kolmatacją przy infiltracji wody z zawiesiną bentonitu (gliny). Cząstki kaolinu są znacznie mniejsze od przestrzeni międzywłóknowej materiału syntetycznego, które są opisywane przez producentów geowłóknin parametrem O_{90} (jest to wymiar wielkości porów, które wraz z mniejszymi stanowią 90% porów w geowłókninie). W przypadku zawiesiny bentonitu i gliny oraz zawiesiny z rzeki Brdy obecne były cząstki o średnicach zastępczych większych od O_{90} . W tym wypadku dochodzi do szybkiego uszczelniania porów geowłóknin i tworzenia się filtru namywanego. Można z tego wyciągnąć wniosek, że ochronną funkcję geowłóknin można uzyskać wtedy, gdy parametr O_{90} będzie dostosowany do składu granulometrycznego infiltrowanej zawiesiny.

9.4.4 Badania elementarnego składu chemicznego

Dodatkowo wykonano analizę składu pierwiastkowego prób pobranych ze stanowisk z bentonitem, kaolinem i gliną na analizatorze chemicznym firmy Röntek. W tabeli 30 przedstawiono wyniki badań składu elementarnego prób pobranych z pojemników po zakończeniu eksperymentu.

Oceny głębokości wnikania cząstek bentonitu, kaolinu i gliny można dokonać analizując zawartość glinu, pierwiastka, który jest głównym składnikiem glinokrzemianów (tabele 26, 27, 28). Użyty do badań piasek kwarcowy był wolny od tego pierwiastka

Tabela 30

Zestawienie wyników analizy pierwiastkowej uzyskanych z analizatora chemicznego firmy Röntek dla trzech rodzajów analizowanych stanowisk modelowych

Pierwiastek	Udział procentowy pierwiastków w próbce (rodzaj geowłókniny)							
	Stanowisko z bentonitem (TS 10)			Stanowisko z kaolinem (TS 20)		Stanowisko z gliną (TS 10)		
	osad na	osad w	osad pod	osad w	osad pod	osad na	osad w	osad pod
	geowłókninie (geowłókniną)							
Wapń (Ca)	6,64	1,67	0,26	–	1,46	0,70	0,36	0,23
Żelazo (Fe)	2,15	0,73	–	0,42	–	3,46	2,35	1,0
Sód (Na)	2,48	0,14	1,37	–	–	1,08	–	–
Aluminium (Al)	6,72	0,93	2,87	3,89	4,56	8,65	2,42	3,21
Krzem (Si)	21,09	3,80	26,10	4,86	24,64	26,83	9,33	30,72
Fosfor (P)	5,03	0,60	–	–	–	–	–	–
Potas (K)	0,91	0,24	–	0,19	–	1,70	0,78	0,61
Magnez (Mg)	1,45	0,04	0,82	–	0,70	1,01	–	–

W warstwie osadów odłożonych na powierzchni geowłóknin stosunek Al/Si wynosił 0,32 zarówno dla pojemników zasilanych zawiesiną bentonitu, jak i gliny, co odpowiada w przybliżeniu stosunkowi tych pierwiastków, występujących w analizowanych substancjach użytych do sporządzania zawiesin.

W osadzie zgromadzonym w geowłókninie wartość stosunku Al/Si wynosiła 0,24 dla stanowisk z bentonitem, 0,26 z gliną i 0,8 dla stanowiska z kaolinem. Najmniejsze wartości stosunku Al/Si, mieszczące się w zakresie 0,10–0,18, stwierdzono w próbach osadu pobranego spod geowłókniny.

Największa ilość wapnia, potasu i żelaza znajduje się w osadach powstałych z bentonitu i gliny. Udział tych pierwiastków był mniejszy w próbach zakolmatowanej geowłókniny i w próbach pobranych pod powierzchnią geosyntetyku. Zjawisko to można wiązać z wytrącaniem się soli na powierzchni osadów w czasie odparowywania wody w okresach pomiędzy kolejnymi zalaniem zawiesiną.

10 Badania oporu hydraulicznego warstwy zakolmatowanej

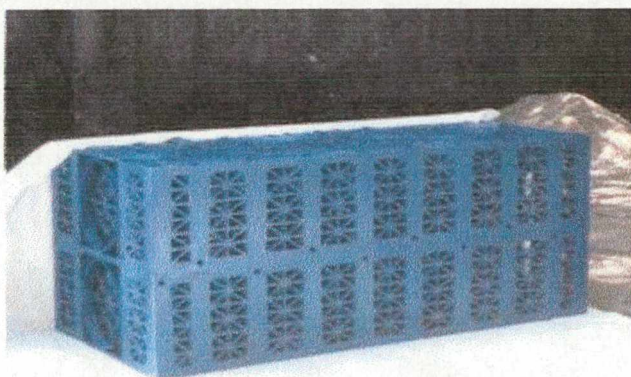
10.1 Cel i zakres badań

Badania laboratoryjne wykazały, że w przypadku stosowania zawiesiny kaolinu dochodzi do głębokiej kolmatacji gruntu, natomiast przy infiltracji bentonitu proces kolmatacji gruntu jest ograniczony, gdyż zawiesina odkłada się głównie na powierzchni i wewnątrz geowłókniny. W podobny sposób przebiegał proces zatrzymywania zawiesin na stanowisku w Czyżkówku, gdzie do badań użyto wody z Brdy z podwyższoną zawartością nanoplanktonu.

Badania, które przeprowadzono na stanowisku zlokalizowanym na terenie należącym do Zakładu Techniki Sanitarnej Wsi Akademii Rolniczej we Wrocławiu miały na celu wykazanie, czy opracowane modele zmian wysokości w czasie napełniania zbiornika infiltracyjnego ze stałym dopływem wody z zawiesiną (równanie 55) oraz opadania zwierciadła wody przy braku zasilania wodą (równanie 58) można stosować do identyfikacji oporu zastępczego warstwy zakolmatowanej przy powierzchniowym odkładaniu się osadów (zawiesina bentonitu) i wzmożonej głębokiej kolmatacji (zawiesina kaolinu).

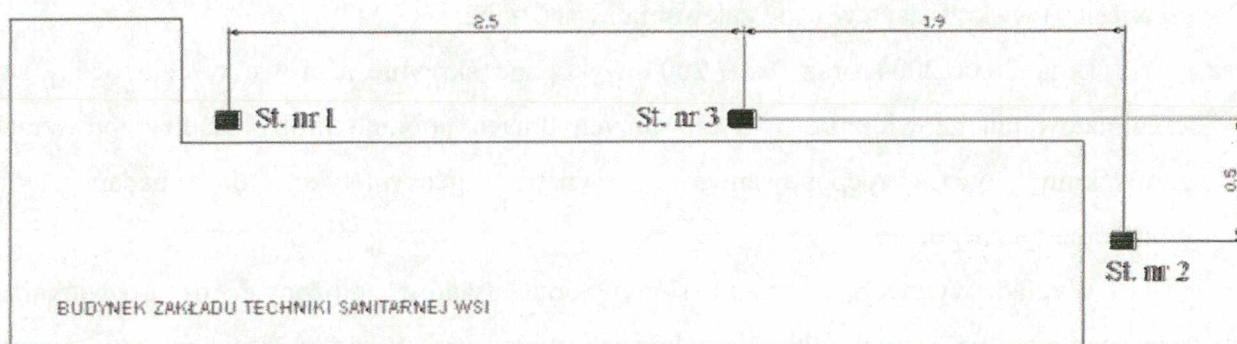
10.2 Charakterystyka obiektu badawczego

Stanowisko zlokalizowane przy ul. Dicksteina we Wrocławiu na terenie Zakładu Techniki Sanitarnej Wsi Akademii Rolniczej wykonane było z modułów AZURA firmy Wavin stosowanych do podziemnej infiltracji wód deszczowych. Podstawowym elementem tego systemu są skrzynie wykonane z polipropylenu o szerokości 0,5 m, długości 0,4 m i wysokości 1,0 m, w których 43% powierzchni ścian stanowią otwory umożliwiające przesiąkanie dopływającej wody do gruntu (rys. 92).



Rys. 93. Skrzynia ażurowa systemu AZURA

W skład stanowiska wchodziły trzy skrzynie, które zostały owinięte geowłókniną polipropylenową GEOTESS o nazwie handlowej PP 150 o grubości 1,6 mm. Na rysunku 94 przedstawiono szkic rozmieszczenia skrzyń, a na rysunku 95 zdjęcie zakopanej skrzyni przygotowanej do badań.



Rys. 94. Plan rozmieszczenia skrzyń do infiltracji wód opadowych systemu AZURA na stanowisku we Wrocławiu



Rys. 95. Widok przygotowanej skrzyni systemu AZURA do badań

10.3 Metodyka badań

Przed rozpoczęciem badań w miejscu lokalizacji skrzyń ażurowych określono właściwości fizyczne gruntów oraz obsypek żwirowych zastosowanych jako warstwa rozsączająca. Metodykę i wyniki tych badań zamieszczono w załączniku 3.

Skrzynię ażurową 1 zalewano zawiesiną bentonitu, natomiast skrzynie 2 i 3 zawiesiną kaolinu. Jednorazowo do skrzyń wprowadzano 60 dm^3 zawiesiny bentonitu (kaolinu) o stężeniu $2,5 \text{ g/dm}^3$. Do badań stosowano zawiesinę sporządzoną na bazie wody wodociągowej oraz po kilkudniowym okresie namoczenia, aby wyeliminować proces pęcznienia minerałów. Czas zalewania wynosił 8–10 minut.

Badania prowadzono w okresie od 18.06.2003 do 14.06.2004. W tym czasie skrzynie 3 i 2 zalewano z częstotliwością średnio raz na tydzień, natomiast skrzynię 1 zalano zawiesziną bentonitu tylko 13 razy z uwagi na bardzo długi czas wsiąkania wody, który w ostatnich eksperymentach trwał do 8 godzin. W czasie badań dokonywano odczyty poziomu wody (zawiesiny) w skrzyniach w fazie zalewania i wsiąkania.

Dnia 28.06.2004 oraz 02.07.2004 wykopano skrzynie ażurowe w celu oceny stanu zakolmatowania geowłóknin. W tych samych dniach pobrano próby osadu z powierzchni geowłóknin oraz zdeponowanego wewnątrz geosyntetyku do badań składu granulometrycznego.

Wygląd wyjętych z gruntu skrzyń oraz osadów odłożonych na geowłókninach przedstawiono na rys. 96–98. Na zdjęciach widać, że w przypadku bentonitu powstało znacznie więcej osadów niż przy kaolinie.



Rys. 96. Wygląd skrzyni 1 (zalewanej zawiesziną bentonitu) po wyjęciu z gruntu oraz rozmieszczenie osadu na geowłókninie od strony wewnętrznej



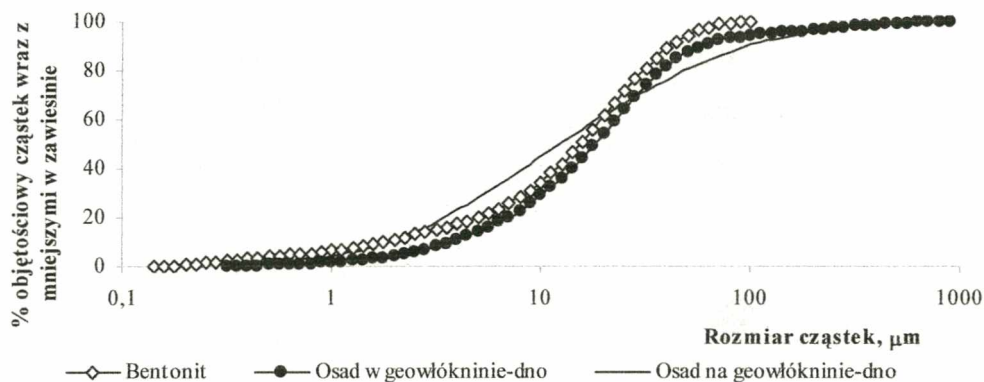
Rys. 97. Wygląd skrzyni 2 (zalewanej zawiesziną kaolinu) po wyjęciu z gruntu oraz rozmieszczenie osadu na geowłókninie od strony wewnętrznej



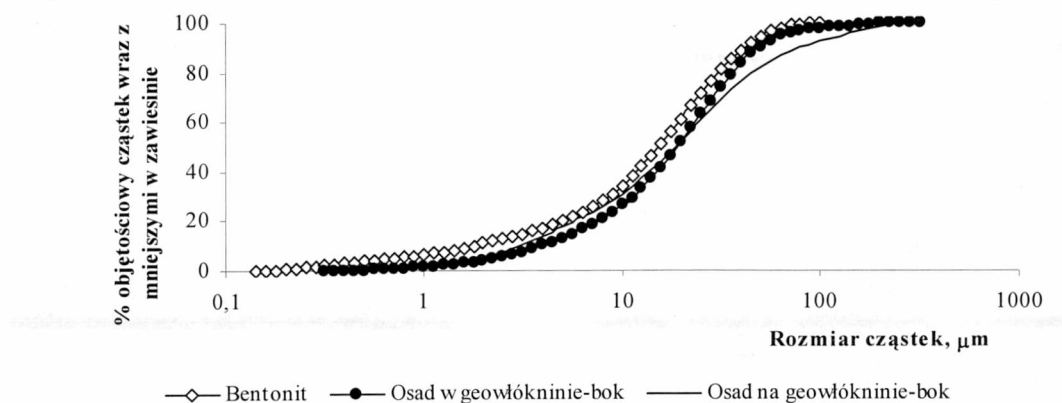
Rys. 98. Wygląd skrzyni 3 (zalewanej zawiesiną kaolinu) po wyjęciu z gruntu oraz rozmieszczenie osadu na geowłókninie od strony wewnętrznej

10.4 Wyniki badań osadów

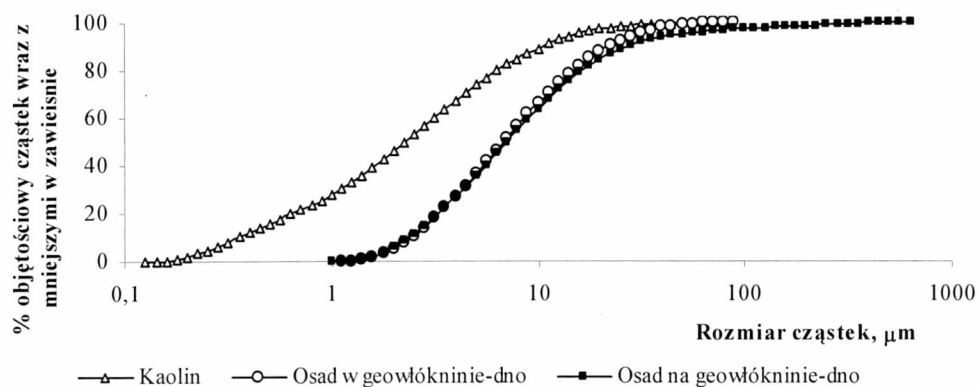
Na rysunkach 99–104 przedstawiono wyniki badań składu granulometrycznego osadów zgromadzonych na powierzchni i wewnątrz geowłókniny. Badania wykonano dla osadów pobranych z dna skrzyni oraz ścian bocznych.



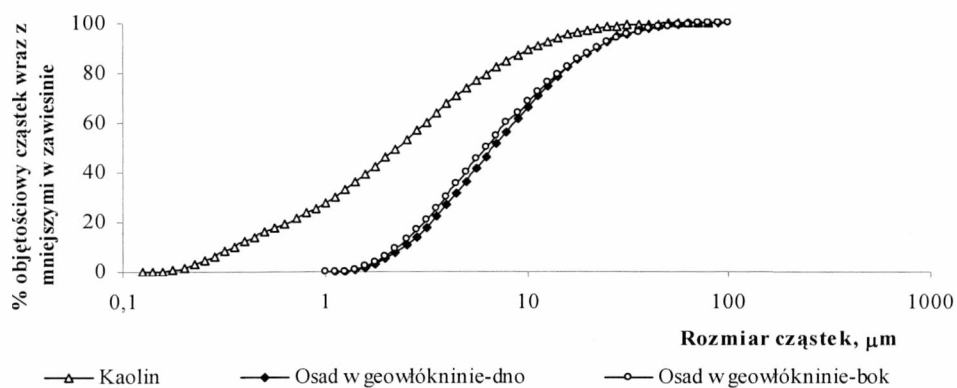
Rys. 99. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonym na powierzchni i wewnątrz geowłókniny na dnie skrzyni ażurowej 1



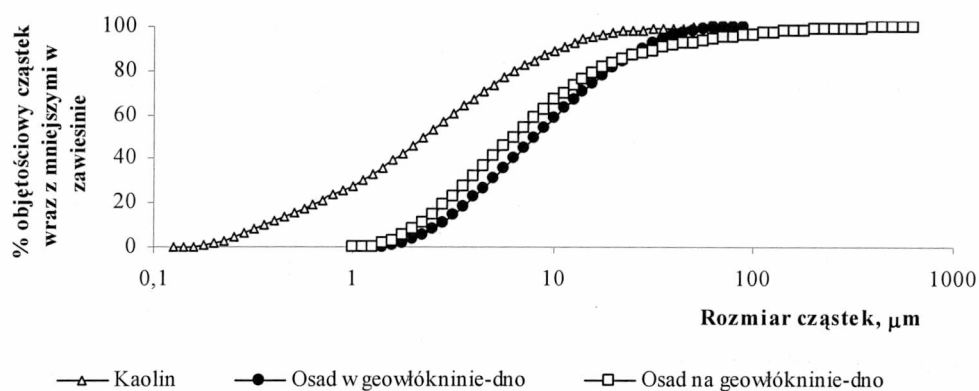
Rys. 100. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego na geowłókninie i w jej wnętrzu na bocznych ścianach skrzyni ażurowej 1



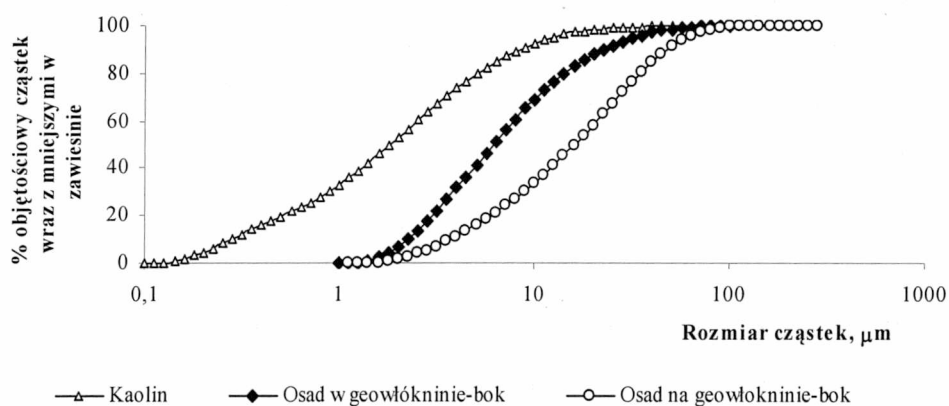
Rys. 101. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonym na powierzchni i wewnątrz geowłókniny na dnie skrzyni ażurowej 2



Rys. 102. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego we wnętrzu geowłókniny na dnie oraz bocznych ścianach skrzyni ażurowej 2



Rys. 103. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego na powierzchni i wewnątrz geowłókniny na dnie skrzyni ażurowej 3



Rys. 104. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin kaolinu użytego do zalewania ze składem granulometrycznym osadu odłożonego na geowłókninie i w jej wnętrzu bocznych ścianach skrzyni ażurowej 3

W przypadku bentonitu, skład granulometryczny osadów był zbliżony do składu granulometrycznego cząstek w zawieszynie podawanej na stanowisko. W przypadku kaolinu, cząstki wchodzące w skład osadów były większe od cząstek kaolinu wprowadzanego z zawiesziną. Prawdopodobnie jest to wynik łączenia się cząstek i tworzenia większych aglomeratów. Składy granulometryczne osadów powstałych na powierzchni geowłókniny leżącej na dnie, jak i na ścianach skrzyni były do siebie zbliżone.

Ustalono, że w przypadku skrzyni 1 zalewanej bentonitem w osadach zdeponowanych na dnie znajdowało się 79,05 %, a w geowłókninie 3,1 % całkowitej masy bentonitu wprowadzonego w postaci zawieszyny. Na geowłókninie pokrywającej ściany boczne odłożyło się 14,8 % zawieszyny bentonitu. W głąb gruntu wniknęło 3,05 % całkowitej ilości bentonitu wprowadzonego podczas badań z wodą przeznaczoną do infiltracji.

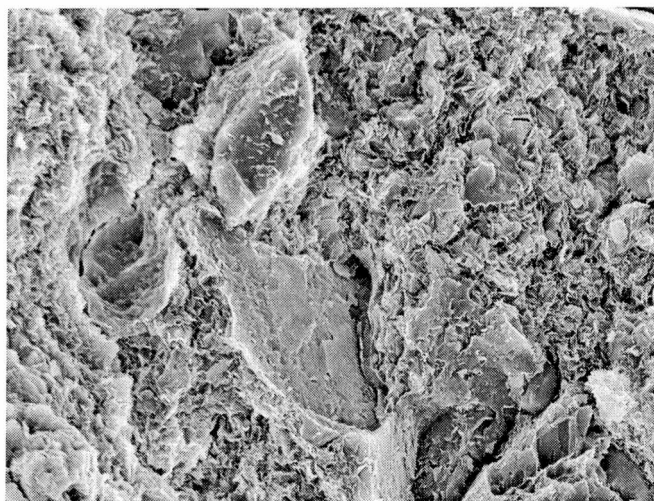
W skrzyni 2 zalewanej zawiesiną kaolinu masa osadów odłożonych na dnie stanowiła 41%, a wewnątrz geowłókniny 1,8 % masy kaolinu wprowadzonego z infiltrującą wodą. W geowłókninie na ścianach bocznych odłożyło się 5,6% masy kaolinu użytego do badań. Łącznie geowłóknina zatrzymała 48,4% masy kaolinu wprowadzonej z infiltrującą wodą. Do gruntu przedostało się 51,6% masy kaolinu użytego do badań.

Podobne wyniki uzyskano dla skrzyni 3, gdzie na dnie w postaci osadu odłożyło się 50,8 %, w geowłókninie ułożonej na dnie 2,2 %, a w geowłókninie pokrywającej ściany boczne skrzyni 5,8% masy użytego do badań kaolinu. Do gruntu przedostało się 41,2% masy kaolinu zawartego w infiltrującej do gruntu wodzie.

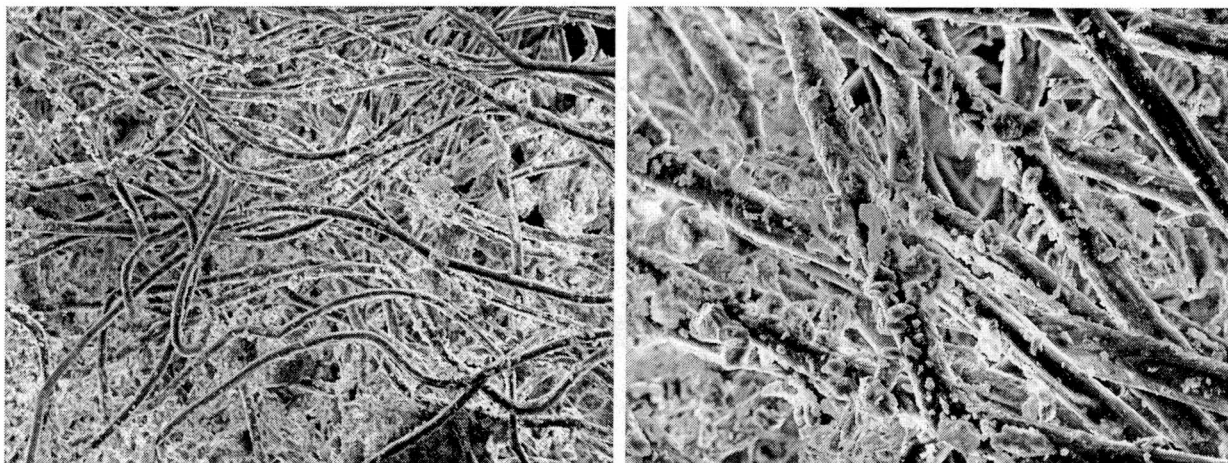
Uzyskane wyniki potwierdziły wniosek wynikający z badań przeprowadzonych w skali laboratoryjnej, że przy drobnych cząstkach zawiesiny przenikają one przez geowłókninę i powodują kolmatację gruntu.

Na rysunkach 105–115 przedstawiono wybrane zdjęcia wykonane mikroskopem elektronowym. Widoczne są różnice w strukturze powstałych osadów bentonitowych i koalinitowych.

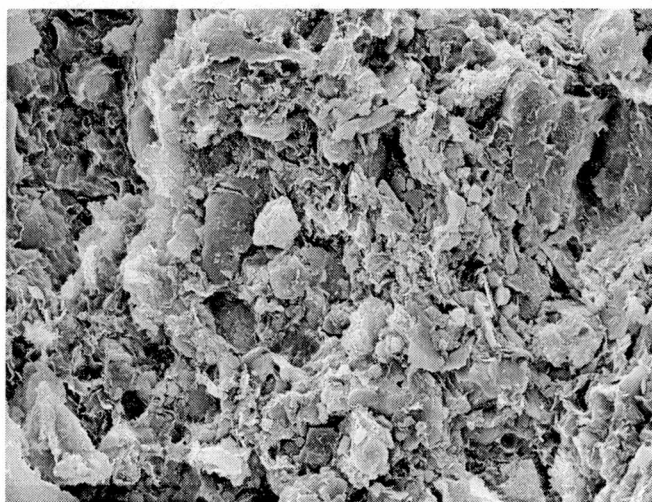
Porównując zdjęcia wykonane mikroskopem elektronowym próbek geowłókniny zalewanej zawiesiną kaolinu pobranych po zakończeniu badań laboratoryjnych (rys. 88) ze zdjęciami wykonanymi dla próbek pobranych ze skrzyni 2 i 3 (rys. 110, 111, 113 i 115) widoczne są różnice w stopniu zakolmatowania geowłóknin. Dla próbek ze skrzyń 2 i 3 widoczne są zwarte i pierzaste struktury odłożonego kaolinu wewnątrz geowłókniny. Oznacza to, że przy większej masie zawiesin wprowadzanej na geowłókninę dochodzi do jej zakolmatowania.



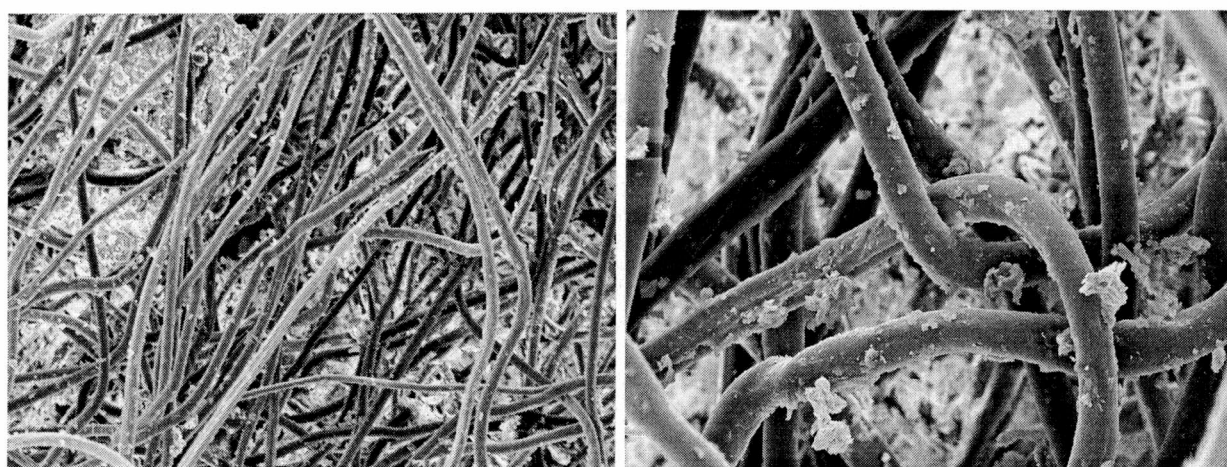
Rys. 105. Zdjęcie skaningowe osadu bentonitu odłożonego na powierzchni geowłókniny na dnie skrzyni 1 (powiększenie 4000 razy)



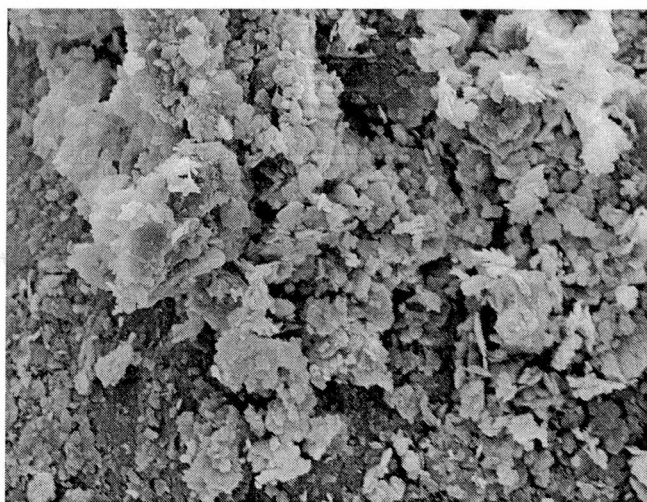
Rys. 106. Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie na dnie skrzyni w stanowisku nr 1 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



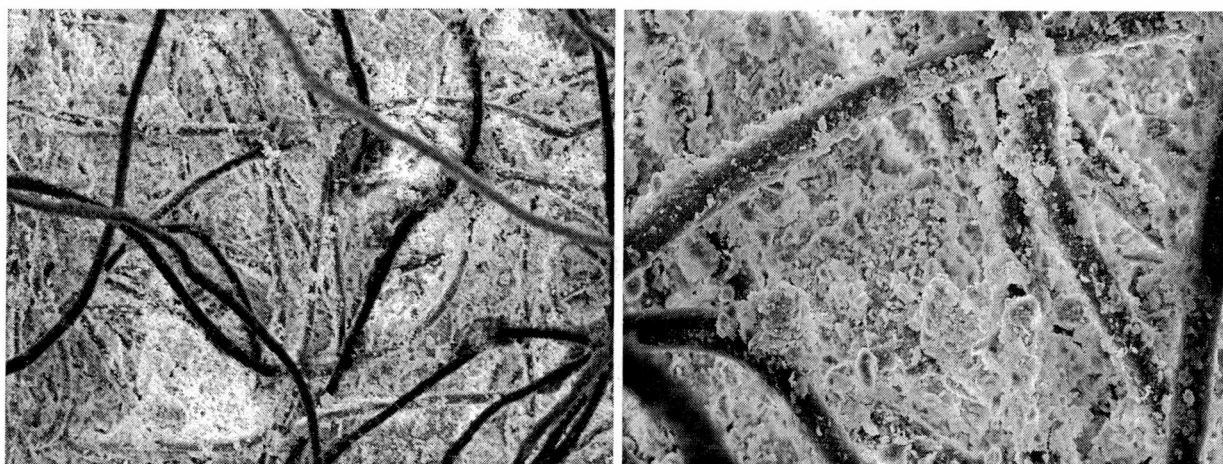
Rys. 107. Zdjęcie skaningowe osadu bentonitu odłożonego na powierzchni geowłókniny na bocznej ścianie skrzyni w stanowisku nr 1 przy powiększeniu 4000 razy



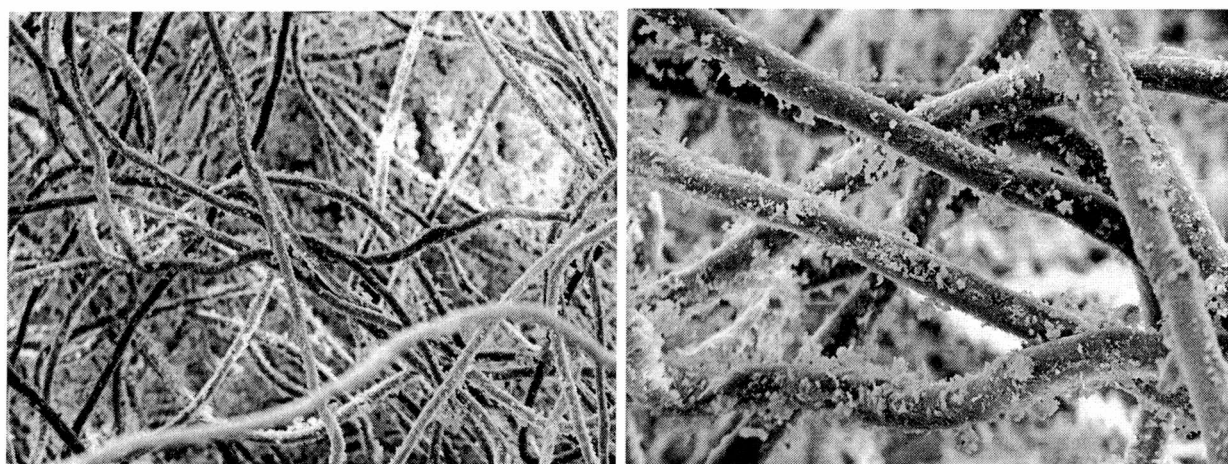
Rys. 108. Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie ułożonej na bocznej ścianie skrzyni 1 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



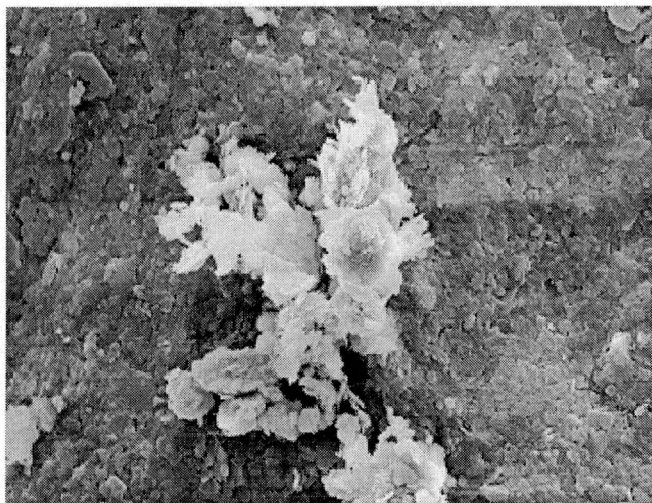
Rys. 109. Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego na powierzchni geowłókniny na dnie skrzyni 2 (powiększenie 4000 razy)



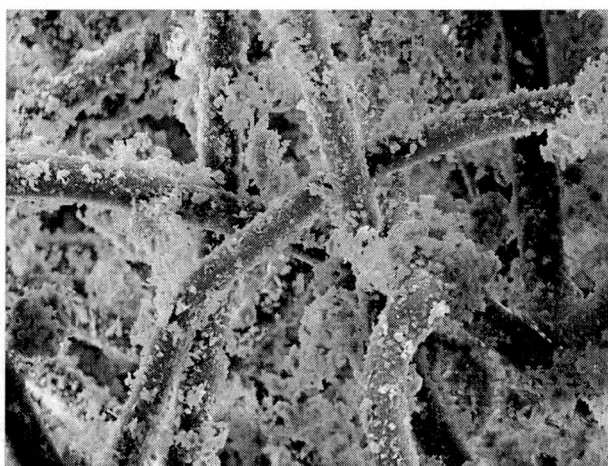
Rys. 110. Zdjęcia skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na dnie skrzyni 2 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



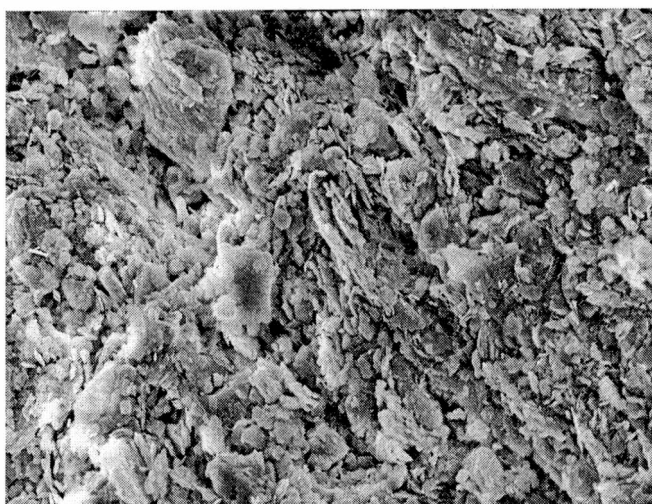
Rys. 111. Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na bocznych ścianach skrzyni 2 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



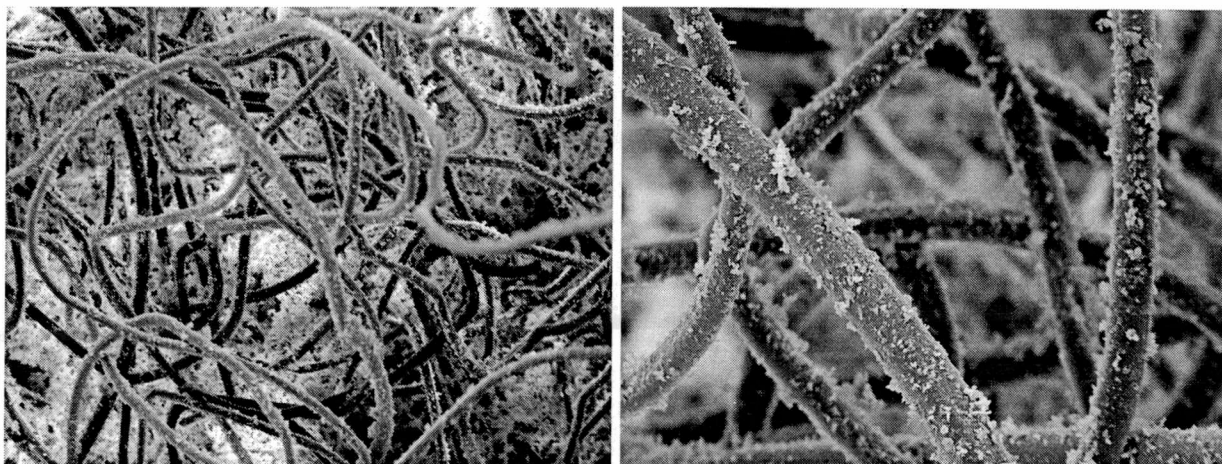
Rys. 112. Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego na powierzchni geowłókniny na dnie skrzyni 3 (powiększenie 4000 razy)



Rys. 113. Zdjęcia skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na dnie skrzyni 3 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)



Rys. 114. Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego na powierzchni geowłókniny na bocznych ścianach skrzyni 3 (powiększenie 4000 razy)



Rys. 115. Zdjęcie skaningowe osadu kaolinu odłożonego w geowłókninie na bocznych ścianach skrzyni 3 przy powiększeniu 250 razy (po lewej) i 1000 razy (po prawej)

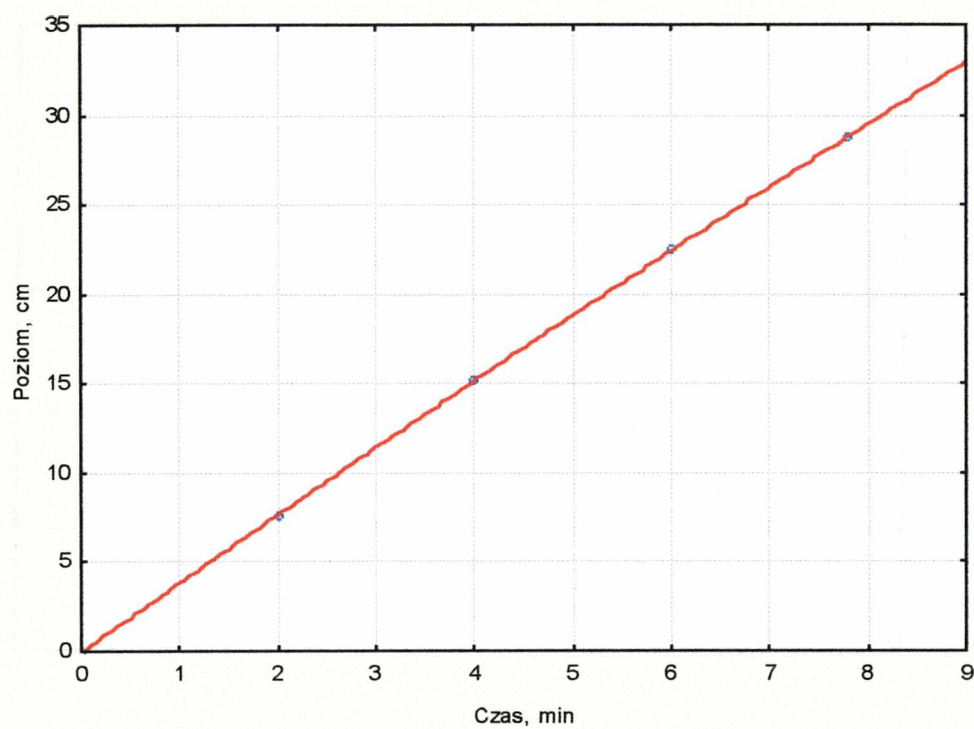
10.5 Modelowanie zmian poziomu wody w czasie zalewania skrzynek chłonnych

Głównym celem omawianych badań było wykazanie, czy opracowane modele zmian wysokości w czasie napełniania zbiornika infiltracyjnego ze stałym dopływem wody z zawiesiną (równanie 55) oraz opadania zwierciadła wody przy braku zasilania wodą (równanie 58) poprawnie opisują obserwowane zmiany. Na rysunkach 116–121 przedstawiono przykładowe wykresy obserwowanych zmian wysokości poziomu wody w skrzynkach infiltracyjnych i wyliczonych przy wykorzystaniu programu STATISTICA 6.0 PL funkcji regresji opisanych ogólnym modelem (55). Szczegółowe równania dla poszczególnych serii badawczych przedstawiono w tabelach 31–33.

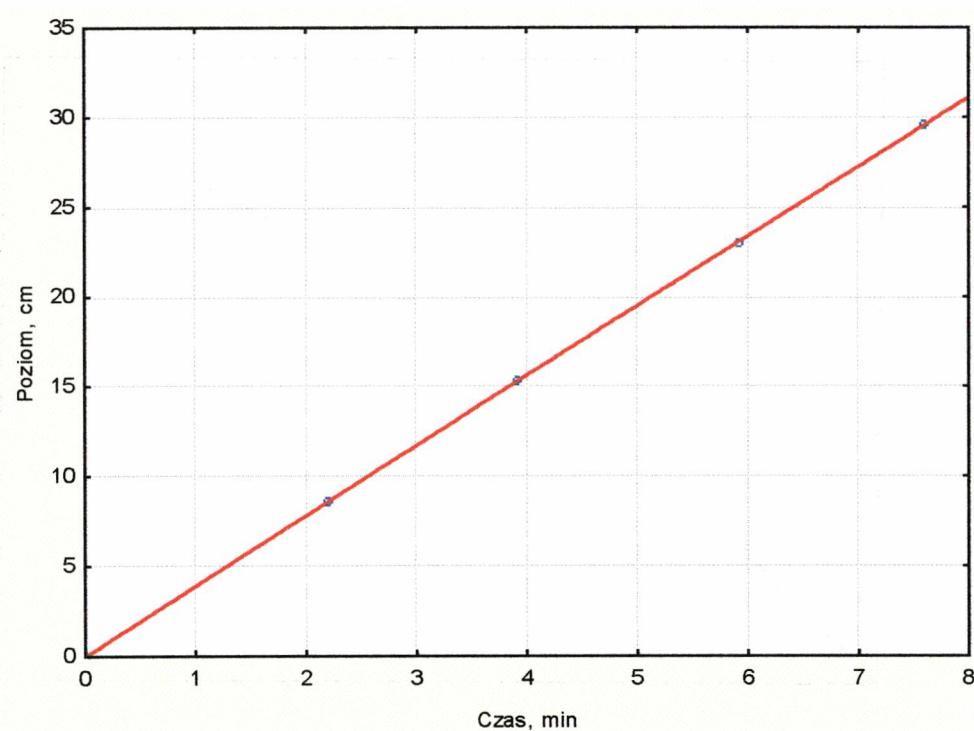
Tabela 31

Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie zalewania skrzyni 1

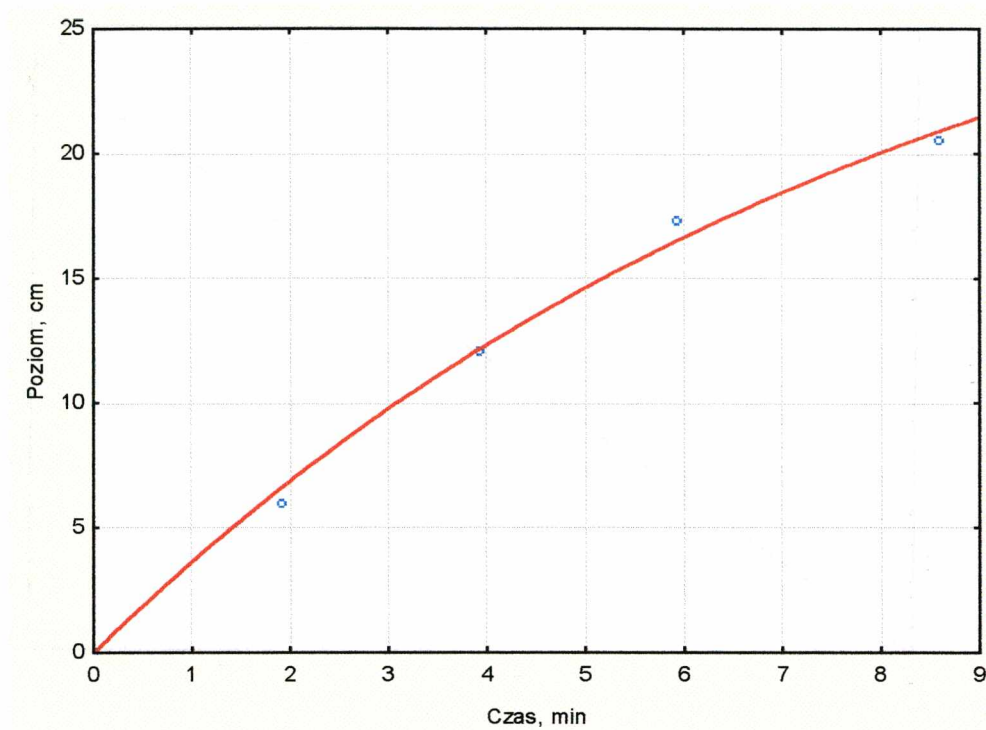
Data pomiaru	R ²	Równanie modelu
18.06.03	0,987	$H=3,0 \cdot (14,10500) \cdot (1-\exp(-t/(14,10500)))$
23.06.03	0,985	$H=3,0 \cdot (35,89890) \cdot (1-\exp(-t/(35,89890)))$
25.06.03	0,994	$H=2,8 \cdot (59,89100) \cdot (1-\exp(-t/(59,89100)))$
30.07.03	0,999	$H=3,9 \cdot (70,65140) \cdot (1-\exp(-t/(70,65140)))$
01.09.03	0,966	$H=3,8 \cdot (63,97130) \cdot (1-\exp(-t/(63,97130)))$
22.09.03	0,995	$H=4,0 \cdot (90,23640) \cdot (1-\exp(-t/(90,23640)))$
15.10.03	0,999	$H=3,2 \cdot (180,2127) \cdot (1-\exp(-t/(180,2127)))$
28.10.03	0,999	$H=3,7 \cdot (242,2481) \cdot (1-\exp(-t/(242,2481)))$
24.11.03	0,995	$H=3,5 \cdot (257,5992) \cdot (1-\exp(-t/(257,5992)))$
01.03.04	0,996	$H=3,5 \cdot (272,1088) \cdot (1-\exp(-t/(272,1088)))$
15.03.04	0,992	$H=3,5 \cdot (309,6934) \cdot (1-\exp(-t/(309,6934)))$
05.04.04	0,996	$H=5,0 \cdot (325,8390) \cdot (1-\exp(-t/(325,8390)))$
27.04.04	0,998	$H=3,1 \cdot (344,4712) \cdot (1-\exp(-t/(344,4712)))$



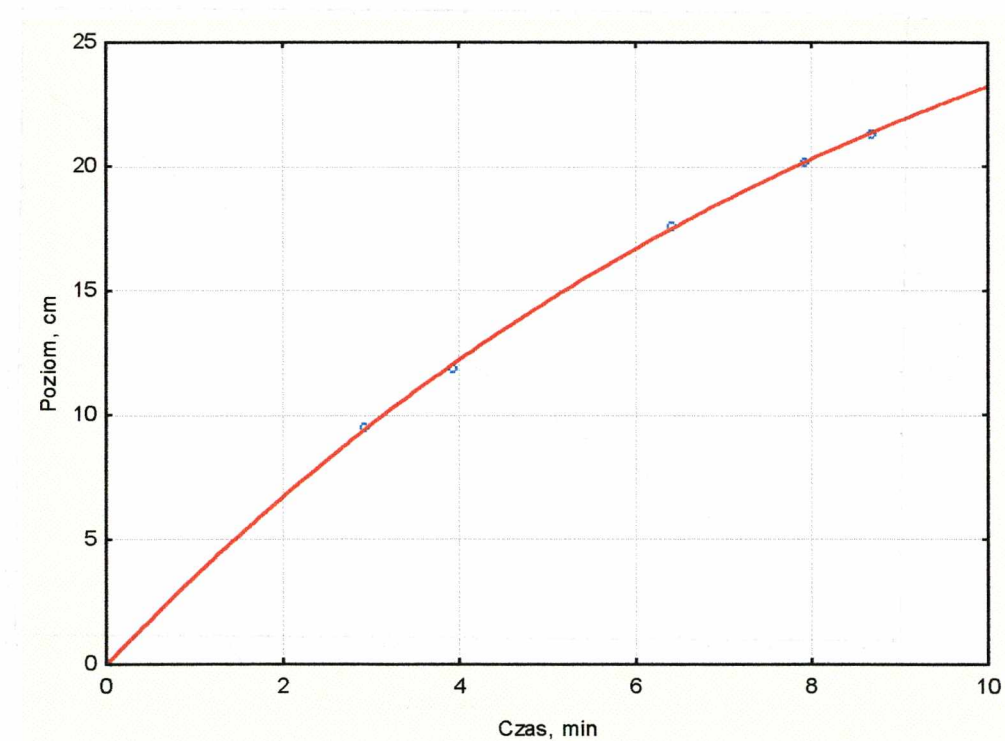
Rys. 116. Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 1 zawiesiną bentonitu obserwowane 30.07.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55)



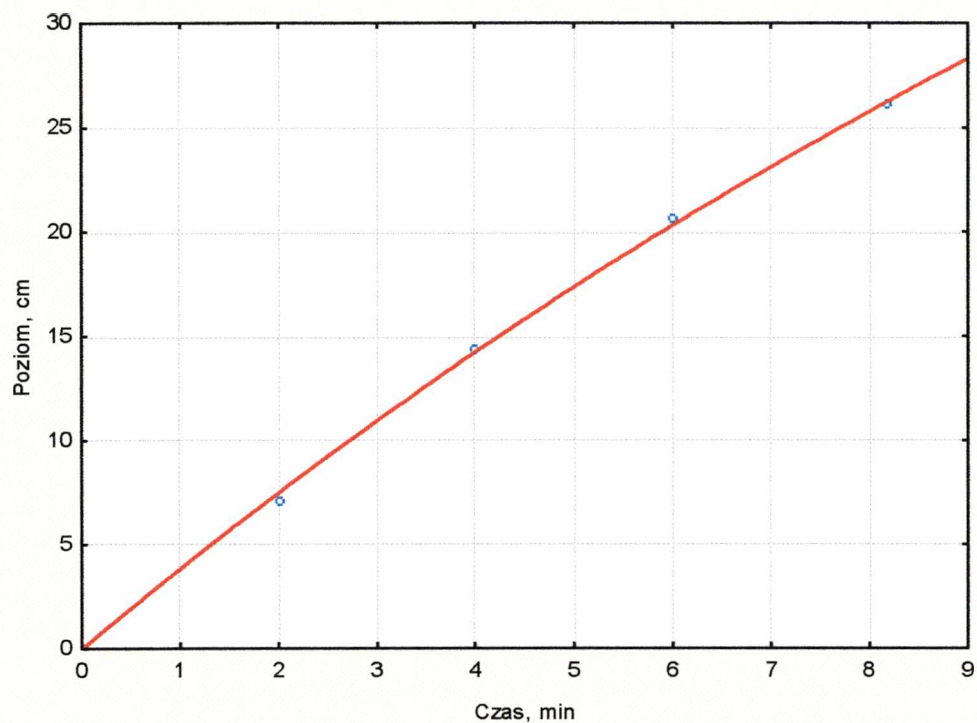
Rys. 117. Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 1 zawiesiną bentonitu obserwowane 22.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55)



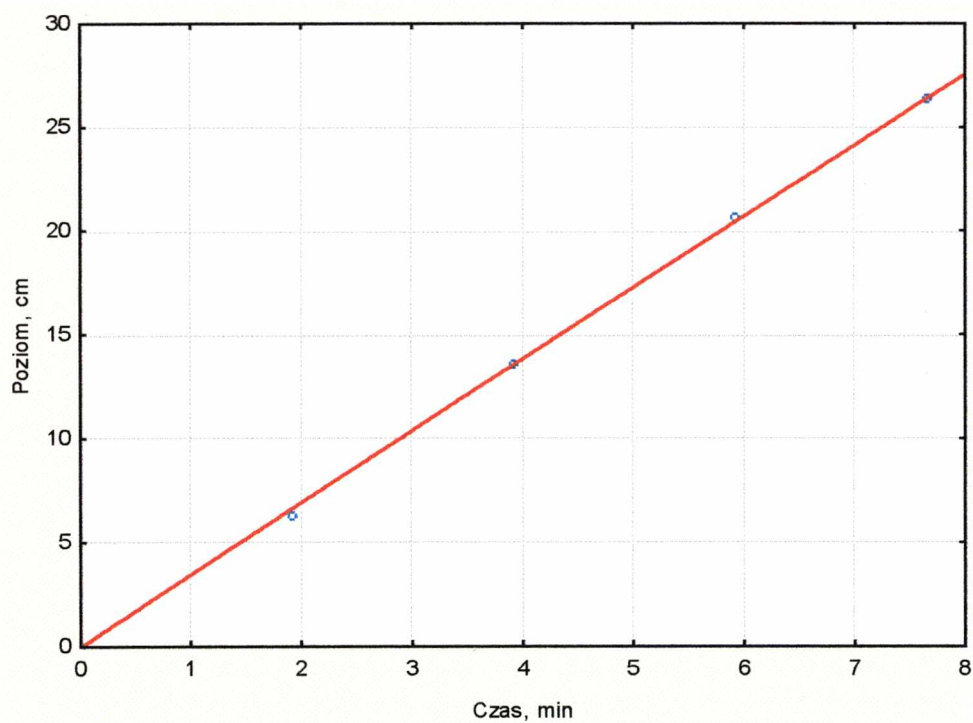
Rys. 118. Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 2 zawiesiną kaolinu obserwowane 28.08.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55)



Rys. 119. Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 2 zawiesiną kaolinu obserwowane 15.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55)



Rys. 120. Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 3 zawiesiną kaolinu obserwowane 30.07.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55)



Rys. 121. Porównanie zmian poziomu wody w czasie zalewania stanowiska 3 zawiesiną kaolinu obserwowane 01.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (55)

Tabela 32

Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie zalewania skrzyni 2

Data pomiaru	R ²	Równanie modelu
23.06.03	0,858	$H=3,02 \cdot (2,61490) \cdot (1-\exp(-t/(2,61490)))$
25.06.03	0,999	$H=2,63 \cdot (4,97540) \cdot (1-\exp(-t/(4,97540)))$
27.06.03	0,988	$H=2,85 \cdot (5,82200) \cdot (1-\exp(-t/(5,82200)))$
30.06.03	0,952	$H=3,75 \cdot (5,05300) \cdot (1-\exp(-t/(5,05300)))$
03.07.03	0,967	$H=4,29 \cdot (3,79390) \cdot (1-\exp(-t/(3,79390)))$
07.07.03	0,926	$H=3,33 \cdot (4,09340) \cdot (1-\exp(-t/(4,09340)))$
09.07.03	0,978	$H=2,45 \cdot (17,3780) \cdot (1-\exp(-t/(17,3780)))$
11.07.03	0,995	$H=2,80 \cdot (7,94160) \cdot (1-\exp(-t/(7,94160)))$
14.07.03	0,982	$H=4,02 \cdot (5,54980) \cdot (1-\exp(-t/(5,54980)))$
16.07.03	0,992	$H=2,70 \cdot (8,68270) \cdot (1-\exp(-t/(8,68270)))$
23.07.03	0,985	$H=3,69 \cdot (4,82570) \cdot (1-\exp(-t/(4,82570)))$
25.07.03	0,987	$H=3,69 \cdot (7,02210) \cdot (1-\exp(-t/(7,02210)))$
28.07.03	0,987	$H=3,83 \cdot (6,58930) \cdot (1-\exp(-t/(6,58930)))$
30.07.03	0,989	$H=3,46 \cdot (5,48020) \cdot (1-\exp(-t/(5,48020)))$
04.08.03	0,991	$H=3,42 \cdot (8,70890) \cdot (1-\exp(-t/(8,70890)))$
06.08.03	0,976	$H=3,00 \cdot (13,3847) \cdot (1-\exp(-t/(13,3847)))$
08.08.03	0,991	$H=3,67 \cdot (9,81340) \cdot (1-\exp(-t/(9,81340)))$
11.08.03	0,994	$H=3,67 \cdot (9,00300) \cdot (1-\exp(-t/(9,00300)))$
13.08.03	0,994	$H=3,60 \cdot (11,0483) \cdot (1-\exp(-t/(11,0483)))$
18.08.03	0,989	$H=3,75 \cdot (12,0288) \cdot (1-\exp(-t/(12,0288)))$
21.08.03	0,985	$H=3,91 \cdot (6,00980) \cdot (1-\exp(-t/(6,00980)))$
25.08.03	0,994	$H=3,91 \cdot (9,56480) \cdot (1-\exp(-t/(9,56480)))$
28.08.03	0,993	$H=3,50 \cdot (11,5718) \cdot (1-\exp(-t/(11,5718)))$
08.09.03	0,994	$H=3,67 \cdot (14,4919) \cdot (1-\exp(-t/(14,4919)))$
15.09.03	0,998	$H=3,46 \cdot (12,3997) \cdot (1-\exp(-t/(12,3997)))$
25.09.03	0,994	$H=3,89 \cdot (16,7667) \cdot (1-\exp(-t/(16,7667)))$
30.09.03	0,993	$H=3,67 \cdot (15,1671) \cdot (1-\exp(-t/(15,1671)))$
27.10.03	0,994	$H=3,33 \cdot (17,8123) \cdot (1-\exp(-t/(17,8123)))$
03.11.03	0,987	$H=3,08 \cdot (22,7583) \cdot (1-\exp(-t/(22,7583)))$
24.11.03	0,984	$H=3,67 \cdot (18,9789) \cdot (1-\exp(-t/(18,9789)))$
08.12.03	0,987	$H=3,64 \cdot (17,9578) \cdot (1-\exp(-t/(17,9578)))$
10.12.03	0,996	$H=3,75 \cdot (22,9453) \cdot (1-\exp(-t/(22,9453)))$
08.03.04	0,992	$H=3,75 \cdot (16,9889) \cdot (1-\exp(-t/(16,9889)))$
05.04.04	0,994	$H=3,56 \cdot (22,7619) \cdot (1-\exp(-t/(22,7619)))$
27.04.04	0,997	$H=3,67 \cdot (12,5941) \cdot (1-\exp(-t/(12,5941)))$
04.05.04	0,997	$H=3,05 \cdot (21,2757) \cdot (1-\exp(-t/(21,2757)))$
17.05.04	0,990	$H=3,46 \cdot (21,6722) \cdot (1-\exp(-t/(21,6722)))$
24.05.04	0,978	$H=3,05 \cdot (22,6613) \cdot (1-\exp(-t/(22,6613)))$
07.06.04	0,989	$H=3,00 \cdot (32,6126) \cdot (1-\exp(-t/(32,6126)))$
14.06.04	0,999	$H=3,60 \cdot (14,3217) \cdot (1-\exp(-t/(14,3217)))$

Tabela 33

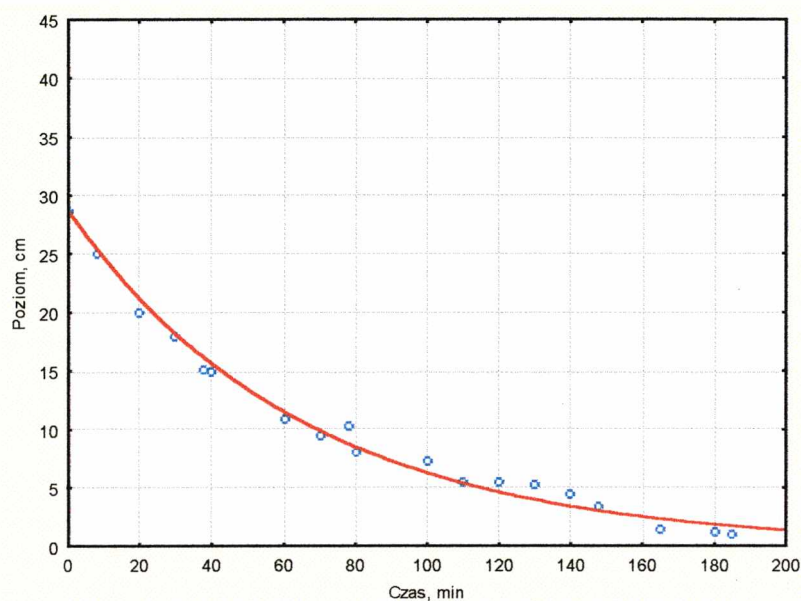
Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie zalewania skrzyni 3

Data pomiaru	R ²	Równanie modelu
07.07.03	0,992	$H=2,67 \cdot (11,5669) \cdot (1-\exp(-t/(11,5669)))$
09.07.03	0,996	$H=3,28 \cdot (14,6473) \cdot (1-\exp(-t/(14,6473)))$
11.07.03	0,998	$H=2,90 \cdot (30,5829) \cdot (1-\exp(-t/(30,5829)))$
14.07.03	0,989	$H=2,43 \cdot (24,8157) \cdot (1-\exp(-t/(24,8157)))$
16.07.03	0,993	$H=2,77 \cdot (43,9657) \cdot (1-\exp(-t/(43,9657)))$
23.07.03	0,999	$H=3,61 \cdot (23,5688) \cdot (1-\exp(-t/(23,5688)))$
25.07.03	0,999	$H=3,00 \cdot (30,7399) \cdot (1-\exp(-t/(30,7399)))$
28.07.03	0,996	$H=3,10 \cdot (24,9619) \cdot (1-\exp(-t/(24,9619)))$
30.07.03	0,998	$H=3,67 \cdot (32,3436) \cdot (1-\exp(-t/(32,3436)))$
01.08.03	0,998	$H=3,42 \cdot (52,8039) \cdot (1-\exp(-t/(52,8039)))$
04.08.03	0,996	$H=3,10 \cdot (36,3465) \cdot (1-\exp(-t/(36,3465)))$
06.08.03	0,998	$H=3,53 \cdot (42,2030) \cdot (1-\exp(-t/(42,2030)))$
11.08.03	0,999	$H=3,43 \cdot (24,1727) \cdot (1-\exp(-t/(24,1727)))$
13.08.03	0,999	$H=3,53 \cdot (34,2243) \cdot (1-\exp(-t/(34,2243)))$
18.08.03	0,999	$H=3,75 \cdot (19,0803) \cdot (1-\exp(-t/(19,0803)))$
21.08.03	0,998	$H=3,46 \cdot (26,2075) \cdot (1-\exp(-t/(26,2075)))$
25.08.03	0,998	$H=3,69 \cdot (31,4594) \cdot (1-\exp(-t/(31,4594)))$
28.08.03	0,998	$H=3,56 \cdot (51,0908) \cdot (1-\exp(-t/(51,0908)))$
01.09.03	0,997	$H=3,91 \cdot (26,4999) \cdot (1-\exp(-t/(26,4999)))$
04.09.03	0,998	$H=3,92 \cdot (14,4238) \cdot (1-\exp(-t/(14,4238)))$
08.09.03	0,997	$H=3,14 \cdot (47,0455) \cdot (1-\exp(-t/(47,0455)))$
15.09.03	0,999	$H=3,53 \cdot (28,5567) \cdot (1-\exp(-t/(28,5567)))$
25.09.03	0,999	$H=3,44 \cdot (57,6635) \cdot (1-\exp(-t/(57,6635)))$
27.10.03	0,999	$H=3,60 \cdot (26,9796) \cdot (1-\exp(-t/(26,9796)))$
29.10.03	0,999	$H=3,00 \cdot (63,0040) \cdot (1-\exp(-t/(63,0040)))$
03.11.03	0,999	$H=3,53 \cdot (74,5045) \cdot (1-\exp(-t/(74,5045)))$
24.11.03	0,999	$H=3,00 \cdot (64,3998) \cdot (1-\exp(-t/(64,3998)))$
08.12.03	0,999	$H=3,00 \cdot (93,4842) \cdot (1-\exp(-t/(93,4842)))$
10.12.03	0,999	$H=3,18 \cdot (92,5497) \cdot (1-\exp(-t/(92,5497)))$
08.03.04	0,999	$H=3,53 \cdot (79,2267) \cdot (1-\exp(-t/(79,2267)))$
15.03.04	0,989	$H=2,93 \cdot (22,7640) \cdot (1-\exp(-t/(22,7640)))$
29.03.04	0,998	$H=3,60 \cdot (31,9132) \cdot (1-\exp(-t/(31,9132)))$
17.05.04	0,985	$H=3,00 \cdot (28,0552) \cdot (1-\exp(-t/(28,0552)))$
24.05.04	0,999	$H=3,16 \cdot (66,1332) \cdot (1-\exp(-t/(66,1332)))$

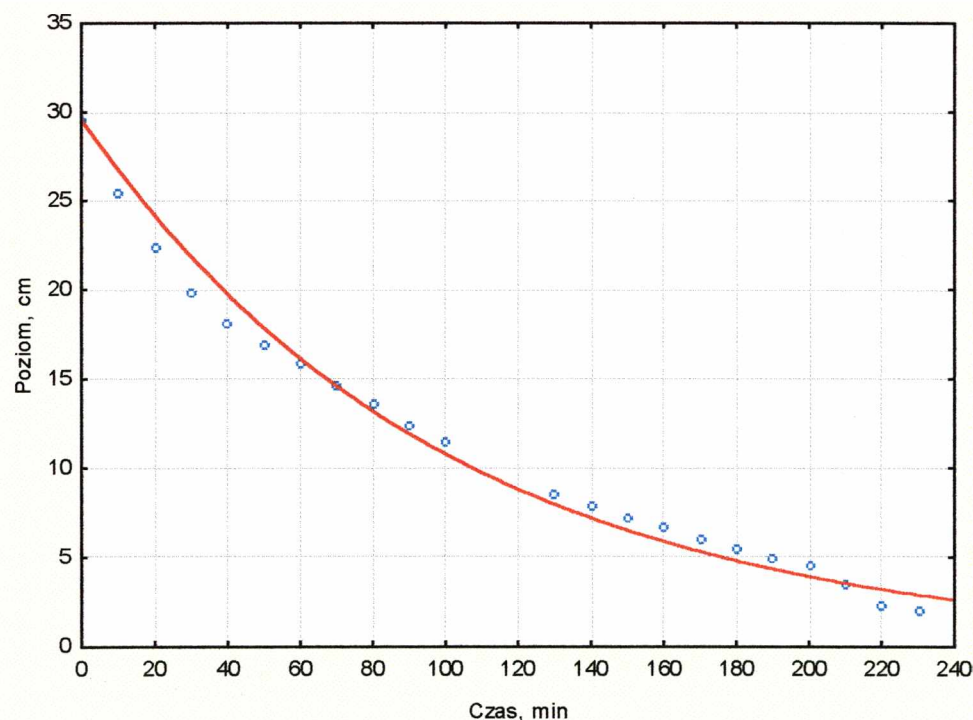
Wyliczone funkcje regresji bardzo dobrze opisują obserwowane w czasie badań zmiany wysokości słupa wody w skrzyniach AZURA. Współczynniki determinacji tych funkcji regresji mieściły się w przedziale od 0,858 do 0,999, przy czym tylko dla dwóch funkcji wartość współczynnika determinacji R² była mniejsza od 0,985.

10.6 Modelowanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzynek chłonnych

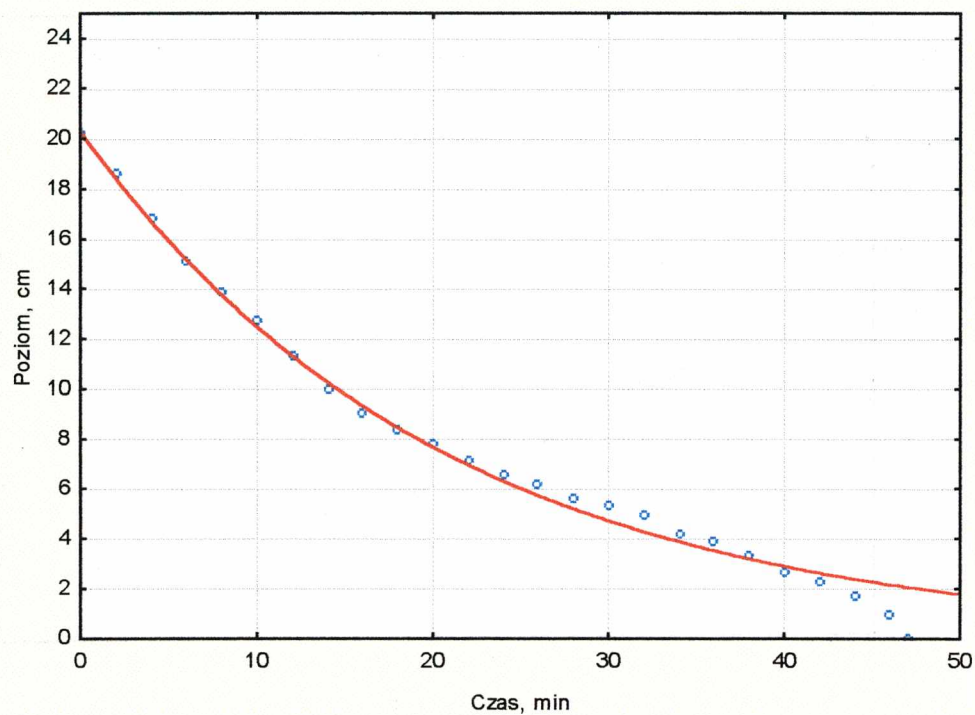
Na rysunkach 122-127 przedstawiono przykładowe wykresy obrazujące obserwowane w czasie badań zmiany wysokości słupa wody w skrzynkach badawczych w czasie ich opróżniania przy braku dopływu wody i przebieg funkcji regresji opisanych ogólnym modelem (58). Szczegółowe równania modeli przedstawiono w tabelach 34 - 36



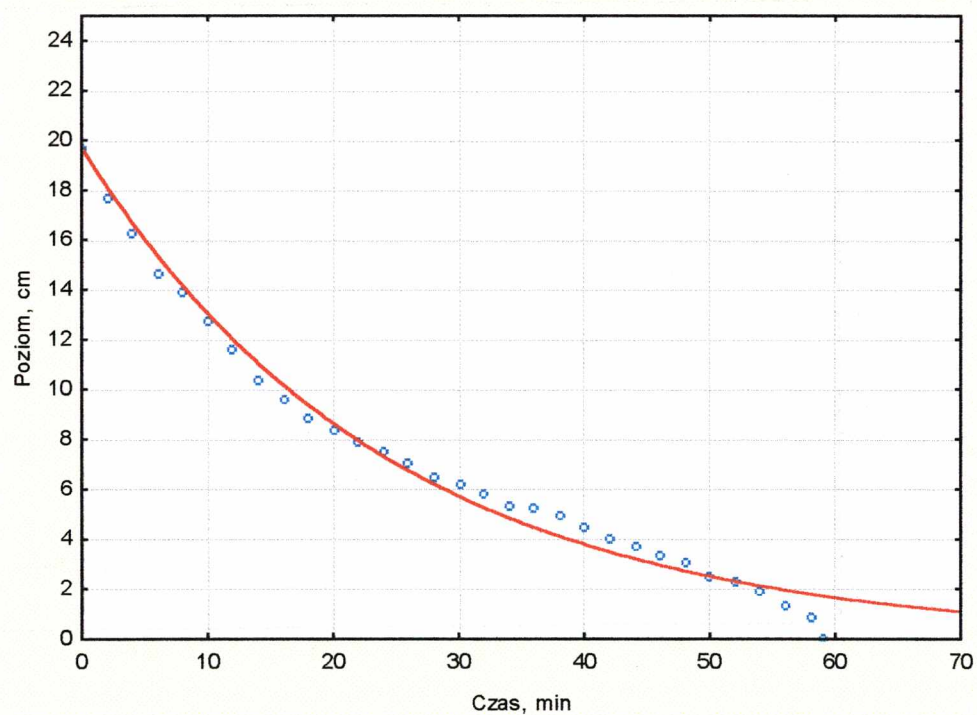
Rys. 122. Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 1 obserwowane 01.09.03 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58)



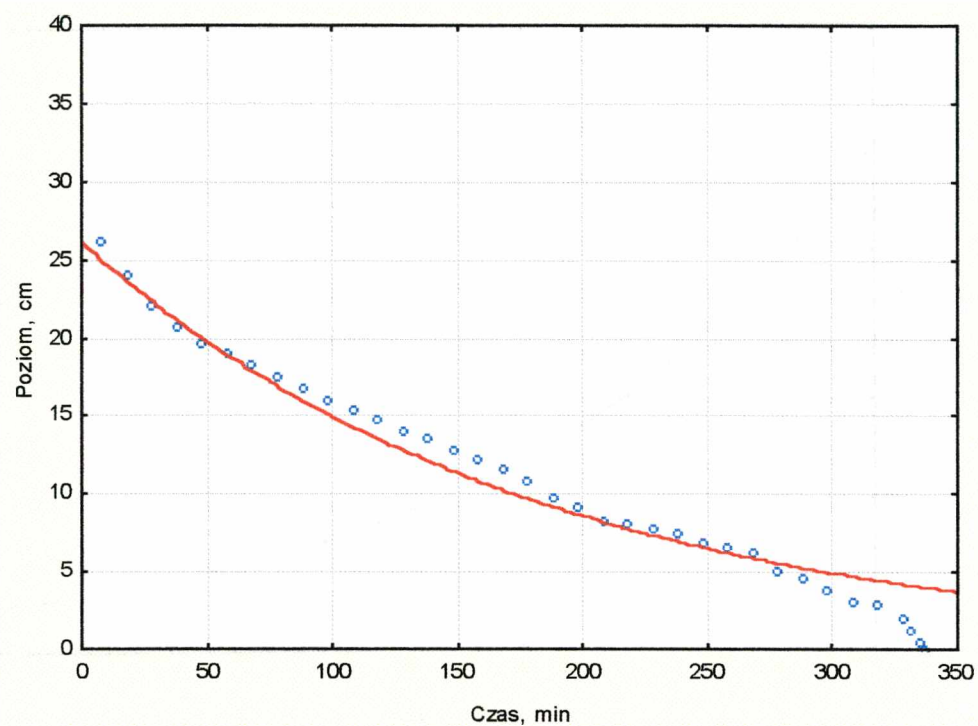
Rys. 123. Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 1 obserwowane 22.09.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58)



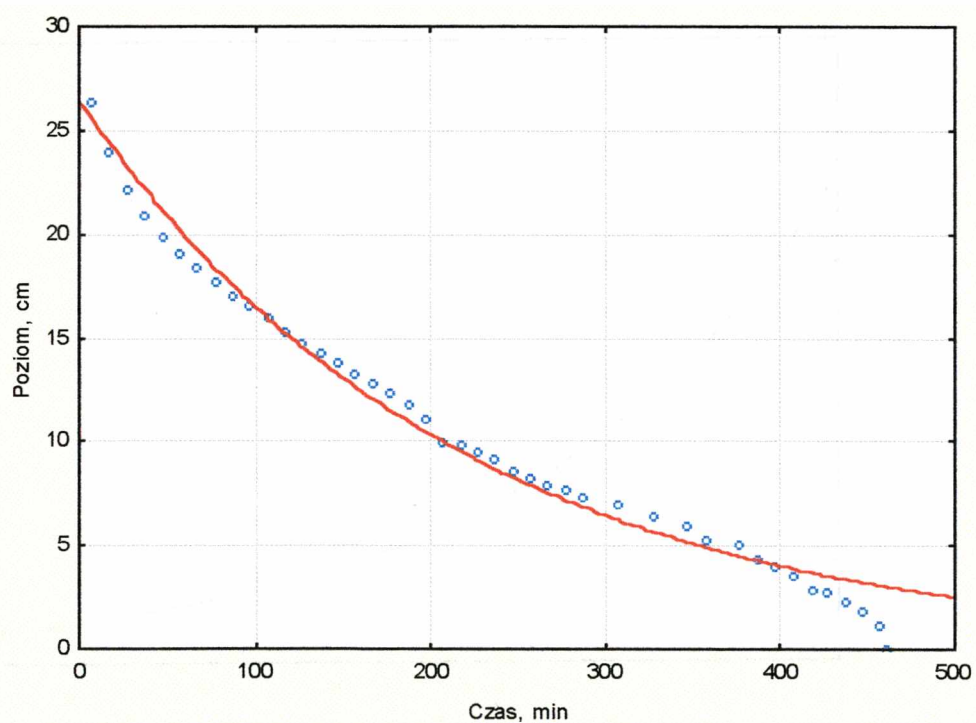
Rys. 124. Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 2 obserwowane 28.08.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58)



Rys. 125. Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 2 obserwowane 15.09.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58)



Rys. 126. Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 3 obserwowane 30.07.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58)



Rys. 127. Porównanie zmian poziomu wody w czasie opróżniania skrzyni 3 obserwowanych 01.09.2003 z funkcją regresji opisaną ogólnym modelem (58)

Tabela 34

Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie opróżniania skrzyni 1

Data pomiaru	R ²	Równanie regresji	Data pomiaru	R ²	Równanie regresji
18.06.03	0,986	$H=22,3 \cdot \exp(-t/(42,3424))$	28.10.03	0,976	$H=29,8 \cdot \exp(-t/(273,1494))$
23.06.03	0,994	$H=27,3 \cdot \exp(-t/(39,5194))$	24.11.03	0,902	$H=29,7 \cdot \exp(-t/(260,2134))$
25.06.03	0,995	$H=27,8 \cdot \exp(-t/(63,4518))$	01.03.04	0,962	$H=28,9 \cdot \exp(-t/(288,3506))$
30.07.03	0,986	$H=30,5 \cdot \exp(-t/(128,386))$	15.03.04	0,861	$H=29,6 \cdot \exp(-t/(361,5329))$
01.09.03	0,956	$H=28,7 \cdot \exp(-t/(76,6518))$	05.04.04	0,845	$H=29,6 \cdot \exp(-t/(340,8316))$
22.09.03	0,985	$H=28,5 \cdot \exp(-t/(114,955))$	27.04.04	0,906	$H=29,7 \cdot \exp(-t/(366,0322))$
15.10.03	0,992	$H=29,7 \cdot \exp(-t/(65,9239))$			

Tabela 35

Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie opróżniania skrzyni 2

Data pomiaru	R ²	Równanie regresji	Data pomiaru	R ²	Równanie regresji
23.06.03	0,959	$H=9,0 \cdot \exp(-t/(4,11760))$	21.08.03	0,990	$H=16,0 \cdot \exp(-t/(5,87520))$
25.06.03	0,964	$H=11,8 \cdot \exp(-t/(5,9071))$	25.08.03	0,994	$H=20,0 \cdot \exp(-t/(15,6757))$
27.06.03	0,972	$H=14,0 \cdot \exp(-t/(6,38310))$	28.08.03	0,988	$H=20,5 \cdot \exp(-t/(23,0542))$
30.06.03	0,97	$H=14,1 \cdot \exp(-t/(7,2292))$	08.09.03	0,978	$H=22,3 \cdot \exp(-t/(28,2223))$
03.07.03	0,888	$H=13,5 \cdot \exp(-t/(4,3351))$	15.09.03	0,993	$H=21,3 \cdot \exp(-t/(24,5321))$
07.07.03	0,861	$H=15,0 \cdot \exp(-t/(11,6332))$	25.09.03	0,974	$H=23,3 \cdot \exp(-t/(26,1015))$
09.07.03	0,966	$H=23,0 \cdot \exp(-t/(5,07230))$	30.09.03	0,969	$H=22,4 \cdot \exp(-t/(25,1661))$
11.07.03	0,966	$H=16,5 \cdot \exp(-t/(9,8443))$	27.10.03	0,989	$H=20,5 \cdot \exp(-t/(17,4423))$
14.07.03	0,978	$H=15,6 \cdot \exp(-t/(8,4229))$	03.11.03	0,967	$H=22,8 \cdot \exp(-t/(18,2133))$
16.07.03	0,993	$H=16,6 \cdot \exp(-t/(10,444))$	24.11.03	0,985	$H=23,3 \cdot \exp(-t/(26,1746))$
23.07.03	0,937	$H=14,4 \cdot \exp(-t/(7,8301))$	08.12.03	0,982	$H=23,1 \cdot \exp(-t/(21,3558))$
25.07.03	0,987	$H=17,4 \cdot \exp(-t/(9,2609))$	10.12.03	0,956	$H=23,0 \cdot \exp(-t/(21,4394))$
28.07.03	0,995	$H=17,5 \cdot \exp(-t/(10,5355))$	08.03.04	0,992	$H=24,7 \cdot \exp(-t/(37,1416))$
30.07.03	0,994	$H=19,0 \cdot \exp(-t/(11,2661))$	05.04.04	0,989	$H=23,0 \cdot \exp(-t/(27,9228))$
04.08.03	0,986	$H=18,2 \cdot \exp(-t/(13,5740))$	27.04.04	0,989	$H=24,3 \cdot \exp(-t/(23,9452))$
06.08.03	0,996	$H=19,6 \cdot \exp(-t/(16,1449))$	04.05.04	0,987	$H=21,5 \cdot \exp(-t/(17,0640))$
08.08.03	0,993	$H=19,7 \cdot \exp(-t/(15,2532))$	17.05.04	0,950	$H=22,2 \cdot \exp(-t/(30,1923))$
11.08.03	0,991	$H=19,3 \cdot \exp(-t/(16,4788))$	24.05.04	0,992	$H=23,5 \cdot \exp(-t/(23,1246))$
13.08.03	0,99	$H=20,6 \cdot \exp(-t/(19,9136))$	07.06.04	0,966	$H=22,9 \cdot \exp(-t/(27,5080))$
18.08.03	0,992	$H=21,0 \cdot \exp(-t/(20,9428))$	14.06.04	0,923	$H=23,0 \cdot \exp(-t/(5,07230))$

Tabela 36

Zestawienie funkcji regresji opisujących zmiany wysokości słupa wody obserwowane w czasie opróżniania skrzyni 3

Data pomiaru	R ²	Równanie regresji	Data pomiaru	R ²	Równanie regresji
07.07.03	0,981	$H=18,5 \cdot \exp(-t/(37,51920))$	28.08.03	0,974	$H=27,0 \cdot \exp(-t/(214,3623))$
09.07.03	0,986	$H=23,0 \cdot \exp(-t/(97,47540))$	01.09.03	0,981	$H=26,4 \cdot \exp(-t/(206,3132))$
11.07.03	0,987	$H=24,8 \cdot \exp(-t/(128,6008))$	04.09.03	0,989	$H=23,7 \cdot \exp(-t/(310,4626))$
14.07.03	0,982	$H=22 \cdot \exp(-t/(115,23390))$	08.09.03	0,985	$H=26,5 \cdot \exp(-t/(231,8572))$
16.07.03	0,987	$H=25,3 \cdot \exp(-t/(175,9634))$	15.09.03	0,983	$H=25,7 \cdot \exp(-t/(210,2607))$
23.07.03	0,978	$H=25,0 \cdot \exp(-t/(133,3511))$	25.09.03	0,938	$H=26,8 \cdot \exp(-t/(192,4187))$
25.07.03	0,978	$H=25,0 \cdot \exp(-t/(145,7301))$	27.10.03	0,971	$H=27,7 \cdot \exp(-t/(279,2516))$
28.07.03	0,981	$H=25,0 \cdot \exp(-t/(151,4463))$	29.10.03	0,994	$H=25,7 \cdot \exp(-t/(239,8082))$
30.07.03	0,981	$H=26,1 \cdot \exp(-t/(176,2425))$	03.11.03	0,962	$H=25,5 \cdot \exp(-t/(179,5010))$
01.08.03	0,983	$H=26,9 \cdot \exp(-t/(181,5541))$	24.11.03	0,862	$H=27,8 \cdot \exp(-t/(303,5823))$
04.08.03	0,981	$H=25,5 \cdot \exp(-t/(157,8034))$	08.12.03	0,950	$H=27,9 \cdot \exp(-t/(254,1296))$
06.08.03	0,986	$H=26,8 \cdot \exp(-t/(241,8380))$	10.12.03	0,971	$H=28,2 \cdot \exp(-t/(205,3810))$
11.08.03	0,984	$H=25,2 \cdot \exp(-t/(149,7903))$	08.03.04	0,933	$H=27,6 \cdot \exp(-t/(134,4447))$
13.08.03	0,989	$H=26,3 \cdot \exp(-t/(237,0230))$	15.03.04	0,970	$H=28,2 \cdot \exp(-t/(217,0139))$
18.08.03	0,984	$H=24,5 \cdot \exp(-t/(153,7988))$	29.03.04	0,947	$H=28,4 \cdot \exp(-t/(336,1345))$
21.08.03	0,984	$H=27,7 \cdot \exp(-t/(184,6381))$	17.05.04	0,931	$H=28,0 \cdot \exp(-t/(138,1215))$
25.08.03	0,986	$H=26,4 \cdot \exp(-t/(189,8914))$	24.05.04	0,978	$H=28,0 \cdot \exp(-t/(240,2691))$

Uzyskano istotne statystycznie funkcje regresji dla wszystkich analizowanych wyników badań. Współczynniki determinacji dla tych związków mieściły się w przedziale od 0,845–0,992. Ogólny model opisany równaniem (58) poprawnie opisywał obserwowane zmiany warstwy wody w czasie opróżniania się doświadczalnych skrzynek infiltracyjnych.

Analizując wykresy przedstawione na rys.122–127 zauważyć można, że przy niskich wysokościach warstwy wody następowało przyspieszenie chwilowej prędkości infiltracji wody do gruntu. Zjawisko to było zauważalne dla wszystkich pomiarów.

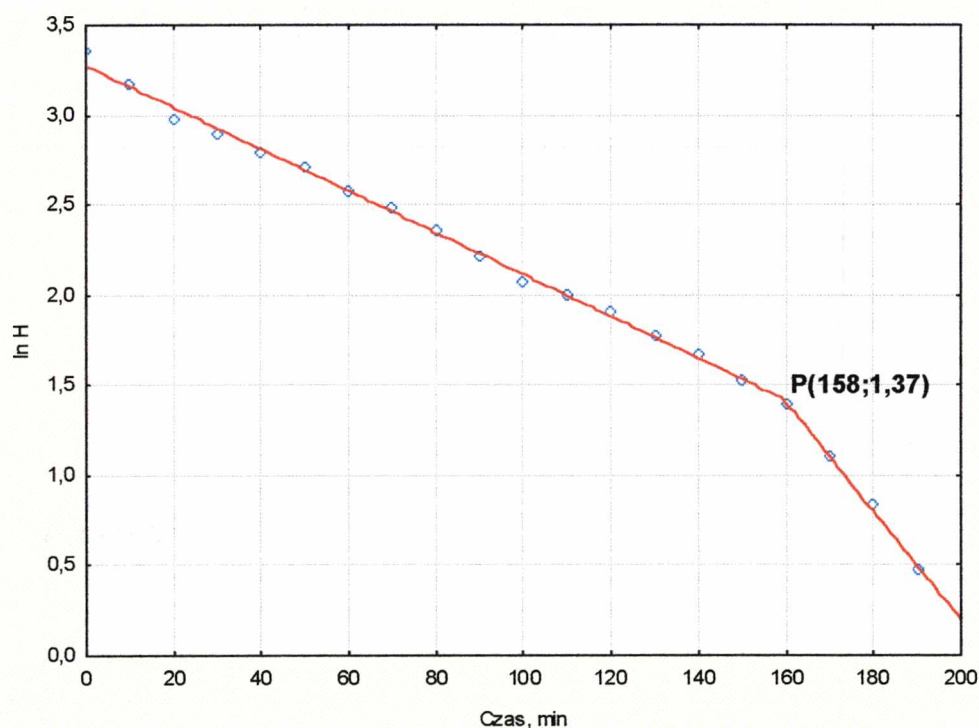
Zjawisko to można wytłumaczyć wzrostem wpływu siły ssącej gruntu znajdującego się pod geowłókniną. Przy dużych chwilowych prędkościach infiltracji ustala się miąższość strefy pełnego nasycenia. Przy spadku chwilowej prędkości infiltracji miąższość strefy pełnego nasycenia gruntu wodą zaczyna maleć, gdyż w strefie niepełnego nasycenia gruntu wodą więcej wody odpływa niż dopływa od strony powierzchni gruntu. Powoduje to spadek wilgotności gruntu i wzrost ciśnienia ssącego pod powierzchnią osadów. Zmniejszenie się wysokości warstwy nasyconej i przyrost ciśnienia ssącego powoduje wzrost prędkości chwilowej, co wynika z równania Green-Ampta (10).

Dla poprawy opisu związku pomiędzy wysokością napełnienia wody w skrzynkach badawczych a czasem trwania procesu wsiąkania (infiltracji) przy braku dopływu wody do skrzynek zastosowano model regresji segmentowej w postaci:

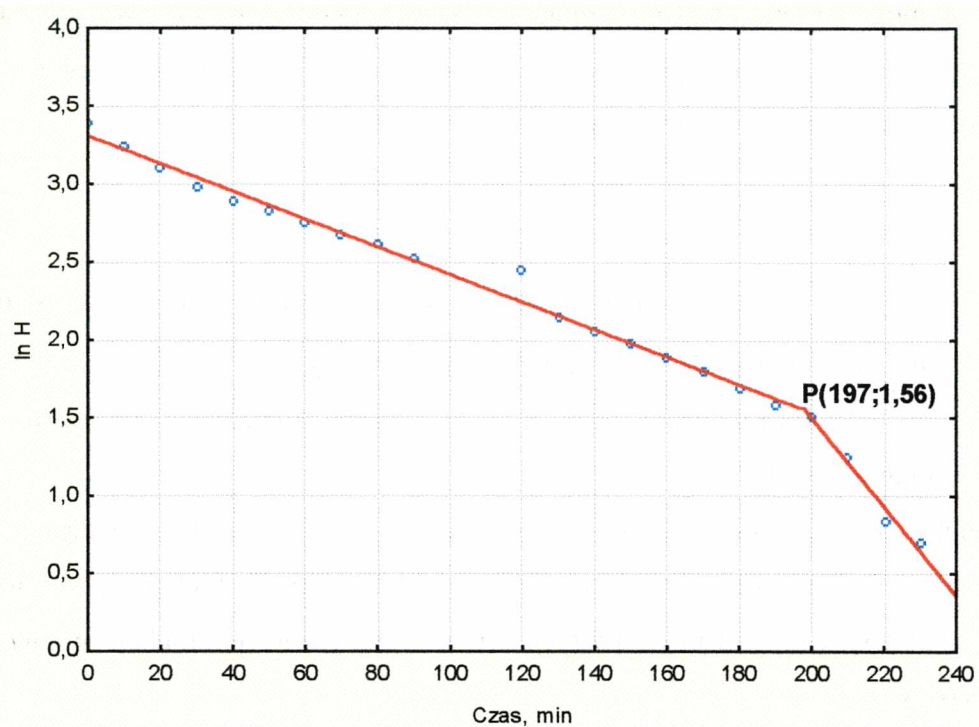
$$\ln H = \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot t & t \leq P \\ a_2 + b_2 \cdot t & t > P \end{cases} \quad (62)$$

gdzie: a_1 , a_2 , b_1 , b_2 są estymowanymi parametrami, P – estymowaną wartością czasu przy której obserwuje się punkt przełamania funkcji segmentowej, H – obserwowaną wysokością słupa wody w stanowisku badawczym a t – czasem obserwacji liczonym od chwili zakończenia dopływu wody.

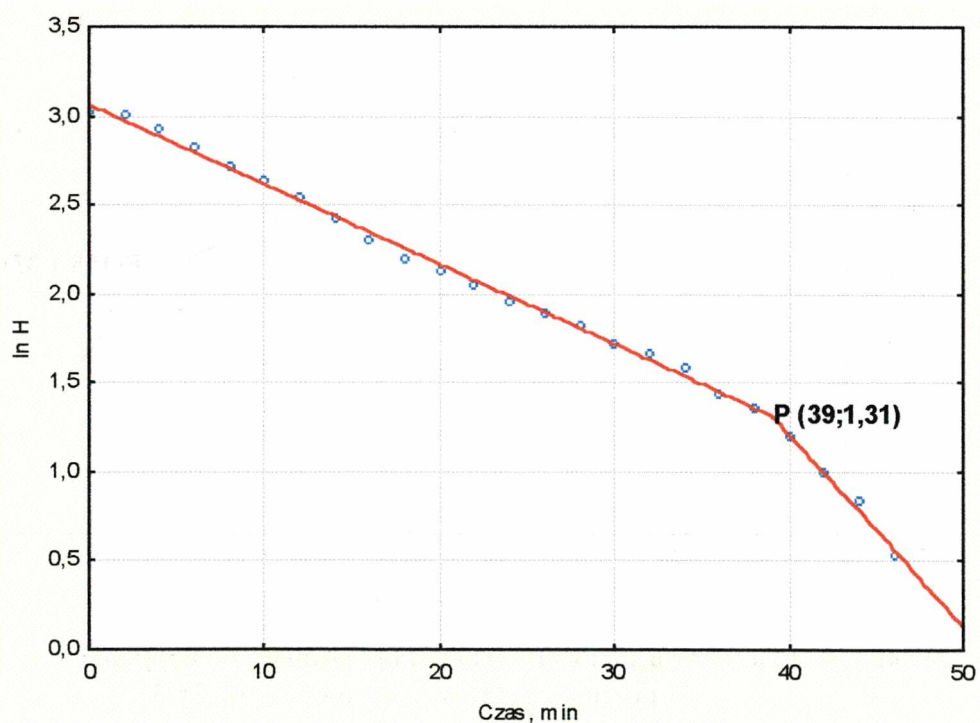
Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach 37–39, a na rysunkach 128–133 przedstawiono przykładowe wykresy przebiegu funkcji regresji funkcji segmentowej wraz z wynikami pomiarów na podstawie których estymowano parametry funkcji opisanej ogólnym równaniem (62).



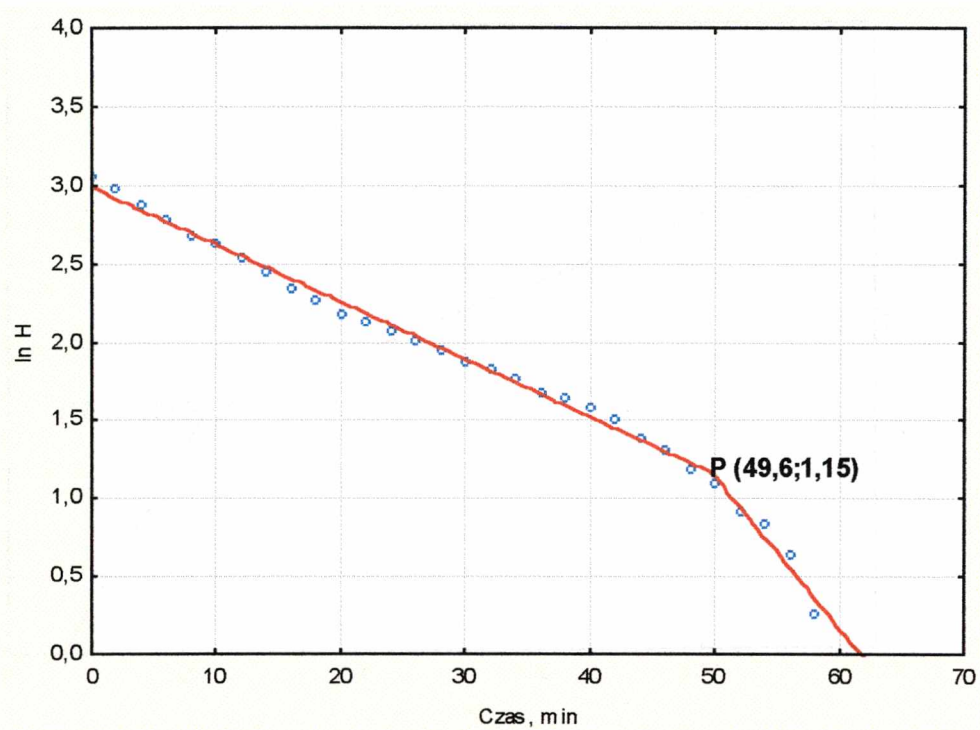
Rys. 128. Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 1 w dniu 30.07.2003



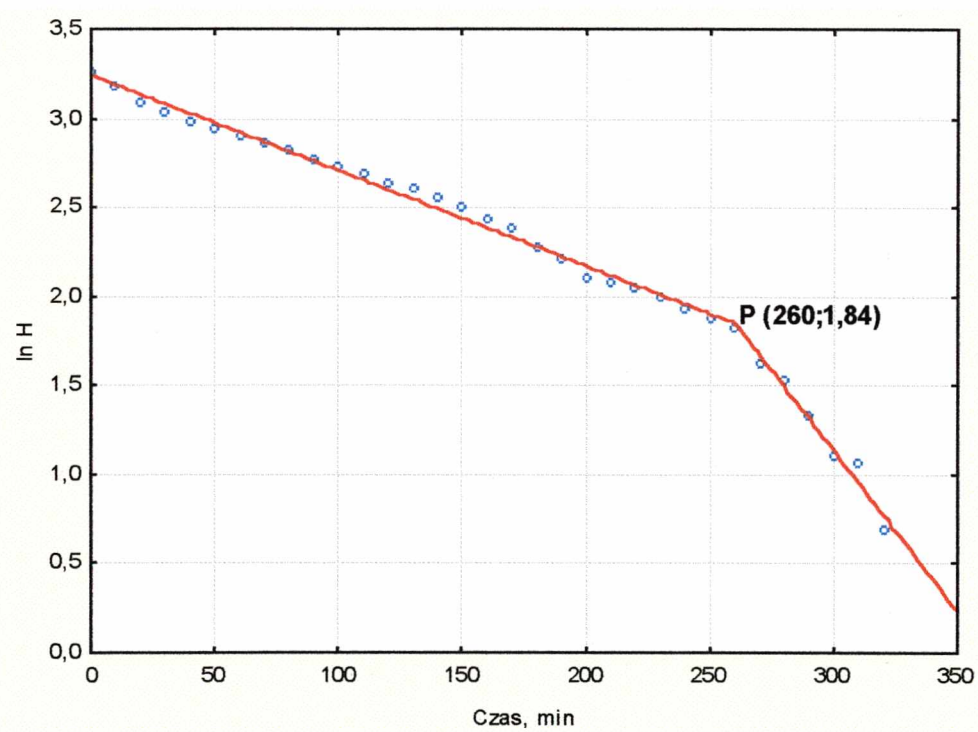
Rys. 129. Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 1 w dniu 22.09.2003



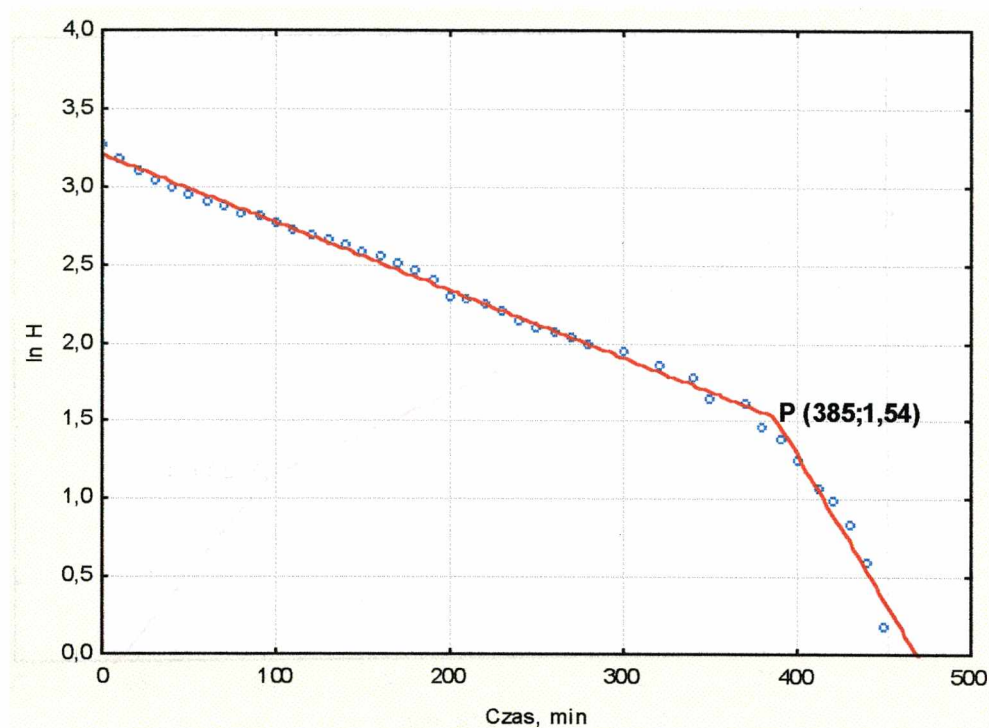
Rys. 130. Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 2 w dniu 28.08.2003



Rys. 131. Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 2 w dniu 15.09.2003



Rys. 132. Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 3 w dniu 30.07.2003



Rys. 133. Wykres funkcji regresji segmentowej i punkty pomiarowe uzyskane w czasie badań opróżniania skrzyni 3 w dniu 01.09.2003

Tabela 37

Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym nr 1 zlokalizowanym we Wrocławiu wg równania (62)

Data pomiaru	Punkt przełamań P		R^2	Równania regresji	
	t [min]	H [cm]		gdy $t \leq P$	gdy $t > P$
18.06.03	51	6,4	0,995	$\ln H = 3,08015 + (-0,02406t)$	$\ln H = 2,47606 + (-0,01222t)$
23.06.03	74	4,5	0,999	$\ln H = 3,28388 + (-0,02416t)$	$\ln H = 4,98613 + (-0,04716t)$
25.06.03	110	4,8	0,997	$\ln H = 3,36344 + (-0,01631t)$	$\ln H = 5,89966 + (-0,03937t)$
30.07.03	158	4,2	0,998	$\ln H = 3,27442 + (-0,01162t)$	$\ln H = 6,22246 + (-0,03028t)$
01.09.03	137	4,7	0,994	$\ln H = 3,23964 + (-0,01236t)$	$\ln H = 5,89046 + (-0,03171t)$
22.09.03	197	4,8	0,994	$\ln H = 3,31001 + (-0,00888t)$	$\ln H = 7,20391 + (-0,02865t)$
15.10.03	198,9	7,4	0,995	$\ln H = 3,40971 + (-0,00710t)$	$\ln H = 2,82306 + (-0,00415t)$
28.10.03	456	5,1	0,987	$\ln H = 3,46319 + (-0,00401t)$	$\ln H = 7,02525 + (-0,01182t)$
24.11.03	367	7,9	0,991	$\ln H = 3,52950 + (-0,00400t)$	$\ln H = 17,3429 + (-0,04164t)$
01.03.04	433	6,9	0,979	$\ln H = 3,43197 + (-0,00348t)$	$\ln H = 7,11045 + (-0,01198t)$
15.03.04	457	10,4	0,997	$\ln H = 3,44936 + (-0,00243t)$	$\ln H = 19,9023 + (-0,03843t)$
05.04.04	355	13,0	0,978	$\ln H = 3,50691 + (-0,00266t)$	$\ln H = 8,33923 + (-0,01627t)$
27.04.04	475	10,6	0,997	$\ln H = 3,41961 + (-0,00223t)$	$\ln H = 11,0649 + (-0,01833t)$

Tabela 38

Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym nr 2 zlokalizowanym we Wrocławiu wg równania (62)

Data pomiaru	Punkt przelamania P		R ²	Równania regresji	
	t [min]	H [cm]		gdy $t \leq P$	gdy $t > P$
23.06.03	2,8	5,3	0,994	$\ln H=2,19856+(-0,18634t)$	$\ln H=2,97404+(-0,46330t)$
25.06.03	6,9	3,9	0,996	$\ln H=2,52277+(-0,1694t)$	$\ln H=3,98863+(-0,38184t)$
27.06.03	7,9	4,3	0,997	$\ln H=2,69192+(-0,15693t)$	$\ln H=4,53744+(-0,39054t)$
30.06.03	7,4	6,3	0,994	$\ln H=2,65696+(-0,10948t)$	$\ln H=3,3572+(-0,20411t)$
03.07.03	4,3	6,7	0,990	$\ln H=2,6656+(-0,17891t)$	$\ln H=4,74465+(-0,66241t)$
07.07.03	11,1	6,8	0,988	$\ln H=2,80318+(-0,08007t)$	$\ln H=6,1984+(-0,38595t)$
09.07.03	10,2	4,2	0,990	$\ln H=2,96647+(-0,14955t)$	$\ln H=5,29851+(-0,37818t)$
11.07.03	12,3	4,8	0,996	$\ln H=2,87116+(-0,10673t)$	$\ln H=4,45318+(-0,23535t)$
14.07.03	9,8	5,3	0,998	$\ln H=2,76336+(-0,11092t)$	$\ln H=4,42124+(-0,28009t)$
16.07.03	13,9	4,5	0,999	$\ln H=2,81748+(-0,09410t)$	$\ln H=4,18495+(-0,19248t)$
23.07.03	7,8	6,4	0,996	$\ln H=2,68441+(-0,10586t)$	$\ln H=4,74000+(-0,36940t)$
25.07.03	13,8	4,2	0,999	$\ln H=2,86996+(-0,10467t)$	$\ln H=5,60158+(-0,30261t)$
28.07.03	15,5	4,2	0,999	$\ln H=2,84549+(-0,09024t)$	$\ln H=5,01126+(-0,22997t)$
30.07.03	17,6	4,3	0,998	$\ln H=2,90257+(-0,08164t)$	$\ln H=4,52509+(-0,17383t)$
04.08.03	19,5	4,4	0,999	$\ln H=2,94046+(-0,07497t)$	$\ln H=5,36832+(-0,19948t)$
06.08.03	21,9	5,2	0,998	$\ln H=2,97906+(-0,06076t)$	$\ln H=4,02214+(-0,10839t)$
08.08.03	21,9	5,0	0,997	$\ln H=2,96423+(-0,06208t)$	$\ln H=4,45981+(-0,13037t)$
11.08.03	29,6	3,4	0,994	$\ln H=2,95542+(-0,05886t)$	$\ln H=9,63524+(-0,28453t)$
13.08.03	33,5	4,1	0,997	$\ln H=2,99748+(-0,04728t)$	$\ln H=4,79466+(-0,10093t)$
18.08.03	37,7	3,9	0,997	$\ln H=2,96753+(-0,04233t)$	$\ln H=4,5724+(-0,08490t)$
21.08.03	7,3	5,1	0,999	$\ln H=2,76473+(-0,15654t)$	$\ln H=4,15888+(-0,34752t)$
25.08.03	26,0	4,2	0,996	$\ln H=2,9349+(-0,05761t)$	$\ln H=4,24076+(-0,10784t)$
28.08.03	39,0	3,7	0,999	$\ln H=3,06246+(-0,04482t)$	$\ln H=5,51066+(-0,10759t)$
08.09.03	58,5	3,5	0,993	$\ln H=2,96513+(-0,0292t)$	$\ln H=5,15396+(-0,06662t)$
15.09.03	49,6	3,2	0,995	$\ln H=2,98814+(-0,03668t)$	$\ln H=6,00712+(-0,09755t)$
25.09.03	55,0	3,6	0,995	$\ln H=2,99964+(-0,03136t)$	$\ln H=5,04566+(-0,06856t)$
30.09.03	53,0	3,5	0,992	$\ln H=2,95123+(-0,03186t)$	$\ln H=7,37302+(-0,11529t)$
27.10.03	35,8	3,7	0,995	$\ln H=3,04076+(-0,04821t)$	$\ln H=4,95134+(-0,10158t)$
03.11.03	56,0	3,1	0,981	$\ln H=3,07705+(-0,03462t)$	$\ln H=10,8877+(-0,17410t)$
24.11.03	35,7	5,0	0,990	$\ln H=3,10290+(-0,04162t)$	$\ln H=5,69134+(-0,11413t)$
08.12.03	30,0	6,7	0,996	$\ln H=3,06608+(-0,03875t)$	$\ln H=4,24000+(-0,07788t)$
10.12.03	49,0	7,5	0,982	$\ln H=3,27068+(-0,02571t)$	$\ln H=5,80353+(-0,07740t)$
08.03.04	51,3	3,7	0,998	$\ln H=3,15102+(-0,03593t)$	$\ln H=5,47764+(-0,08128t)$
05.04.04	38,0	5,0	0,995	$\ln H=3,20145+(-0,04196t)$	$\ln H=4,08322+(-0,06516t)$
27.04.04	27,8	4,6	0,997	$\ln H=3,03282+(-0,05383t)$	$\ln H=5,27213+(-0,13438t)$
04.05.04	53,5	3,9	0,999	$\ln H=3,11834+(-0,03292t)$	$\ln H=10,6294+(-0,17331t)$
17.05.04	51,8	3,0	0,994	$\ln H=3,03826+(-0,03727t)$	$\ln H=13,2021+(-0,23348t)$
24.05.04	48,5	4,0	0,995	$\ln H=3,11238+(-0,03534t)$	$\ln H=5,30547+(-0,08056t)$
07.06.04	58,0	3,1	0,995	$\ln H=3,1659+(-0,03518t)$	$\ln H=1,78097+(-0,01130t)$
14.06.04	25,0	7,5	0,990	$\ln H=3,15487+(-0,04543t)$	$\ln H=2,48442+(-0,01861t)$

Tabela 39

Zestawienie wyników modelowania procesu wsiąkania na stanowisku badawczym nr 3 zlokalizowanym we Wrocławiu wg równania (62)

Data pomiaru	Punkt przełamania P		R ²	Równania regresji	
	t [min]	H [cm]		gdy $t \leq P$	gdy $t > P$
07.07.03	57	4,1	0,997	$\ln H=2,96427+(-0,02746t)$	$\ln H=7,20668+(-0,10189t)$
09.07.03	170	4,2	0,996	$\ln H=3,12290+(-0,00992t)$	$\ln H=8,21410+(-0,03987t)$
11.07.03	226	4,4	0,998	$\ln H=3,20698+(-0,00759t)$	$\ln H=8,94432+(-0,03298t)$
14.07.03	197	3,9	0,995	$\ln H=3,10931+(-0,00894t)$	$\ln H=10,7979+(-0,04797t)$
16.07.03	293,8	5,0	0,996	$\ln H=3,22170+(-0,00551t)$	$\ln H=7,47640+(-0,01999t)$
23.07.03	223	4,9	0,993	$\ln H=3,19196+(-0,00718t)$	$\ln H=9,34107+(-0,03475t)$
25.07.03	227	5,1	0,994	$\ln H=3,27375+(-0,00722t)$	$\ln H=7,91739+(-0,02768t)$
28.07.03	200	6,8	0,994	$\ln H=3,26225+(-0,00671t)$	$\ln H=5,47974+(-0,01780t)$
30.07.03	260	6,4	0,996	$\ln H=3,24296+(-0,00536t)$	$\ln H=6,53521+(-0,01802t)$
01.08.03	269	6,6	0,994	$\ln H=3,26924+(-0,00512t)$	$\ln H=5,75013+(-0,01434t)$
04.08.03	246	5,4	0,995	$\ln H=3,25918+(-0,00636t)$	$\ln H=8,39870+(-0,02725t)$
06.08.03	407,5	5,4	0,997	$\ln H=3,22887+(-0,00377t)$	$\ln H=5,86684+(-0,01024t)$
11.08.03	235	5,6	0,997	$\ln H=3,20062+(-0,00632t)$	$\ln H=5,98572+(-0,01817t)$
13.08.03	399	5,2	0,994	$\ln H=3,25147+(-0,00403t)$	$\ln H=8,02183+(-0,01599t)$
18.08.03	259,5	4,7	0,994	$\ln H=3,22652+(-0,00650t)$	$\ln H= 8,72545+(-0,02769t)$
21.08.03	332,5	4,6	0,992	$\ln H=3,31865+(-0,00538t)$	$\ln H=7,33276+(-0,01745t)$
25.08.03	324	5,1	0,997	$\ln H=3,24600+(-0,00500t)$	$\ln H=7,22733+(-0,01729t)$
28.08.03	350	5,5	0,992	$\ln H=3,27558+(-0,00447t)$	$\ln H=6,14451+(-0,01267t)$
01.09.03	385	4,6	0,996	$\ln H=3,20475+(-0,00434t)$	$\ln H=8,71847+(-0,01866t)$
04.09.03	491	4,9	0,998	$\ln H=3,20032+(-0,00330t)$	$\ln H=6,31175+(-0,00964t)$
08.09.03	403	5,1	0,998	$\ln H= 3,21725+(-0,00393t)$	$\ln H=6,31941+(-0,01163t)$
15.09.03	386	4,6	0,997	$\ln H=3,16488+(-0,00422t)$	$\ln H=6,06646+(-0,01174t)$
25.09.03	509,5	5,0	0,977	$\ln H=3,22927+(-0,00317t)$	$\ln H=8,42896+(-0,01338t)$
27.10.03	296	5,5	0,991	$\ln H=3,23727+(-0,00517t)$	$\ln H=8,06547+(-0,02148t)$
29.10.03	507	5,2	0,997	$\ln H=3,33365+(-0,00331t)$	$\ln H=6,81891+(-0,01018t)$
03.11.03	388	5,9	0,986	$\ln H=3,39130+(-0,00415t)$	$\ln H=9,36237+(-0,01954t)$
24.11.03	248	6,0	0,975	$\ln H=3,10588+(-0,00530t)$	$\ln H=6,62109+(-0,01947t)$
08.12.03	203	8,6	0,994	$\ln H=3,24054+(-0,00235t)$	$\ln H=4,63128+(-0,01220t)$
10.12.03	496	7,0	0,998	$\ln H=3,3706+(-0,00288t)$	$\ln H=9,37486+(-0,01499t)$
08.03.04	295	9,8	0,986	$\ln H=3,26884+(-0,00263t)$	$\ln H=7,56199+(-0,01788t)$
15.03.04	257	5,8	0,991	$\ln H=3,38711+(-0,00633t)$	$\ln H=7,52322+(-0,02242t)$
29.03.04	266	7,0	0,981	$\ln H=3,34410+(-0,00528t)$	$\ln H=16,4167+(-0,05443t)$
17.05.04	339,8	5,8	0,975	$\ln H=3,25587+(-0,00440t)$	$\ln H=14,3057+(-0,03692t)$
24.05.03	444	5,3	0,995	$\ln H=3,30547+(-0,00367t)$	$\ln H=13,8379+(-0,02739t)$

Otrzymano wyższe wartości współczynników determinacji ($R^2 \geq 0,975$) w porównaniu do modeli opisanych ogólnym równaniem (58).

Dla skrzynek zalewanych zawiesiną kaolinu (skrzynki 2 i 3) zmiana gradientu chwilowych prędkości infiltracji następowała przy wysokości wody 4–6 cm. W skrzynce 1, zalewanej zawiesiną bentonitu zmiana gradientu chwilowej prędkości infiltracji następowała przy większych wysokościach rzędu 5–7 cm, za wyjątkiem pomiarów wykonanych 15.03.04, 05.04.04 i 27.04.04, dla których wysokość ta wyniosła odpowiednio 10,4, 13,0 i 10,6 cm.

Dla potrzeb inżynierskich modele opisane ogólnym równaniem (58) charakteryzują się wystarczającą dokładnością opisu chwilowej prędkości infiltracji wody do gruntu ze strefą zakolmatowaną w fazie opadania zwierciadła wody przy braku dopływu wody do urządzeń chłonnych.

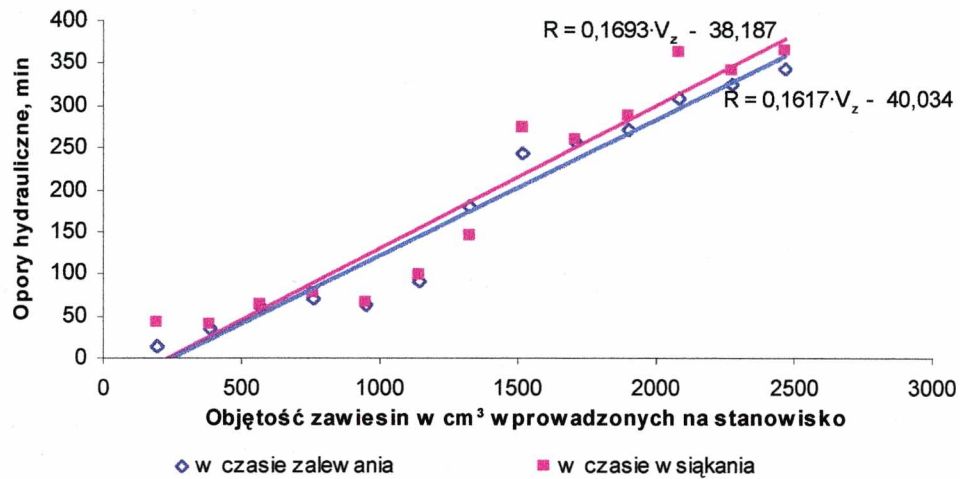
10.7 Analiza wyników obliczeń oporów hydraulicznych

Modele opisane równaniami (55) i (58) pozwalają określić opór hydrauliczny warstwy gruntu w czasie infiltracji wody w fazie zalewania i opróżniania zbiorników chłonnych. Duża statystyczna wiarygodność tych związków czyni je przydatnym narzędziem inżynierskim do projektowania objętości zbiorników do infiltracji wód deszczowych oraz może być narzędziem diagnostycznym dla oszacowania zdolności infiltracyjnych gruntów przeznaczonych pod budowę urządzeń chłonnych i służyć do oceny stopnia ich zakolmatowania.

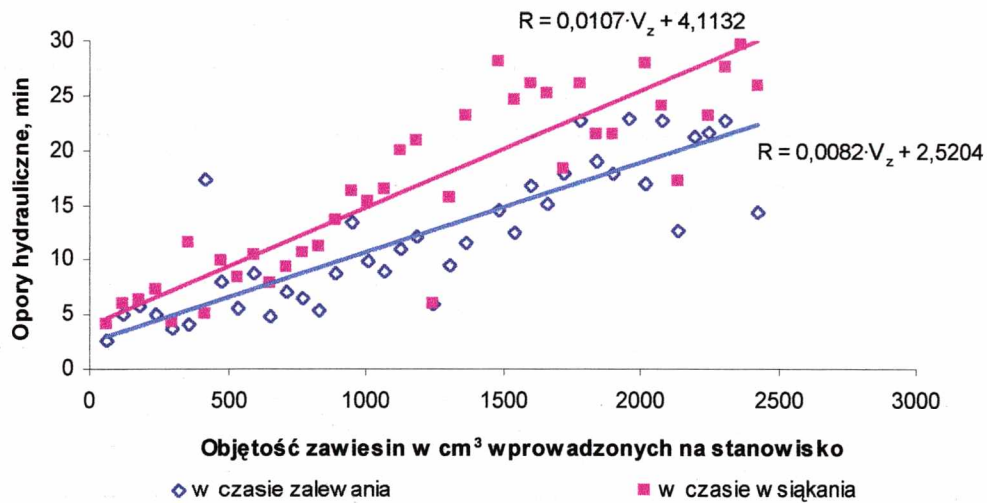
Pod względem poznawczym bardzo ważna jest odpowiedź na pytanie: W jakim stopniu estymowane w modelach opisujących fazę zalewania i opróżniania urządzenia chłonnego opory hydrauliczne różnią się między sobą?

Poszukując odpowiedzi na to pytanie ustalono zależności pomiędzy objętością zawiesin wprowadzonych z infiltrującą wodą a oporami hydraulicznymi ustalonymi w fazie zalewania i opróżniania skrzynek badawczych (rys. 134–136). Obserwowane zmiany dobrze opisywała funkcja liniowa. Wyniki obliczeń zostały zestawione w tabeli 40.

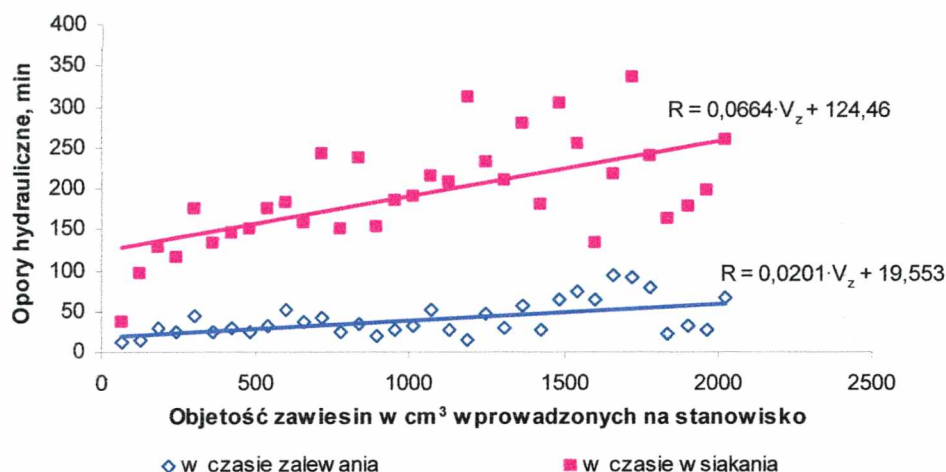
W przypadku skrzyni 1 zalewanej zawiesiną bentonitu uzyskano dużą zgodność wyników obliczeń oporów hydraulicznych ustalonych modelem dla fazy zalewania (równanie 55) z oporami hydraulicznymi w fazie opróżniania (model opisany równaniem 58) (rys. 134). Bentonit tworzył na powierzchni geowłókniny zwarty filtr namywany. Cząstki zawiesiny bentonitu odkładały się głównie na powierzchni geowłókniny. Opory hydrauliczne bardzo szybko rosły w miarę wzrostu objętości zawiesin wprowadzonych z infiltrującą wodą.



Rys. 134. Porównanie oporów hydraulicznych ustalonych dla fazy zalewania i opróżniania w oparciu o wyniki badań z użyciem skrzyni AZURY, zamontowanej w glinie piaszczystej, zalewanej zawiesiną bentonitu



Rys. 135. Porównanie oporów hydraulicznych ustalonych dla fazy zalewania i opróżniania w oparciu o wyniki badań z użyciem skrzyni AZURY, zamontowanej w glinie piaszczystej, zalewanej zawiesiną kaolinu



Rys. 136. Porównanie oporów hydraulicznych ustalonych dla fazy zalewania i opróżniania w oparciu o wyniki badań z użyciem skrzyni AZURY, zamontowanej w glinie zwężłej, zalewanej zawiesiną kaolinu

Tabela 40

Zestawienie modeli liniowych opisujących zmiany oporu hydraulicznego R [min] w zależności od objętości cząstek zawiesiny zawartej w infiltrującej wodzie V_z [cm³] w fazie zalewania i opróżniania w różnych warunkach eksperymentu

Numer skrzynki AZURO	Rodzaj gruntu	Rodzaj zawiesiny	Równanie	Współczynnik determinacji
Faza zalewania				
1	głina piaszczysta	bentonit	$R=0,1617 \cdot V_z - 40,034$	0,952
2	głina piaszczysta	kaolin	$R=0,0082 \cdot V_z + 2,5204$	0,699
3	głina zwarta	kaolin	$R=0,0201 \cdot V_z + 19,553$	0,291
Faza opróżniania				
1	głina piaszczysta	bentonit	$R=0,1693 \cdot V_z - 38,187$	0,921
2	głina piaszczysta	kaolin	$R=0,0107 \cdot V_z + 4,113$	0,759
3	głina zwarta	kaolin	$R=0,0664 \cdot V_z + 124,460$	0,381

Opory ustalone dla skrzyni 2 zalewanej zawiesiną kaolinu, która była zamontowana w podobnych warunkach gruntowych, nie wykazywały tak szybkiego wzrostu w miarę czasu trwania eksperymentu. W odróżnieniu do wyników eksperymentu na stanowisku zalewanym zawiesiną bentonitu obserwowano istotne różnice pomiędzy wartościami oporów wyliczonych w fazie zalewania i opróżniania tej skrzynki. Wyższe były wyliczone opory hydraulicznego w fazie opróżniania niż zalewania. Różnica między tymi oporami rosła w miarę wzrostu objętości zawiesin wprowadzonych z infiltrującą wodą, co można wytłumaczyć postępującą kolmatacją geowłókniny oraz warstwy powierzchniowej gruntu. Niższe wartości wyliczonego oporu

hydraulicznego w fazie zalewania w porównaniu z fazą opróżniania są wynikiem oddziaływania ssania kapilarnego gruntu. W miarę nasycania się wierzchniej warstwy gruntu wodą następuje ustabilizowanie warunków hydraulicznych, a to wpływa na zmiany chwilowej prędkości infiltracji wody do gruntu. Oznacza to, że wyliczone opory hydrauliczne zależą od warunków hydraulicznych i gruntowych. Z tego względu parametr R w równaniach (55) i (58) powinien nazywać się umownym zastępczym oporem hydraulicznym gruntu.

W przypadku infiltracji wody z zawiesiną kaolinu, jak już wcześniej wykazano, dochodziło do głębokiej kolmatacji gruntu. Porównując wartości umownych zastępczych oporów hydraulicznych gruntu uzyskanych dla zawiesiny bentonitu (rys. 134) z wartościami uzyskanymi dla zawiesiny kaolinu (rys. 135) można zauważyć, że wartości te są znacznie mniejsze dla zawiesiny kaolinu. Oznacza to, że głęboka kolmatacja gruntu zawiesiną kaolinu nie wpłynęła w tak istotny sposób na wzrost oporów hydraulicznych jak powierzchniowa kolmatacja geowłókniny zawiesiną bentonitu. Można stąd wyciągnąć wniosek, że powierzchniowe zatrzymywanie zawiesin na geowłókninie chroni grunt przed kolmatacją głęboką, lecz przyczynia się do szybkiego wzrostu oporów hydraulicznych.

Na rysunku 136 przedstawiono wyniki obliczeń umownych zastępczych oporów hydraulicznych dla skrzyni 3 zamontowanej w glinie zwęzłej zalewanej zawiesiną kaolinu. Podobnie jak dla skrzyni 2 uzyskano większe wartości oporów hydraulicznych dla fazy opróżniania niż zalewania.

Miarą szybkości wzrostu wartości umownego zastępczego oporu hydraulicznego w zależności od objętości zawiesin wprowadzonych do skrzynek jest współczynnik kierunkowy wyestymowanej funkcji liniowej. Największym współczynnikiem kierunkowym charakteryzowała się prosta opisująca wpływ zatrzymanej na geowłókninie i w strefie kolmatacji objętości cząstek zawiesiny na umowny zastępczy opór hydrauliczny dla skrzyni 1 zalewanej bentonitem. Wartość tego współczynnika dla fazy zalewania wyniosła 0,167 podczas gdy, dla skrzyni 3 zalewanej zawiesiną kaolinu i zamontowanej w glinie zwartej była prawie ośmiokrotnie mniejsza i wyniosła 0,0201. Najwolniej rósł umowny zastępczy opór hydrauliczny w przypadku skrzyni 2. Podobną zależność uzyskano dla fazy opróżniania.

Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, że w przypadku zachodzenia powierzchniowego zatrzymywania zawiesin na geowłókninie umowny zastępczy opór hydrauliczny dla fazy zalewania jest porównywalny z oporem hydraulicznym wyliczonym dla fazy opróżniania zbiornika infiltracyjnego. W przypadku zachodzenia kolmatacji głębokiej umowny zastępczy opór hydrauliczny w fazie zalewania jest znacznie mniejszy od oporu

wyliczonego w fazie opróżniania, a różnica między tymi wartościami jest zależna od rodzaju gruntu i stopnia zakolmatowania geowłókniny i przypowierzchniowej warstwy gruntu.

Ze względu na zbyt małą ilość przeprowadzonych eksperymentów, dla gruntów i typów zawiesin uzyskane wyniki nie pozwalają na wyciągnięcie bardziej szczegółowych wniosków. Wyniki przeprowadzonych badań są jednak zachęcające dla prowadzenia dalszych prac nad wykorzystaniem modeli opisanych równaniami (55) i (58) w diagnozowaniu zdolności infiltracyjnych gruntu oraz zachodzenia kolmatacji w czasie wnikaniu wody z zawiesiną do strefy aeracji.

11 Podsumowanie i wnioski końcowe

Rosnącemu zainteresowaniu infiltracją wód opadowych do gruntu powinno towarzyszyć udoskonalenie metod projektowania i diagnozowania stopnia zakolmatowania powierzchni chłonnej urządzeń do sztucznej infiltracji pracujących okresowo. Wykonane w ramach niniejszej pracy badania miały poszerzyć stan wiedzy na temat składu granulometrycznego zawiesin występujących w wodach naturalnych, wpływu geowłóknin na szybkość kolmatacji oraz możliwości diagnozowania właściwości infiltracyjnych powierzchni chłonnych urządzeń do powierzchniowej infiltracji wód powierzchniowych i spływów z dachów.

Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków i uogólnień:

1. Wielkość cząstek występujących w opadach deszczu i śniegu jest zależna od rodzaju pyłów i stanu czystości powietrza atmosferycznego. Duży wpływ na skład granulometryczny zawiesin w wodach opadowych ma aeroplankton.
2. Objętości zawiesin zawartych w śniegu lub deszczach są porównywalne. Najczęściej obserwowaną objętość zawiesin (mediana) w próbach deszczu określono na poziomie $0,102 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, podczas gdy w śniegu wartość ta wyniosła $0,092 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Percentyl 90% dla prób deszczu wyniósł $0,25 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, a dla śniegu $0,36 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. W spływach z dachów objętości zawiesin były znacznie większe w porównaniu do opadów deszczu i śniegu. Mediana objętości zawiesin w spływach z dachów wyniosła $0,225 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, a percentyl 90% – $1,90 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$.
3. Badania spływów wód opadowych z dachów wykazały, że największą objętością zawiesin charakteryzują się wody pierwszej fazy spływu. W wodach tych licznie występują cząstki o wymiarach przekraczających $500 \mu\text{m}$, których nie identyfikuje się

w opadach atmosferycznych. Jest to wywołane spłukiwaniem z powierzchni dachów takich zanieczyszczeń jak zbutwiałe liście, guano itp. Przy projektowaniu podziemnych systemów do infiltracji wód deszczowych odprowadzanych z dachów konieczne jest uwzględnienie studzienek sedymentacyjnych, które oczyszczałyby wody z makrozawiesiny.

4. Efektywność działania geowłóknin w zakresie ochrony gruntu przed wglębną kolmatacją przy infiltracji wody zależy od składu granulometrycznego zawiesiny, umownego wymiaru porów (O_{90}) i grubości geowłókniny. Badania wykazały, że grubość geowłókniny ma wpływ na przemieszczanie się cząstek w głąb gruntu w przypadku zawiesin o małych średnicach zastępczych (0,23–100 μm). W przypadku zawiesin z cząstkami o dużych średnicach zastępczych następuje powierzchniowe uszczelnienie geowłókniny i odcedzanie małych cząstek zawiesiny na powstającym na powierzchni geowłókniny placku osadu.
5. Powstający na geowłókninach filtr namywany zatrzymuje nanoplankton o średnicy zastępczej większej od 10 μm . Badania potwierdziły możliwość zastosowania geowłóknin dla ochrony warstwy filtracyjnej dna urządzeń chłonnych przed wglębną kolmatacją przy infiltracji wód powierzchniowych.
6. Przesuszenie warstwy osadów odłożonych na geowłókninie wpływa korzystnie na wielkość infiltracji wody do gruntu. Zjawisko to jest prawdopodobnie związane z niszczeniem silnie uwodnionej struktury osadów.
7. Zastosowanie okresowego zasilania wód podziemnych wodami powierzchniowymi z wykorzystaniem geowłóknin dla ochrony zdolności filtracyjnych gruntu może być alternatywnym rozwiązaniem w stosunku do wzbogacania zasobów wód podziemnych z zastosowaniem basenów infiltracyjnych.
8. Badania wykazały, że równanie:

$$H(t) = Q_F R_z \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{R_z} \right) \right) \quad (63)$$

gdzie $H(t)$ jest obserwowaną funkcją zmian wysokości napełnienia zbiornika infiltracyjnego w czasie jego zalewania wodą ze stałym natężeniem Q_F a R_z jest umownym zastępczym oporem hydraulicznym. Funkcja ta dobrze opisywała otrzymane w czasie zalewania dane doświadczalne. Równanie to może służyć do estymacji R_z w oparciu o dane doświadczalne.

9. Równanie:

$$H(t) = H(0) \exp\left(-\frac{t}{R_o}\right) \quad (64)$$

gdzie $H(t)$ jest obserwowaną funkcją zmian wysokości napełnienia zbiornika infiltracyjnego wodą w czasie jego opróżniania, $H(0)$ wysokością napełnienia zbiornika w czasie rozpoczęcia pomiarów a R_o umownym zastępczym oporem hydraulicznym. Zależność ta, z wystarczającą dla potrzeb inżynierskich dokładnością, opisywała wyniki badań w czasie opróżniania. Może być ona wykorzystywana do estymacji R_o .

10. Funkcja segmentowa:

$$\ln H(t) = \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot t & t \leq P \\ a_2 + b_2 \cdot t & t > P \end{cases} \quad (65)$$

gdzie a_1 , a_2 , b_1 , b_2 są estymowanymi parametrami, P to estymowana wartość czasu przy którym jest punkt przełamania funkcji segmentowej, $H(t)$ to obserwowane wysokości słupa wody w czasie t mierzonym od chwili ustania dopływu wody, lepiej opisuje obserwowane zmiany wysokości napełnienia zbiornika w czasie opróżniania zbiornika infiltracyjnego niż funkcja opisana równaniem (64). Złożoność obliczeń parametrów funkcji (65) ogranicza jej praktyczne inżynierskie zastosowanie.

11. W przypadku, gdy spełniona jest zależność $R_z(t) \approx R_o(t)$, gdzie t jest czasem trwania eksploatacji zbiornika infiltracyjnego, można przypuszczać, że zachodzi powierzchniowe odkładanie zawiesiny w warstwie osadów. W tym wypadku obserwuje się szybki wzrost umownych zastępczych oporów hydraulicznych strefy zakolmatowanej w miarę wzrostu objętości zawieszin zatrzymanych na geowłókninie. Gdy zachodzi warunek $R_o(t_1) - R_z(t_1) > R_o(t_2) - R_z(t_2)$ dla $t_2 \gg t_1$, gdzie t_1 i t_2 są czasami trwania eksploatacji urządzenia chłonnego, można zakładać, że zachodzi wgłębne i powierzchniowe uszczelnianie powierzchni chłonnej. Ze względu na zbyt małą liczbę wykonanych badań dla różnych warunkach gruntowych i rodzajów zawieszin zachodzi potrzeba kontynuacji prac eksperymentalnych w celu potwierdzenia poprawności przedstawionych w tym wniosku tez.

Piśmiennictwo

1. Alfakih E., Barraud S., Martinelli I., 1999: *A study of stormwater infiltration system feasibility and design*. Wat. Sci. Tech., Vol.39, no.2, pp.225-231.
2. Bartels H., Malitz G., Asmus S., Albrecht F. M., Dietzer B., Günther T., Ertel H., 1997: *Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA*. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main.
3. Bartoszewski K., 1983: *Wpływ osadów na wydajność ujęć infiltracyjnych*. Ochrona Środowiska, nr 15, s. 61-62.
4. Bear J., 1971: *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier Publishing Company.
5. Beck D.R., 2003: *Laboratory testing of select geotextiles as biointrusion barriers and sediment filters*. Thesis submitted to the Faculty of Graduate College in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science, Western Michigan University Kalamazoo, Michigan.
6. Bell J.N.B., Treshow M., 2004: *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*. Wyd. Naukowo-techniczne, Warszawa.
7. Błaszczyk W., Stamatello H. Błaszczyk P., 1983: *Kanalizacja. Tom 1. Sieci i pompownie*. Warszawa.
8. Błażejowski M., 1982: *Sztuczna infiltracja w uzdatnianiu wód powierzchniowych*. Zakład Wydawnictw Instytutu Kształtowania Środowiska, Warszawa.
9. Błażejowski M., 1985: *Eksploracja stawów infiltracyjnych zasilanych silnie zanieczyszczoną wodą powierzchniową*. Ochrona Środowiska, nr 24-25, s.43-46.
10. Borzdyńska - Marahori L., Ossowski J., 1989: *Właściwości filtracyjne geowłóknin polskich*. II konferencja pt.: Problemy hydrogeologiczne (S-W) Polski, Szklarska Poręba.
11. Borzdyńska - Marahori L., Rogala R., 1991: *The influence of silting - up with sand grains on water permeability of geotextile*. IV International Conference on Slope Stability and Protection. Problems of Hydroengineering, Technical University of Wrocław.
12. Bouwer H., 1996: *Issues in artificial recharge*. Wat. Sci. Tech., Vol. 33. No. 10-11 pp. 381-390.
13. Bowie G. L. i in.: *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling (second edition)*. EPA/600/3-85/040.
14. Boyd R.H., Ghosh M.M., 1974: *An investigation of the influences of some physicochemical variables on porous-media filtration*. Journal AWWA, pp.94-98.
15. Brakensiek, D. L., Engelman R. L, Rawls W. J., 1981: *Variation within texture classes of soil water parameters*. Transaction of the ASAE, No. 24, pp.335-339.
16. Brutsaert, W., 1977: *Vertical Infiltration in Dry Soil*. Water Resources Research, Vol.13, pp.363-368.
17. Bucher F., Gassmann CH., Sterba I., 1987: *Laboratory investigations on the filter properties of geotextiles. Filters*. General Report IX International European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering „Groundwater effects in geotechnical engineering” Vol.2, Dublin.
18. Butters G., Wheatley A. L., 1981: *Experience with the Malvern ST 1800 Laser Diffraction Particle Sizer*. Conf. proc. „Particle Size Analysis”, Loughborough University of Technology, South Glamorgan (UK).
19. Carsel, R.F., Parrish R.S., 1988: *Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics*. Water Resources Research, Vol. 24, pp.755-769.

20. Cazzuffi D.A., Mazzucato A., Moraci N., Tandello M.,1999: *A new apparatus for the study of geotextiles behaviour as filters in unsteady flow conditions: relevance and use*. Geotextiles and Geomembranes, No. 17, pp.313-329.
21. Clausnitzer V., Hopmans J. W., Starr J. L.,1998: *Parameter uncertainty analysis of common infiltration models*. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.62, pp.1477-1487.
22. Coadini V., Legret M., Brosseaud Y., Balades J.,1995: *Metallic Pollution in clogging materials of urban porous pavements*. Wat. Sci. Tech., Vol. 32. No. 1 pp.57-62.
23. Collis-George, N.,1977: *Infiltration Equations for Simple Soil Systems*. Water Resources Research ,Vol. 13, pp. 395-403.
24. Darby J., Attanasio R. E., Lawler D. F.,1992: *Filtration of heterodisperse suspensions: modeling of particle removal and head loss*. Wat. Res., Vol 26, No.6, pp. 711-726.
25. Dohmann M.,1993:*Materialen zur Vorlesung Abwasserbeseitigung*.Red.Haussmann R. i Pecher.K.H.: Rheinisch-Westfälische Hochschule, Aachen.
26. Drozd J., Licznar M., Licznar St.E., Weber.J.,2002: *Gleboznawstwo z elementami mineralogii i petrografii*. Wyd.II, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
27. Dyakowska J.,1959: *Podręcznik palynologii. Metody i problemy*. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
28. Edel R.,2002: *Odwodnienie dróg*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszaw.
29. Endo Y., Alonso M.,2001: *Physical meaning of specific cake resistance and effects of cake properties in compressible cake filtration*. Filtration and Separation, Issue 7, pp.43-49.
30. Endo Y., Chen D, Pui D.Y.H.,2001: *Air and water permeation resistance across dust cakes on filters-effects of particle polydispersity and shape factor*. Power Technology, Vol.118, pp.24-31.
31. Erdtman G.,1969: *Handbook of palynology. An introduction to the study of pollen grains and spores*. Munksgaard.
32. Faegri K., Iversen J.: *Podręcznik analizy pyłkowej*, 1978.; Wyd. Geologiczne, Warszawa.
33. Faure Y.H., Farkouh B., Delmas Ph., Nancey A.,1999: *Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam*. Geotextiles and Geomembranes, No. 17, pp.353-370.
34. Faure Y.H., Kehila Y., Olivier F., Paillez S.,2000: *Behaviour of non-woven geotextiles for filtration particles in suspension*. Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering. A.A. Balkema, Rotterdam.
35. Fetter C.W.,2001: *Applied hydrogeology*. Forth Edition, University of Wisconsin-Oshkosh, New Jersey.
36. Fourie A.B., Blight G.E.,1996: *Tests to determine the suitability of a geotextile for use in containment of hydraulically placed backfill*. Geotextiles and Geomembranes, No.14, pp.465-480.
37. Gabr M.A., Akram M.H., Zayed A.M.,1998: *Field versus laboratory filtration performance of a nonwoven geotextile with fly ash*. Geotextiles and Geomembranes, No.16, pp.247-255.
38. Gabryszewski T.,Wieczysty A.,1985: *Ujęcia wód podziemnych*; Wyd. Arkady, Warszawa.
39. Geiger W., Dreiseitl H.,1999: *Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych; Poradnik retencjonowania i infiltracji wód deszczowych do gruntu na terenach zabudowanych*. Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz .
40. Gerard P.T.M. van Santvoort.,1994: *Geotextiles and geomembranes in civil engineering*. Red. Ed. Rotterdam A.A Balkema.

41. Göbel P., Stubbw H., Weinert M., Zimmermann J., Fach S., Dierkes C., Kories H., Messer J., Mertsch V., Geiger W.F., Coldeway W.G., 2004: *Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of hydrogeological conditions*. Journal of Hydrology, no. 299, pp.267-283.
42. Gruszecka A., 1984: *Pluviogram syntetyczny jako podstawa określenia hydrogramu przepływu ścieków deszczowych*. Ochrona Środowiska, nr 434/3-4 (20-21), s. 21-24.
43. Gruszecki T., 1983: *Długość obserwacji pluwiograficznych jako podstawa określenia spływów ścieków deszczowych*. Ochrona Środowiska, nr 463 /1(23), s.59-62.
44. Hotłoś H., Kotowski A., Cieżak J., 1983: *Wpływ procesu kolmatacji i odkładania się osadów na wodochłonność basenów infiltracyjnych na przykładzie ujęć wodociągowych m. Wrocławia*; Ochrona Środowiska, nr 15, s.56-60.
45. Hotłoś H., Łomotowski J., 1983: *Modelowanie zmian prędkości infiltracji wody z basenów infiltracyjnych*. Ochrona Środowiska, nr 15, s.50-55.
46. Hotłoś H., 1991: *Modelowe badania wpływu jakości wody powierzchniowej i sposobu eksploatacji basenów infiltracyjnych na ich wydajność*. GWiTS, nr 7, s.152-155.
47. Hotłoś H., 1989: *Modelowe badania wpływu osadów dennych na prędkość infiltracji wody do gruntu w basenach infiltracyjnych*. GWiTS, nr 2 LXIII, s.43-45.
48. Hotłoś H., 1991: *Modelowe badania wpływu jakości wody powierzchniowej na wydajność basenów infiltracyjnych*. GWiTS, nr 6, s.122-124.
49. Hotłoś H., Kotowski A., Mielcarzewicz E. Wł., 1987: *Badania na modelach wpływu procesu kolmatacji dna basenów infiltracyjnych na prędkość infiltracji wody do gruntu*; GWiTS, nr 6, s.133-137.
50. Hotłoś H., Kozakowski P., Mielcarzewicz E. Wł., 1983: *O sposobach intensyfikacji infiltracyjnych ujęć wody na przykładzie ujęć infiltracyjnych m Wrocławia*. Ochrona Środowiska, nr 16-17, s. 19-22.
51. Hotłoś H., Łomotowski J., 1986: *Wpływ intensywności zalewania i napełniania wodą basenów infiltracyjnych na ich wydajność*. Konferencja naukowo - techniczna "Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", Poznań.
52. <http://alergen.info.pl>
53. <http://www.atlas-roślin.pl>
54. Hyde H.A., Adams K.F., 1958: *An atlas of airborne pollen grains*. Macmillan and company limited, New York.
55. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, 2001. (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm).
56. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: *Synthesis Report*. 2001.
57. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2003, *Summary for Policymakers*. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2003.
58. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Technical Summary*. A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail. 2003 .
59. Jaskowski J., 1983 : *Badania nad intensywnością działania stawów infiltracyjnych ujęcia w Poznaniu*. Ochrona Środowiska nr 15, s.66-69.
60. Knight, J.H., 1973: *Solutions of the Nonlinear Diffusion Equation: Existence, Uniqueness, and Estimation*. Ph.D. Thesis. Australian National University, Canberra.

61. Kołodziejak-Nieckuła E., 1995: *Pyłkowy deszcz*. Wiedza i życie, s.28-31.
62. Kordas B., Kamiński B., 1968: *Empiryczne wzory na określenie współczynnika filtracji w świetle badań laboratoryjnych*. Gospodarka Wodna, nr 10, s. 373-377.
63. Kossenday Th., 1999: *Long-term performance assessed from compatibility tests*. Geotextiles and Geomembranes, No.17, pp.281-298.
64. Kotowski A., Kozakowski P., Mielcarzewicz E. Wł., 1983: *Koncepcje konstrukcji i technologii budowy ujęć infiltracyjnych wody m. Wrocławia*; Ochrona Środowiska, nr 15, s.43-49.
65. Kowal A.L., 1983: *O przydatności infiltracji oczyszczania wód powierzchniowych*. Ochrona Środowiska, nr 15, s.5-7.
66. Kowal A.L., Świdarska-Bróz M., 1998: *Oczyszczanie wody*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław.
67. Kowal. A. L., Sozański M. M., 1977: *Podstawy doświadczalne systemów oczyszczania wód. Sedymentacja, koagulacja i filtracja*. skrypt PWr, Wrocław.
68. Kowal. A.L., 1979: *Znaczenie infiltracji dla zaopatrzenia w wodę*; GWiTS nr 1, s.35-37.
69. Kowal.A.L., Świdarska -Bróz M., 1987: *Procesy i zjawiska w infiltracji*. GWiTS nr 11-12, s.256-260.
70. Kowal.A.L., 1999: *Wykorzystanie infiltracji w oczyszczaniu wody*; Ochrona Środowiska, nr3(74), s.3-6.
71. Kowalski J. , 1998: *Hydrogeologia z podstawami geologii*. Wyd. Akademii Rolniczej we Wrocławiu.
72. Kozakowski P., 1987: *Poddenne infiltracyjne ujęcia wody nowego typu*; Gospodarka Wodna, R47, nr 10, s.28-34.
73. Lambor J., 1971: *Hydrologia inżynierska*. Wyd. Arkady, Warszawa.
74. Legret M., Colandini V., Marc C.Le., 1996: *Effects of a porous pavement with reservoir structure on the quality of runoff water and soil*. The Science of the Total Environment, Vol. 189 No.190, pp.335-340.
75. Licznar P., 2004: *Metody wyznaczania natężeń maksymalnych deszczy do projektowania systemów odwadniania. Wspomaganie informatyczne rozwoju społeczno-gospodarczego i ochrony środowiska*. Seria: Badania systemowe, tom 36, s.299-305, Warszawa.
76. Licznar P., 2004: *Podstawy obliczania i projektowania systemów odwodnienia*. Przegląd komunalny, nr 11, s. 125-131.
77. Licznar P., Łomotowski J., 2004: *Systemy monitoringu i sterowania odpływem wód opadowych*. Przegląd komunalny, nr 11, s. 136-138.
78. Łomotowski J., 1994: *Infiltracja jako proces w technologii wody*. Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu nr 124, Rozprawa habilitacyjna.
79. Łomotowski J., Burszta-Adamiak E., Kozłowska E., Licznar P., 2003: *Wybrane zagadnienia projektowania kanalizacji deszczowej*. Mat. V Zjazdu Kanalizatorów Polskich „POLKAN 2003”, Łódź.
80. Łomotowski J., Hotłoś H., 1984: *Zmiany prędkości infiltracji przy stałej wysokości wody w basenach infiltracyjnych*. IX Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, Poznań.
81. Łomotowski J., Burszta-Adamiak E., 2003: *Rozwiązanie problemów wód opadowych na terenie wsi*. Mat. Konf. „Problemy gospodarki ściekowej u progu wejścia Polski do Unii Europejskiej”, Poznań.

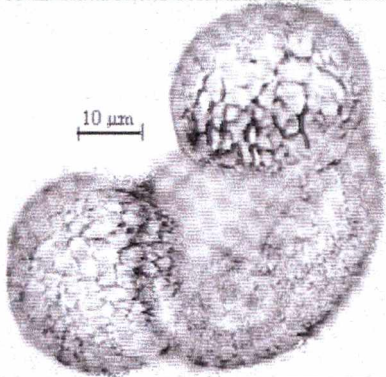
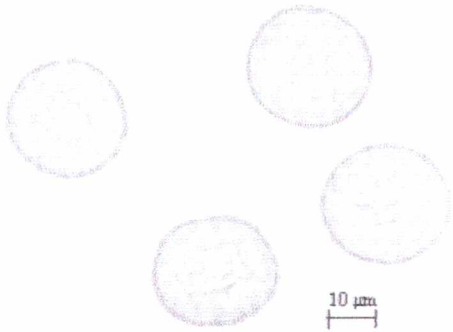
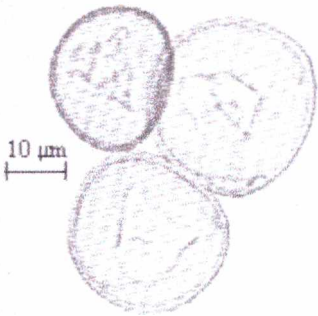
82. Maćkiewicz J., Sozański M., 1973: *Analiza zjawisk hydraulicznych filtracji pośpiesznej*. GWiTS, nr 4, t.XLVII, s.123-129.
83. Maślanka K., 1996: *Ocena geowłóknin w drenażach rolniczych i umocnieniach kanałów melioracyjnych*. Zeszyty Naukowe AR im Kołłątaja H. W Krakowie, Rozprawa nr 210.
84. Maślanka K., 2000: *A device used to determine water permeability of geotextile materials and soils*. Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering. A.A. Balkema, Rotterdam.
85. Mbagwu J.S.C., 1995: *Testing the goodness of fit of infiltration models for highly permeable soils under different tropical soil management systems*; Soil and Tillage Research, no. 34, Issue 3, pp.199-205.
86. McCave I.N., Syvitski J.P.M., 1991: *Principles and methods of geological particle size analysis*. Principles, methods and application of particle size analysis. Cambridge University Press.
87. Mielcarzewicz E.Wł., Hotłoś H., Kotowski A., Łomotowski J., 1984: *Zasady projektowania obiektów sztucznej infiltracji wody*; Ochrona Środowiska nr 18, s.27-34.
88. Mielcarzewicz E.Wł., Kotowski A., Hotłoś H., 1983 : *Kryteria oceny przydatności terenów i źródeł wody powierzchniowej do sztucznej infiltracji*. Ochrona Środowiska, nr 16-17, s.25-28.
89. Mielcarzewicz E.Wł., 1984: *Zapotrzebowanie na wodę i jej ujmowanie w celu zasilania systemów wodociągowych*; Mat. konferencyjne: Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi. IX krajowa konferencja naukowo-techniczna. NOT Rada woj. w Poznaniu. PZITS oddz. w Poznaniu.
90. Mielcarzewicz E.Wł., Hotłoś H., Kotowski A., Łomotowski J., 1982: *Zasady projektowania obiektów sztucznej infiltracji wody*. Mat. seminarium szkoleniowego projektantów wodociągów, Zakopane.
91. Mielcarzewicz Wł., 1984: *Możliwości racjonalizacji gospodarki ściekami deszczowymi na terenach zurbanizowanych*; XXX Jubileuszowa Konf.Nauk. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Krynica.
92. Mioduszeński W., 2002: *Odbudowa retencji małych zlewni rzecznych elementem ochrony przed powodzią i suszą*; Gospodarka Wodna, nr 4, s. 459-463.
93. Młynarek J., Vermeersch O., 1999: *Filter criteria for geotextile materials in soil filtration and leachate collection systems*. Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and landfill Symposium S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
94. Młynarek J., 1990: *Wodoprzepuszczalność i porowatość geotekstyliów (część II)*. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, nr 1-3, s.11-12.
95. Moo-Young H., Myers T.E., Townsend D., Ochola Ch., 1999: *The migration of contaminants through geosynthetic fabric container (GFCs) utilized in dewatering operations*. Engineering Geology no.53, pp.167-176.
96. Moo-Young H.K., Gaffney D.A., Mo X., 2002: *Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes*. Geotextiles and Geomembranes, No. 20, pp.289-303.
97. Moo-Young H.K., Tucker W.R., 2002: *Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes*. Geotextiles and Geomembranes, No.20, pp.191-212.
98. Narejo D.B., 2003: *Opening size recommendations for separation geotextiles used in pavements*. Geotextiles and Geomembranes, No. 21, pp.257-264.
99. Nowak B., 1987: *Geotekstyli a woda w gruncie*. Inż. i Bud., nr 6, s.203-207.
100. Nowakowska-Błaszczuk A., 1988.: *Możliwości wprowadzania wód deszczowych do gruntu*. Ochrona Środowiska, nr 3-4 (36-37), s. 81-85.

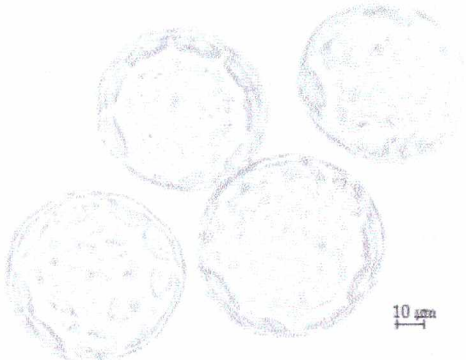
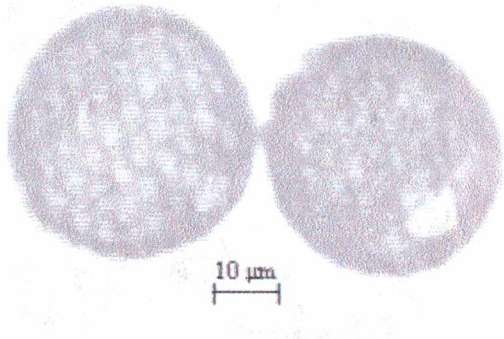
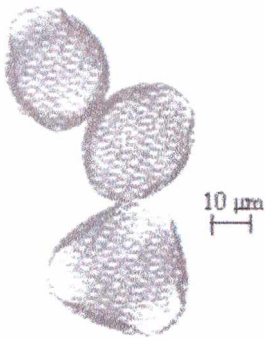
101. Nowakowska-Błaszczuk A.,2004: *Projektowanie systemów infiltracyjnych (cz.1). Wnioski z doświadczeń projektowych*. Rynek instalacyjny, nr 11, s.43-48.
102. Ozga-Zielińska M., Baziński J.,1997: *Hydrologia stosowana*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
103. Palmeira E.M., Gardoni M.G.,2002: *Drainage nad filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques*. Geotextiles and Geomembranes no. 20, pp.97-115.
104. Parlange, J.Y.,1975: *A Note on the Green and Ampt Equation*. Soil Science, Vol. 119 no.6, pp.466-467.
105. Paulsen O.,1987: *Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung*. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrology und landwirtschaftlichen Waserbau, Universität Hannover, Heft 62.
106. Pérez-Paricio A.,2001: *Integrated modelling of clogging processes in artificial groundwater recharge*. Ph.D.Thesis, Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona.
107. Philip, J.R.,1969: *Theory of Infiltration*. Advances in Hydrosience, no.5, pp. 215-296 Academic Press, New York.
108. Philip, J.R.,1957: *The Theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution*. Soil Science, No.83, pp. 345-357.
109. Philip, J.R.,1957: *The Theory of infiltration:2. The profile of infinity*. Soil Science, No. 83, pp. 435-448.
110. Philip, J.R.,1957: *The Theory of infiltration: 3. Moisture profiles and relation to experiment*. Soil Science, No. 84, pp. 163-178.
111. Philip, J.R.,1957: *The Theory of Infiltration 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations*. Soil Science, No. 84, pp.257-264.
112. *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices* EPA-821-R-99-012, Washington 1999.
113. Ralph D.E., Stevenson J. M.,1995: *The role of bacteria in well clogging*. Wat. Res. Vol. 29. No. 1 pp. 365-369.
114. Ravi V., Williams J.R.1998: *Estimation of infiltration rate in vadose zone: Application of selected mathematical models*. Vol. I. EPA/600/R-97/128a.
115. Ravina I., Paz E., Sofer Z., Marcu., Schischa A., Sagi G., Yechialy Z., Lev Y.,1997: *Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent*. Agricultural Water Management, 33, pp.127-137.
116. Rick-Pfeiffer S., Rogusa S., Sztajn bok P., Vandeveld T.,2000: *Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) Wells*. Wat. Res., Vol. 34. No. 7 pp. 2110-2118.
117. Rybicki S.A.,1983: *Wykorzystanie sztucznej infiltracji w odnowie wody*; Ochrona Środowiska, nr 15, s.14-17.
118. Sakthivadivel R., Thanikachalam V., Seetharaman S.,1972: *Head - Loss Theories Infiltration*; Journal AWWA, pp. 233-238.
119. Salvucci, G.D., Entekhabi D.,1994: *Explicit expressions for Green-Ampt (Delta function diffusivity) infiltration rate and cumulative storage*. Water Resour. Res., 30:2661-2663.
120. Semka T., Mąkinia J., Gudelis K.,2000: *Komory drenażowe do odwadniania układów komunikacyjnych*. Mat. Sem. Szkol. "Odwodnienia drogowe z uwzględnieniem autostrad i dróg szybkiego ruchu, Poznań.

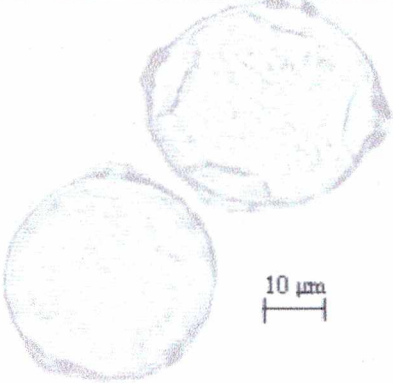
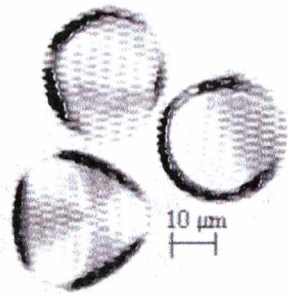
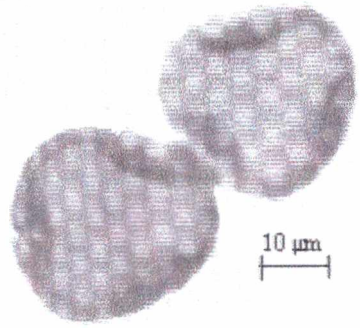
121. Sieker F.,1998: *On-site stormwater management as an alternative to conventional sewer systems: a new concept spreading in Germany*. Wat. Sci.Tech., Vol 38, no 10, pp.65-71.
122. Suligowski Z.,2002: *Wprost do gruntu*. Magazyn instalatora nr 12(52), s. 76-77.
123. Suligowski Z., Gudelis-Taraszkiewicz K.,2003: *Infiltracja do gruntu - alternatywa dla tradycyjnej kanalizacji wód opadowych*; Przegląd Komunalny nr 5, s.76-77.
124. Suligowski Z., Gudelis-Taraszkiewicz K.,2003: *Zagrożenia związane z funkcjonowaniem odwodnień i kanalizacji wód opadowych*. Mat. Sem. Szkol. "Odwodnienia drogowe z uwzględnieniem dróg szybkiego ruchu i autostrad, Poznań.
125. Suligowski Z., Gudelis-Taraszkiewicz K.,2003: *Alternatywne rozwiązanie kanalizacji wód opadowych*. GWiTS nr 12, s.423-426.
126. Suligowski Z., Gudelis-Taraszkiewicz K.,2004: *Kanalizacja wód opadowych, elementy rozwiązań alternatywnych*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2, s.73-76.
127. Swartzendruber, D., Clague. F.R. ,1989: *An Inclusive Infiltration Equation for Downward Water Entry into Soil*. Wat. Resour. Res. Vol. 25 no.4, pp.619-626.
128. Szpindor A,1998: *Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi*. Wyd. Arkady, Warszawa.
129. Taylor S.W., Jaffe P.R.,1990:*Substrate and biomass transport in a porous medium*. Water Resources Research, Vol.26, No.9, pp.2181-2194.
130. Taylor S.W., Milly P.C.D., Jaffe P.R.,1990: *Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium.2. Permeability*. Water Resources Research, Vol.26, No.9, pp.2161-2169.
131. Taylor S.W., Jaffe P.R.,1990: *Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium.1.Experimental Investigation*. Water Resources Research, Vol.26, No.9, pp.2153-2159.
132. Tesařík I.,1980: *Separácia suspendovaných častíc pri úprave vody*. VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava.
133. Thorolfsson S.T.,1998: *A new direction in the urban runoff and pollution management in the city of Bergen, Norway.*; Wat. Sci.Tech., Vol.38, No.10, pp.123-130.
134. Togrol E., Guler E., Ersoy T.,1987: *Filtration properties of soil geotextile systems. Filters*.General Raport IX International European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering Groundwater Effects in Geotechnical Engineering, Dublin, vol 2.
135. Trzeciak Cz.,1983: *Efektywność oczyszczania wód podziemnych w gruncie*. Ochrona Środowiska nr 15, s.63-65.
136. Van Genuchten, M.Th.,1980: *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892–898.
137. Vandevivere P., Baveye P., Sanchez de Lozada D., Deleo P.,1995: *Microbial clogging of saturated soils and aquifer materials:evaluation of mathematical models.*; Water Resources Research ,Vol.31, No.9, pp.2173-2180.
138. Vigneswaran S.,Suazo R.B.,1987: *A detailed investigation of phisical and biological clogging during artificial recharge.*; Water, Air and Soil Pollution No.35, pp.119-140.
139. Warnaars E., Lersen A.V., Jacobsen P., Mikkelsen P.S.,1999: *Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2 3/4 years of operation*. Wat.Sci.Tech., Vol.39., No.2., pp.217-224.
140. Watanabe S.,1995: *Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes*. Wat. Sci. Tech. Vol.32. No 1, pp.25-32.

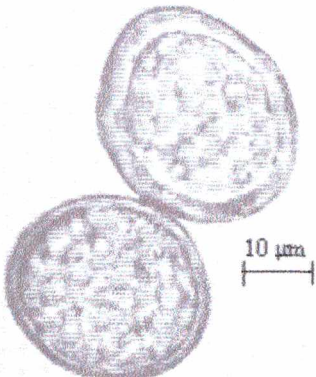
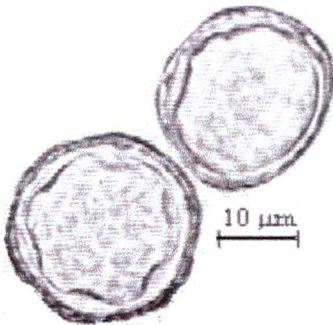
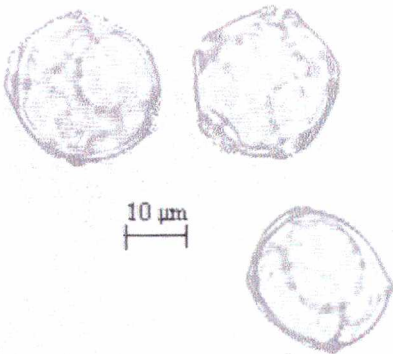
141. Williams J.R., Ouyang Y., Chen J.S., Ravi V.,1998: *Estimation of infiltration rate in vadose zone: Application of selected mathematical models*. Vol. II. EPA/600/R-97/128b.
142. Wiłun Z.,2003: *Zarys geotechniki. Podręcznik akademicki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
143. Wójcik Wł., Dziopak J., Dąbrowski W.,1985: *Badania nad zapobieganiem inkrustacji biologicznej studni*. GWiTS nr 1, s. 17-19.
144. Zawilski M., Sakson G.,2004: *Systemy wykorzystania wody deszczowej i ich wpływ na funkcjonowanie kanalizacji miejskiej*. GWiTS, nr 9, s. 298-302.

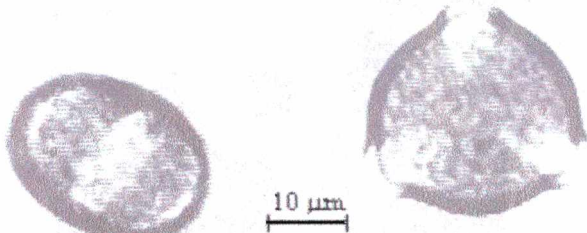
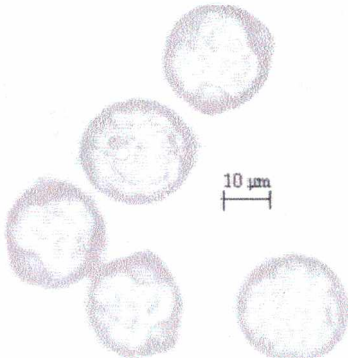
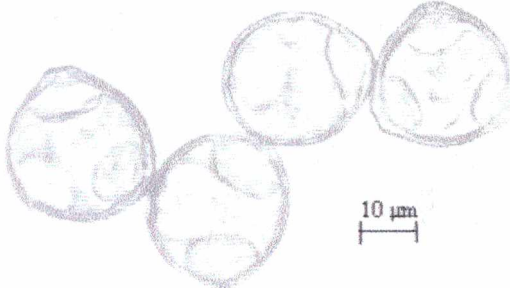
Załącznik 1
Przykłady pyłków roślinnych występujących w atmosferze

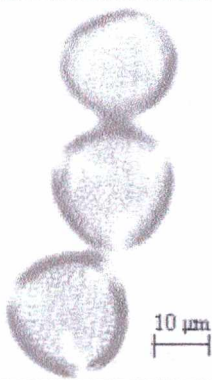
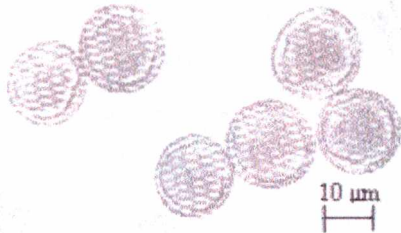
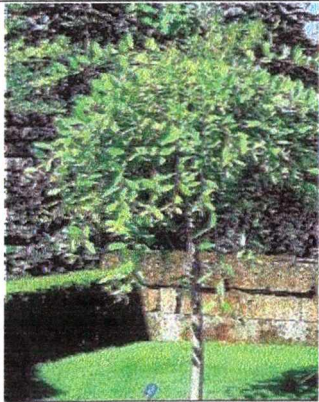
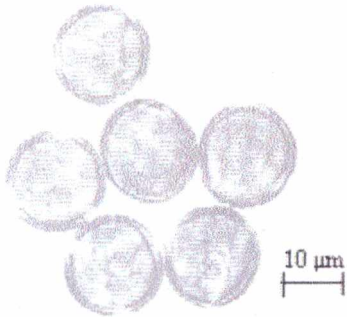
FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
DRZEWA I KRZEWY IGLASTE	
	
<i>/Pinus silvestris L./</i> Sosna zwyczajna	wielkość pyłku 59 µm
	
<i>/Juniperus communis L./</i> Jałowiec pospolity	wielkość pyłku 26-32 µm
	
<i>/Taxus baccata L./</i> Cis pospolity	wielkość pyłku 25 µm

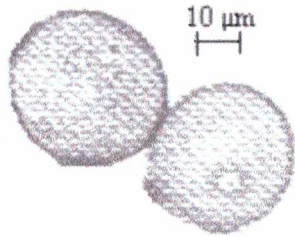
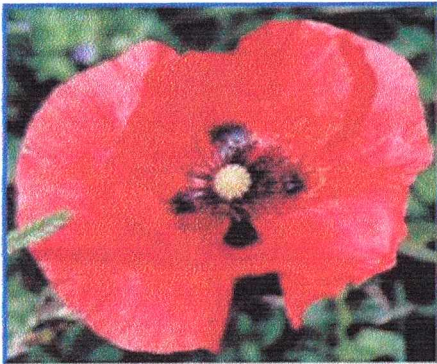
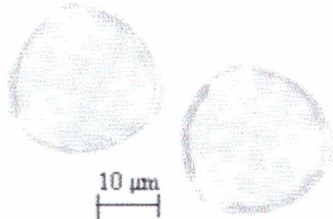
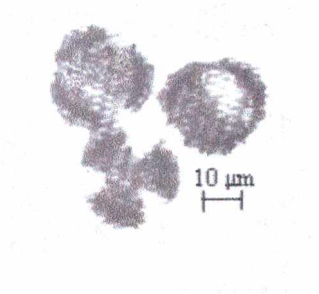
FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
DRZEWA I KRZEWY LIŚCIASTE	
	
<i>Juglans regia</i> L./ Orzech włoski	wielkość pyłku 48 μm
	
<i>Fagus silvatica</i> L./ Buk zwyczajny	wielkość pyłku 38 μm
	
<i>Crataegus monogyna</i> Jacq. / Głóg jednoszyjkowy	wielkość pyłku 37 μm

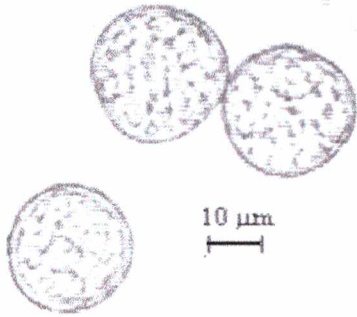
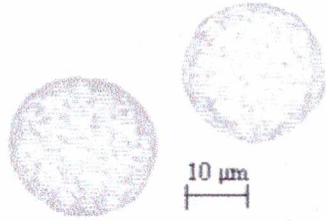
FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
DRZEWA I KRZEWY LIŚCIASTE	
	
<i>/Carpinus betulus L./</i> Grab zwyczajny	wielkość pyłku 35 μm
	
<i>/Acer pseudoplatanus L./</i> Klon jaworowy	wielkość pyłku 32 μm
	
<i>/Tilia cordata Mill./</i> Lipa drobnolistna	wielkość pyłku 31 μm

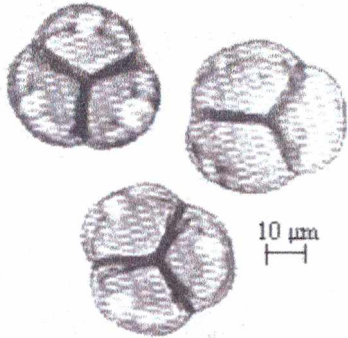
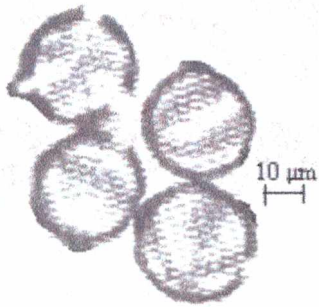
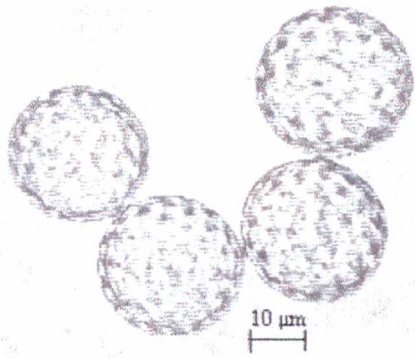
FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
DRZEWA I KRZEWY LIŚCIASTE	
	
<i>/Populus tremula L./</i> Topola osika	wielkość pyłku 29 μm
	
<i>/Ulmus foliacea Mill./</i> Wiąz pospolity	wielkość pyłku 27 μm
	
<i>/Alnus glutinosa L./</i> Olsza czarna	wielkość pyłku 25 μm

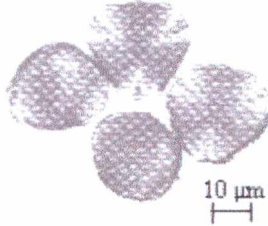
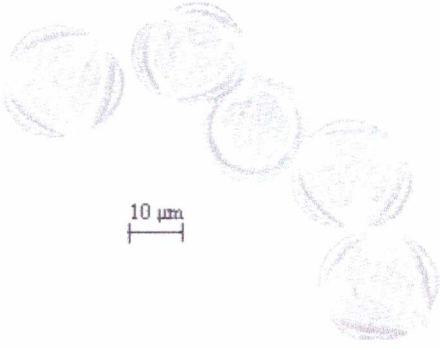
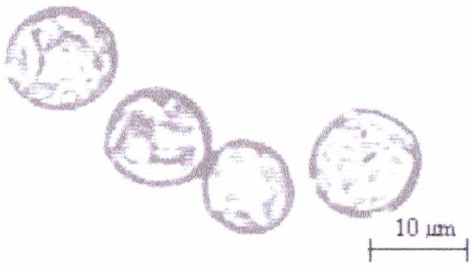
FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
DRZEWA I KRZEWY LIŚCIASTE	
	
<i>/Quercus robur L./</i> Dąb szypułkowy	wielkość pyłku 25 µm
	
<i>/Betula verrucosa Roth./</i> Brzoza brodawkowata	wielkość pyłku 24 µm
	
<i>/Corylus avellana L./</i> Leszczyna	wielkość pyłku 24 µm

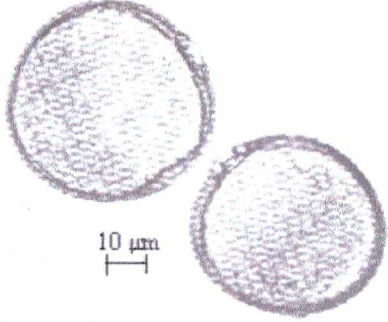
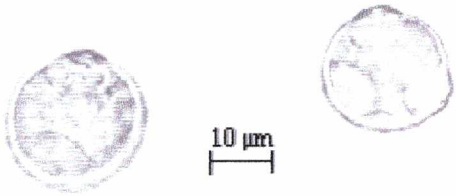
FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
DRZEWA I KRZEWY LIŚCIASTE	
	
<i>/Fraxinus excelsior L./</i> Jesion wyniosły	wielkość pyłku 22 μm
	
<i>/Platanus acerifolia (Ait.) Willd./</i> Platan klonolistny	wielkość pyłku 18 μm
	
<i>/Salix caprea L./</i> Wierzba iwa	wielkość pyłku 17 μm

FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
ROŚLINY UPRAWNE - ŁĄKOWE	
	
<i>/Phleum pratense L./</i> Tymotka łąkowa	wielkość pyłku 32 µm
	
<i>/Papaver rhoeas L./</i> Mak polny	wielkość pyłku 30 µm
	
<i>/Achillea millefolium L./</i> Krwawnik pospolity	wielkość pyłku 26 µm

FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
ROŚLINY UPRAWNE - ŁĄKOWE	
	
<i>/Rumex acetosa L./</i> Szczaw zwyczajny	wielkość pyłku 24 µm
	
<i>/Plantago lanceolata L./</i> Babka lancetowata	wielkość pyłku 23 µm
	
<i>/Taraxacum officinale agg./</i> Mniszek lekarski	wielkość pyłku 22 µm

FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
ROŚLINY UPRAWNE - DZIKOROSNĄCE	
	
<i>/Calluna vulgaris (L.) Hull./</i> Wrzos zwyczajny	wielkość pyłku 36 µm
	
<i>/Lythrum salicaria L./</i> Krwawica pospolita	wielkość pyłku 32 µm
	
<i>/Chenopodium polyspermum L./</i> Komosa wielkonasienna	wielkość pyłku 25-34 µm

FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
ROŚLINY UPRAWNE - DZIKOROSNĄCE	
	
<i>Potentilla erecta (L.) Rausch./</i> Pieciornik kurze ziele	wielkość pyłku 24 µm
	
<i>Artemisia campestris L./</i> Bylica polna	wielkość pyłku 22 µm
	
<i>Urtica dioica L./</i> Pokrzywa zwyczajna	wielkość pyłku 11 µm

FOTOGRAFIE ROŚLIN	FOTOGRAFIE PYŁKÓW
ROŚLINY UPRAWNE - POLOWE	
	
<i>/Triticum vulgare Host./</i> Pszenica zwyczajna	wielkość pyłku 52 μm
	
<i>/Humulus lupulus L./</i> Chmiel zwyczajny	wielkość pyłku 21 μm

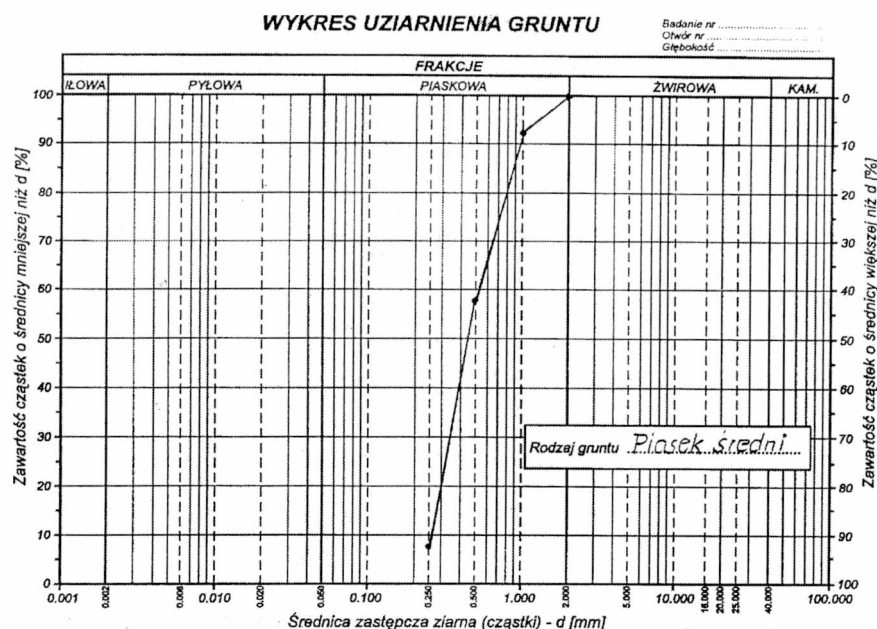
Załącznik 2

Wyniki analiz uziarnienia i porowatości piasku użytego do badań laboratoryjnych

Analizę sitową piasku przeprowadzono zgodnie z PN-75/B-04481 *Grunty budowlane. Badania laboratoryjne*. Do badań użyto wagi laboratoryjnej o dokładności ważenia 0,01 g, wytrząsarkę mechaniczną, komplet sit o wymiarach boków oczek kwadratowych 10,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1; 0,06 mm oraz suszarkę z termostatem umożliwiającym utrzymanie stałej temperatury 105–110 °C. Na podstawie wyników analizy sitowej wykonano wykres uziarnienia piasku (rys. 137), który posłużył do określenia charakterystycznych średnic uziarnienia gruntu d_{60} i d_{10} . Są to średnice zastępcze ziaren piasku, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio 60 i 10% ciężaru całej próbki, na podstawie których obliczono wskaźnik nierównomierności uziarnienia U zdefiniowany wyrażeniem:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (66)$$

Dla analizowanego piasku uzyskano $d_{60} = 0,52$ mm, $d_{10} = 0,25$ a $U = 2,08$. Analizowany piasek, zgodnie z normą jest piaskiem średnim.



Rys. 137. Wykres uziarnienia złoża filtracyjnego

Porowatość ustalono dwoma metodami:

- a) za pomocą wskaźnika porowatości e , którego wartość oblicza się formułą:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (67)$$

gdzie: ρ_s - gęstość właściwa szkieletu gruntowego w g/cm^3 , ρ_d - gęstość objętościowa szkieletu gruntowego w g/cm^3 . Przyjęto za tabelą 17-8 zamieszczoną w pracy [142] $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ i $\rho_d = 1,8 \text{ g/cm}^3$, skąd $e = 0,47$. Porowatość ε obliczono wzorem:

$$\varepsilon = \frac{e}{1+e} \quad (68)$$

$$\varepsilon = \frac{0,47}{1+0,47} = 0,32$$

- b) podaną w polskiej normie PN-75/B-04481 *Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.* opartej na oznaczeniu maksymalnej i minimalnej gęstości objętościowej gruntów niespoistych. Do badań wykorzystano naczynie metalowe z tłokiem, metalowe widełki wibracyjne, wagę techniczną o dokładności ważenia 0,1 g oraz suwmiarkę o dokładności mierzenia 0,1 mm (pomiar głębokości). Wartość zmniejszenia objętości gruntu (ΔV) w naczyniu po zagęszczeniu wyznaczono z następującego wzoru:

$$\Delta V = A \Delta h = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta h \quad (69)$$

gdzie: A - pole przekroju poprzecznego wnętrza naczynia w cm^2 , Δh - zmiana odległości górnej powierzchni tłoczka od górnej krawędzi naczynia powstała w wyniku zagęszczenia gruntu w cylindrze w cm, d - średnica cylindra (7,05 cm). Ustalono, że wartość $\Delta h = 1,77 \text{ cm}$, skąd ze wzoru (68) wynika, że $\Delta V = 69,05 \text{ cm}^3$.

Gęstość objętościową szkieletu gruntowego przy najluźniejszym ułożeniu ziaren ρ_{dmin} wyznaczono ze wzoru:

$$\rho_{dmin} = \frac{m_{st} - m_t}{V} \quad (70)$$

gdzie: m_{st} - masa naczynia z gruntem w g, m_t - masa naczynia w g, V - objętość naczynia w cm^3 . Użyte do badań naczynie miało średnicę 25 cm. Na podstawie pomiarów ustalono:

$$\rho_{dmin} = \frac{1129,60 - 365,24}{497,4} = \frac{764,36}{497,4} = 1,54 \text{ g/cm}^3$$

Gęstość objętościową szkieletu gruntowego przy najgęściej ułożonych ziarnach ρ_{dmax} wyznaczono formułą:

$$\rho_{dmax} = \frac{m_{st} - m_t}{V - \Delta V} \quad (71)$$

gdzie: ΔV - zmniejszenie objętości próby w cylindrze przy wibrowaniu w cm^3 , pozostałe parametry jak we wzorze (70). Dla uzyskanych wyników otrzymano:

$$\rho_{d\max} = \frac{1129,60 - 365,24}{497,4 - 69,06} = \frac{764,36}{428,34} = 1,78 \text{ g/cm}^3$$

Średnia gęstość szkieletu gruntowego ρ_{dss} wyniosła:

$$\rho_{dss} = \frac{\rho_{\min} + \rho_{\max}}{2} = \frac{1,53 + 1,78}{2} = 1,66 \text{ g/cm}^3 \quad (72)$$

Przyjmując za tabelą 17-8 za poz. [142] gęstość właściwą szkieletu gruntowego $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ i podstawiając do wzorów (67) i (68), wskaźnik porowatości e oraz porowatość ε wyniosą:

$$e = \frac{2,65}{1,66} - 1 = 0,59$$

$$\varepsilon = \frac{0,59}{1 + 0,59} = 0,37$$

Przyjęto porowatość badanego gruntu jako średnią wartość ustaloną dwoma metodami $\varepsilon = 0,35$.

Załącznik 3

Badania geotechniczne i właściwości fizyczne gruntów w których zamontowano skrzynki AZURA oraz analizy składu granulometrycznego użytych żwirów do obsypek

Na rysunkach 138-140 przedstawiono dokumentację geotechniczną wykonaną w czasie prowadzenia prac ziemnych podczas montażu skrzynek AZURA 1, 2 i 3

KARTA DOKUMENTACYJNA OTWORU GEOTECHNICZNEGO							
Otwór nr 1		dn. 05.05.2003r.					
Głębokość naw. i ustal. zawrody	SKALA 1:20	PROFIL LITOLOGICZNY	Przebieg warstw m	OPIS MAKROSKOPOWY			Straty- grafia
				RODZAJ GRUNTU	Wilgot- ność	Stan	
	0,20	H	0,20	humus+gruz ceglany	mw		
	0,40	Pg	0,20	piasek gliniasty, szaro brązowy		plmpl	
	0,60						
	0,80						
	1,00						
	1,20	Pg	0,80	piasek gliniasty, szaro brązowy		mpl	
	1,30	Gp	0,10	głina piaszczysta, jasno brązowa		pl	
	1,40						

Rys. 138. Karta dokumentacyjna otworu geotechnicznego wykonanego dla montażu skrzynki AZURA nr 1

KARTA DOKUMENTACYJNA OTWORU GEOTECHNICZNEGO							
Otwór nr 2		dn. 05.05.2003r.					
Głębokość naw. i ustal. zawrody	SKALA 1:20	PROFIL LITOLOGICZNY	Przebieg warstw m	OPIS MAKROSKOPOWY			Straty- grafia
				RODZAJ GRUNTU	Wilgot- ność	Stan	
	0,20	H	0,20	humus+gruz ceglany	mw		
	0,30						
	0,40						
	0,60						
	0,80	Ps	0,40	piasek średni zagliniany, szaro-brązowy	w		
	1,00						
	1,20	Gp	0,70	głina piaszczysta, szaro-brązowa		mpl	
	1,30						
	1,40						

Rys. 139. Karta dokumentacyjna otworu geotechnicznego wykonanego dla montażu skrzynki AZURA nr 2

KARTA DOKUMENTACYJNA OTWORU GEOTECHNICZNEGO							
Otwór nr 3		dn. 05.05.2003r.					
Głębokość m. wzrosty	SKALA 1:20	PROFIL LITOLOGICZNY	Przebieg warstw m	OPIS MAKROSKOPOWY			Straty- grafia
				RODZAJ GRUNTU	Wilgot- ność	Stan	
0,20				piasek drobny żgliniasty, żółto-brązowy	mw		
0,40		Pd	0,40				
0,60				głina piaszczysta, żółto-brązowa		pl	
0,80							
0,90		Gp	0,50				
1,00				głina zwęzka, brązowa		pl	
1,20							
1,30		Gz	0,40				
1,40							

Rys. 140. Karta dokumentacyjna otworu geotechnicznego wykonanego dla montażu skrzynki AZURA nr 3

BADANIA SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO

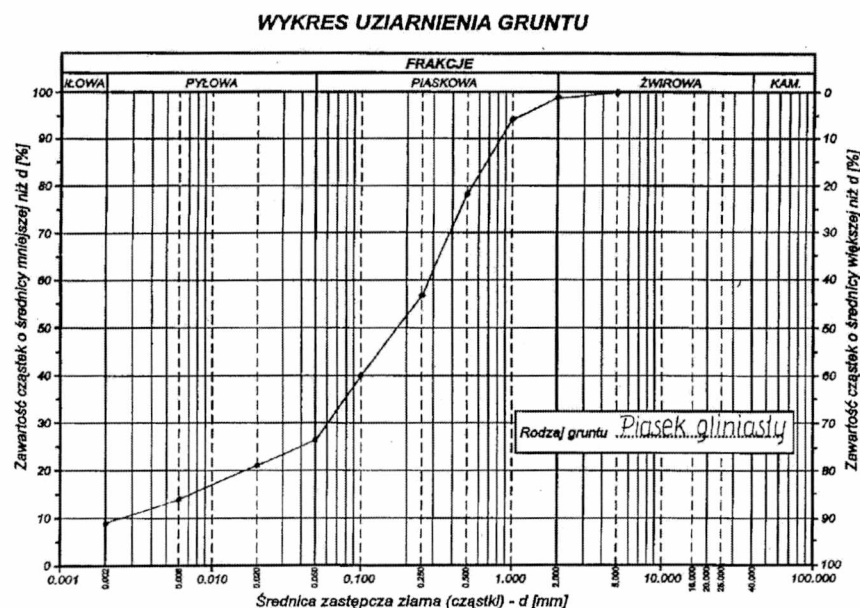
W związku z tym, że w analizowanych profilach glebowych znajdowały się zarówno grunty niespoiste i spoiste do oznaczenia składu granulometrycznego (uziarnienia) gruntów zastosowano dwie metody [142] :

- analizę sitową dla piasków o uziarnieniu większym od 0,05 mm;
- analizę areometryczną, dla gruntów spoistych, zawierających dużą ilość cząstek mniejszych od 0,07 mm.

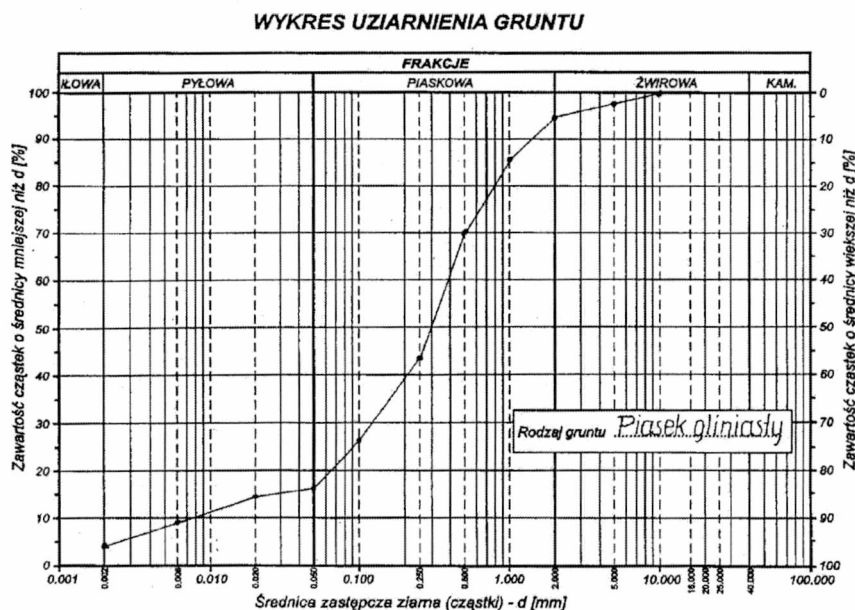
Analizę sitową wykonano według polskiej normy PN-88/B-04481 *Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu*. Analizę areometryczną wykonano na podstawie modyfikacji metody opisanej w PN-88/B-04481 a wprowadzonej przez Prószyńskiego. Jest to metoda sedymentacyjno-sitowa. Zawartość frakcji o średnicy zastępczej większej niż 1 mm oznacza się za pomocą sit, natomiast frakcji drobniejszych metodą sedymentacyjną. Analizowany grunt po oddzieleniu frakcji $d < 1$ mm przygotowuje się w formie zawiesiny i umieszcza w szklanym cylindrze. Po dokładnym wymieszaniu zawartości cylindra stawia się go na stole, pozwalając zawieszonym, cząstkom na swobodne opadanie. W miarę upływu czasu osadzające się cząstki powodują zmniejszenie gęstości zawiesiny. Zasada oznaczania zawartości poszczególnych frakcji opiera się na porównaniu gęstości zawiesiny i płynu kontrolnego. Do tego celu służy aerometr wyskalowany tak, że różnica odczytów w zawiesinie i w płynie kontrolnym

odpowiada całkowitej zawartości procentowej wszystkich cząstek znajdujących się w zawieszynie [26].

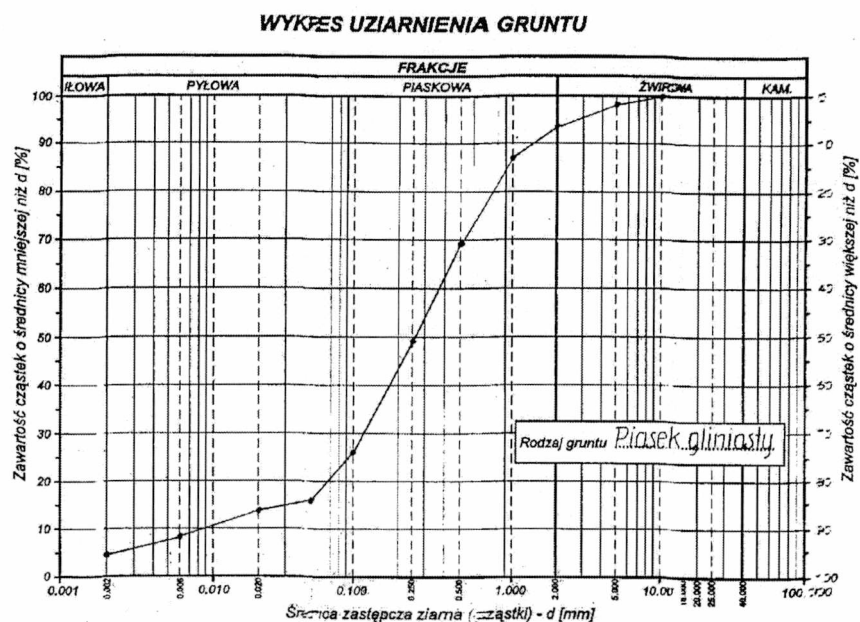
Na podstawie otrzymanych wyników wykreślono krzywe uziarnienia gruntów. Nazwy gruntów określono na podstawie polskiej normy PN-86-B-02480 *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*. Krzywe uziarnienia gruntów pobranych z wykopów przedstawiono na rys. 141-149.



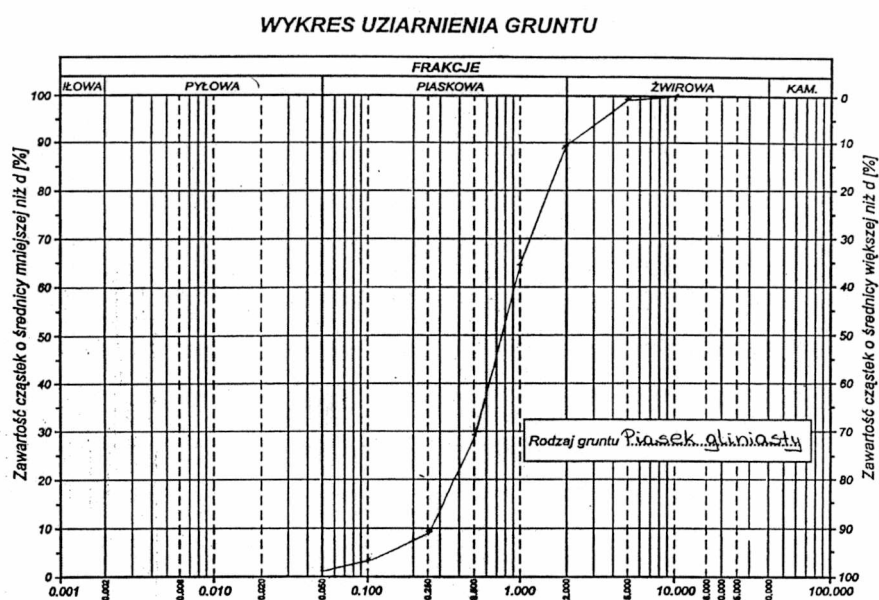
Rys. 141. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 1 na głębokości 0,6 m (próba D1)



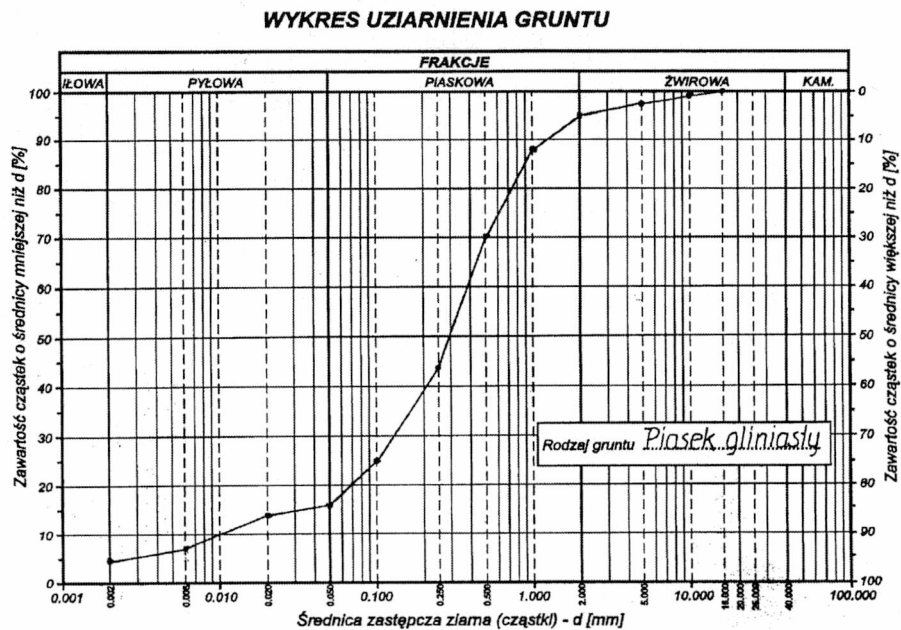
Rys. 142. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 1 na głębokości 0,9 m (próba D2)



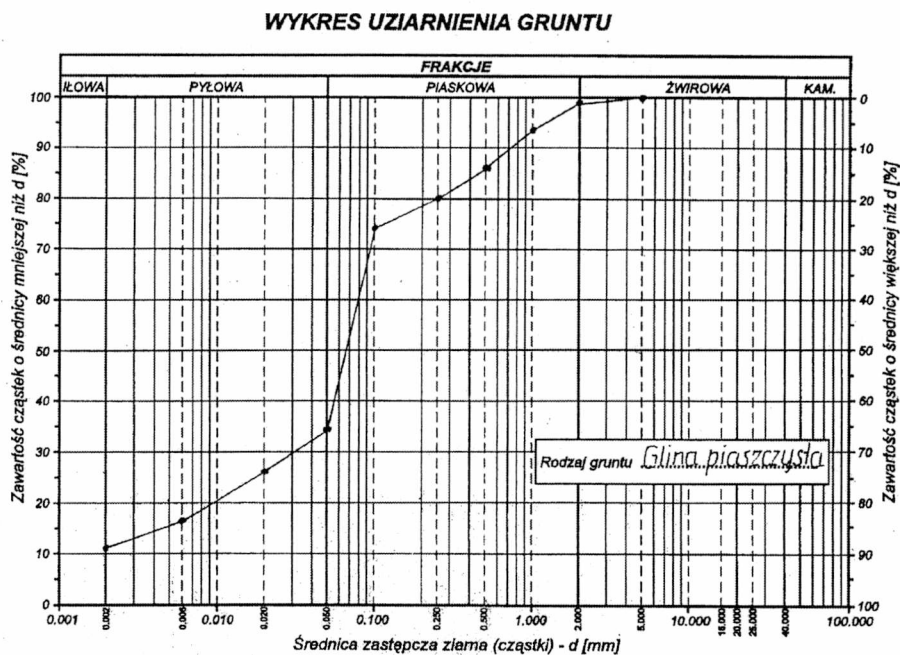
Rys. 143. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 1 na głębokości 1,0 m (próba D4)



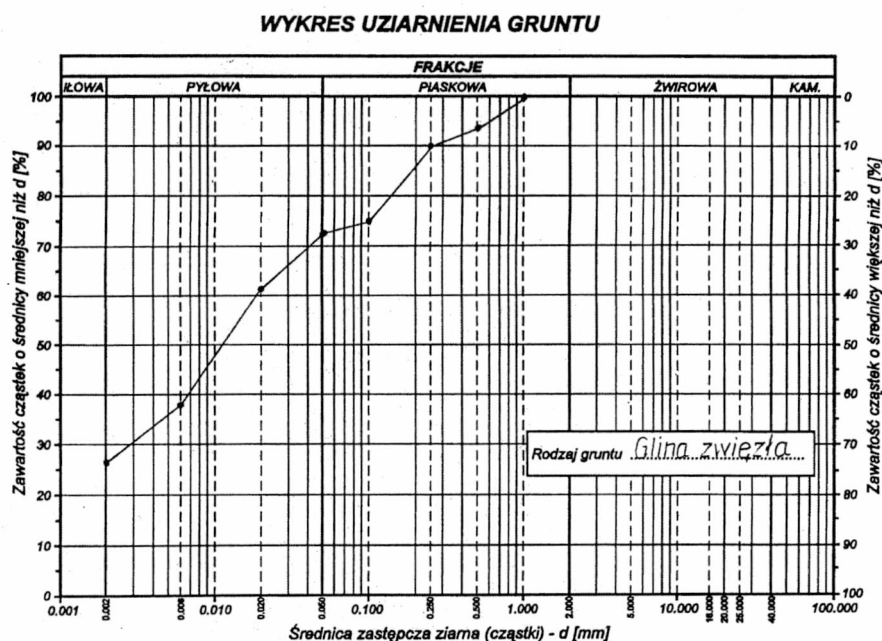
Rys. 144. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 2 na głębokości 0,3 m (próba D11)



Rys. 147. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 0,45 m (próba D6)



Rys. 148. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 0,9 m (próba D7)



Rys. 149. Krzywa uziarnienia gruntu pobranego ze stanowiska 3 na głębokości 1,0 m (próba D8)

OZNACZENIE GĘSTOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ SZKIELETU GRUNTOWEGO

W celu określenia gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d wykorzystano cylinderki do poboru prób o nienaruszonej strukturze, suszarkę z termostatem umożliwiającym utrzymanie stałej temperatury 105-110°C oraz wagę laboratoryjną o dokładności ważenia 0,01 g. Parametr ten obliczono na podstawie następującego wzoru:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (73)$$

gdzie: m_s – masa szkieletu gruntowego wyrażona w g, V – objętość gruntu w cm^3 , m_{st} – masa próbki wysuszonej z masą cylinderka w g, m_t – masa cylinderka w g.

Wyniki obliczeń dla poszczególnych próbek gruntu zestawiono w tabeli 41. W tabeli 42 przedstawiono wyliczone wartości wskaźnika porowatości oraz porowatość.

SKŁAD GRANULOMETRYCZNY OBSYPEK ŻWIROWYCH

Na dnie oraz po bokach wykopów wykonano obsypki żwirowe. Krzywe uziarnienia zastosowanych żwirów przedstawiono na rys. 150-151.

Tabela 41

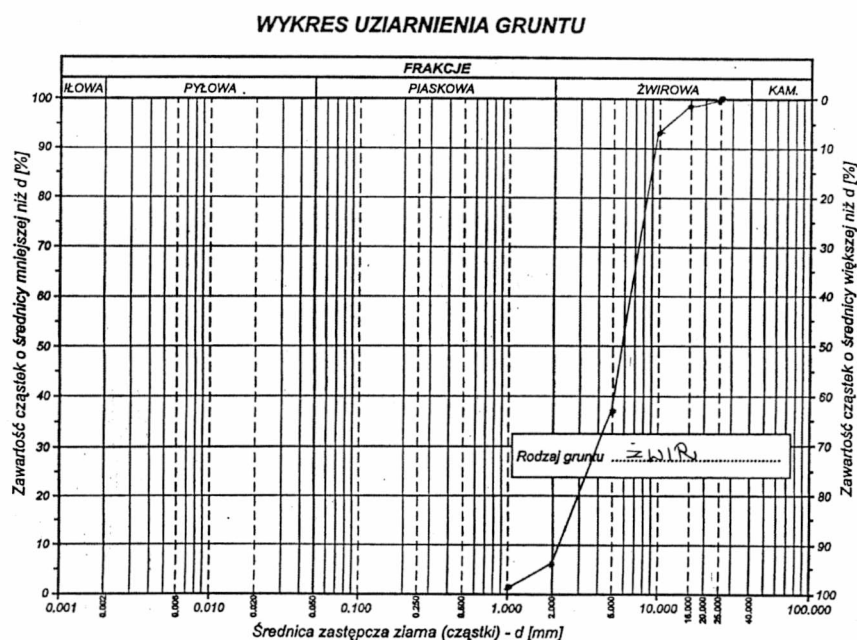
Wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego poszczególnych próbek gruntu

Nr próbki gruntu	Wielkości mierzone			Wielkość obliczona
	m_{st}	m_t	V	ρ_d
	g	g	cm ³	g/cm ³
D1	42,16	12,49	19,81	1,61
D2	35,05	12,20	19,81	1,16
D4	38,92	12,25	19,81	1,35
D5	33,35	12,25	18,46	1,14
D6	34,19	12,32	17,17	1,27
D7	46,72	12,45	19,81	1,73
D8	39,73	12,35	18,46	1,48
D11	39,99	12,40	19,81	1,39
D12	37,67	12,28	19,81	1,28

Tabela 42

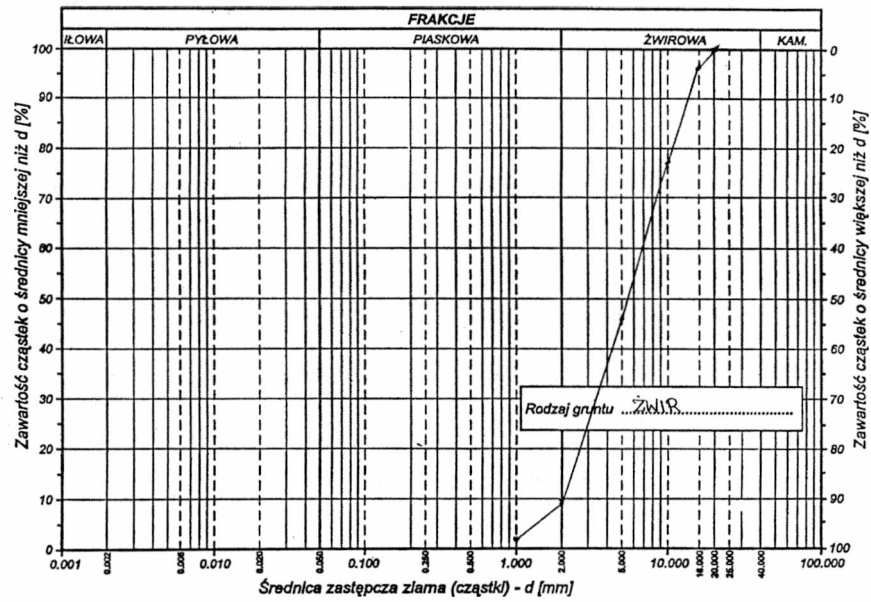
Wartości wskaźnika porowatości i porowatość poszczególnych próbek gruntu

Nr próbki gruntu	Wielkości mierzone		Wielkości obliczone	
	ρ_s	ρ_d	e	ε
	g/cm ³	g/cm ³	-	-
D1	2,65	1,61	0,64	0,39
D2	2,65	1,16	1,28	0,56
D4	2,65	1,35	0,96	0,49
D5	2,65	1,14	1,32	0,57
D6	2,65	1,27	1,09	0,52
D7	2,67	1,73	0,54	0,35
D8	2,69	1,48	0,82	0,45
D11	2,65	1,39	0,90	0,47
D12	2,65	1,28	1,07	0,52



Rys. 150. Wykres krzywej uziarnienia obsypki żwirowej zastosowanej dla skrzynki 1 i 2

WYKRES UZIARNIENIA GRUNTU



Rys. 151. Wykres krzywej uziarnienia obsypki żwirowej zastosowanej dla skrzynki 3