

Badanie efektywności usuwania zawieszin ze ścieków opadowych przy zastosowaniu zbiornika retencyjnego

Testing the effectiveness of removing TSS total suspended solids from stormwater sewage using a retention tank

ROBERT MALMUR, KAMIL PLUTA

DOI 10.36119/15.2024.10.5

Regulacja odpływu wód opadowych z obszarów miejskich jest realizowana głównie przez wykorzystanie systemów kanalizacji deszczowej. Systemy te powinny zapewnić efektywne odprowadzenie wód opadowych z obszarów zurbanizowanych zarówno w ujęciu ilościowym (zapobieganie zjawiskom podtopień) jak i jakościowym (redukcja ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych do odbiorników naturalnych). Można się spodziewać, że w najbliższej przyszłości standardy ochrony wód powierzchniowych przed odpływem wód opadowych ulegną zaostrzeniu i konieczna będzie modernizacja istniejących systemów kanalizacji deszczowej. Systemy odprowadzania wód opadowych należy projektować w sposób zrównoważony. Nie wszędzie można je jednak wdrożyć, głównie ze względu na gęstą zabudowę miejską lub niekorzystne warunki gruntowo-wodne. Dlatego też rozwój i modernizacja systemów podziemnych, głównie poprzez zwiększanie ich pojemności retencyjnej, pozostaje istotnym problemem inżynierskim. W artykule omówiono koncepcję wykorzystania zbiornika retencyjnego jako regulatora rozdziału odpływu wód opadowych. Stanowi alternatywę dla opisywanych w literaturze separatorów przepływu stosowanych w systemach kanalizacji deszczowej.

Słowa kluczowe: kanalizacja, kanalizacja półrozdzielcza, zbiorniki retencyjne, SWMM 5.0, jakość wód opadowych

Stormwater runoff from urban areas is mainly controlled by the use of storm sewage systems. These systems are expected to ensure efficient drainage of rainwater from urbanized areas in terms of quantity (prevention of flooding) and quality (reduction of pollutant load discharged to natural water reservoirs). It can be expected that standards for protecting surface water from rainwater runoff discharges will be tightened in the near future, and modernization of existing storm sewage systems will be necessary. Stormwater systems should be designed in a sustainable manner. However, they cannot be implemented everywhere, mainly due to dense urban development or unfavorable soil and water conditions. Therefore, the development and modernization of underground systems, mainly by increasing their retention capacity remain an important engineering problem. The present paper discusses the concept of using a retention reservoir as a controller of rainwater runoff distribution. It offers an alternative to the flow separators used in the storm sewage systems described in the literature.

Keywords: sewage systems, semi-separate sewer system, storage tanks, SWMM 5.0, quality of stormwater

Wstęp

Spływ powierzchniowy wód opadowych pochodzących z obszarów zlewni stanowi jeden z podstawowych elementów obiegu wody w przyrodzie, a jego oddziaływanie na środowisko wodne jest problemem złożonym. Wpływ na to ma bardzo duża zmienność parametrów jakościowych i ilościowych spływów opadowych [5, 7].

Problematyka składu jakościowego wód opadowych stanowi ważny element przy ocenie wpływu ich zrzutu na odbiornik wodny. Przez lata ścieki deszczowe

odprowadzane do wód powierzchniowych przez systemy kanalizacyjne uważane były za stosunkowo czyste. Uważano, że nie mają znacznego wpływu na środowisko wodne. Prowadzone w ostatnich latach badania zaprzeczają tej tezie i potwierdzają znaczny wzrost ilości zanieczyszczeń występujących w spływie powierzchniowym, a także większą objętość samych ścieków deszczowych odprowadzanych do sieci kanalizacyjnej. Spowodowane jest to głównie zwiększeniem powierzchni nieprzepuszczalnych, wynikające z rozbudowy miast [6, 9, 13, 16].

Charakterystyczna dla ścieków opadowych jest duża zmienność zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Przeprowadzane badania dowiodły, że określenie dokładnego składu zanieczyszczeń występujących w ściekach opadowych jest bardzo trudne, ponieważ na ilość i jakość odpływu do sieci kanalizacyjnych wpływa wiele różnych czynników i zjawisk. W czasie spłukiwania powierzchni zlewni kumulowane są kolejne zanieczyszczenia, których ilość i charakter zależą w dużej mierze od cech obszaru, z którego pochodzą [1, 4, 8].

Dr inż. Robert Malmur <https://orcid.org/0000-0003-1916-8666> – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Częstochowa, e-mail: robert.malmur@pcz.pl (autor korespondencyjny)

Dr inż. Kamil Pluta <https://orcid.org/0009-0008-0163-1353> – Częstochowa, Polska, e-mail: kamil-pluta@o2.pl

Występująca w ściekach deszczowych zawiesina jest głównym nośnikiem innych zanieczyszczeń znajdujących się w spływach opadowych. W licznych badaniach stwierdzono ścisłe zależności pomiędzy ilością zawiesiny ogólnej a stężeniem niektórych zanieczyszczeń, takich jak np.: związki organiczne, metale ciężkie, substancje ropopochodne [4, 5, 17]. Podstawowym procesem w oczyszczaniu ścieków opadowych z zawiesiny ogólnej jest sedimentacja, polegająca na opadaniu cząstek ciała stałego o gęstości większej niż płyn, w którym są one zanurzone. Opadanie cząstek w cieczy należy do zjawisk złożonych, zależnych od wielu czynników, między innymi: od ich stężenia, wymiaru, kształtu, gęstości, temperatury oraz kierunku i prędkości przepływu wody [2].

W kanalizacji deszczowej osadniki są najczęściej adaptacją osadników stosowanych przy oczyszczaniu ścieków bytowo-gospodarczych. Ich głównym zadaniem jest zatrzymanie zawiesiny mineralnej. Najczęściej stosuje się klasyczne osadniki poziome podłużne. Tego rodzaju urządzenia przeznaczone do podczyszczania ścieków opadowych pozwalają zatrzymać zawiesinę łatwo opadającą o gęstości większej niż 1 kg/m^3 .

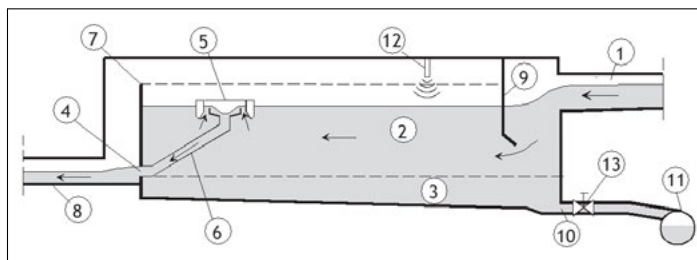
Najlepsze efekty oczyszczania uzyskuje się przy zastosowaniu osadników płytkich, o stosunkowo dużej powierzchni. W przypadku stosowania osadników tego typu w sieciach kanalizacyjnych, zaleca się łączenie funkcji osadnika z funkcją zbiornika retencyjnego. Wymaga to jednak opracowania urządzenia, którego konstrukcja spełni odpowiednie warunki projektowe. W takim przypadku musi być zapewniona odpowiednia redukcja strumienia odpływu (determinująca objętość zbiornika) oraz odpowiednio obciążenie hydrauliczne (determinujące powierzchnię zbiornika) [3, 14, 15].

Konstrukcja osadnika ścieków opadowych

W pracy zaproponowano urządzenie, przeznaczone do podczyszczania ścieków opadowych (deszczowych bądź roztopowych) przed ich zrzutem do odbiornika. Konstrukcja znajduje zastosowanie przede wszystkim w systemach kanalizacji deszczowej i wszędzie tam gdzie zachodzi potrzeba zagospodarowania wód opadowych. Urządzenie łączy w sobie funkcję osadnika i zbiornika retencyjnego – schemat przedstawiono na rysunku 1.

Ścieki dopływają do urządzenia poprzez kanał doprowadzający (1), który

Rys. 1. Schemat konstrukcji osadnika ścieków deszczowych [12]
Fig. 1. Construction diagram of a rainwater settling tank



umiejscowiony jest w górnej części głównej komory osadnika. W strefie wlotowej zlokalizowano ściankę (9), której zadaniem jest rozpraszanie energii strumienia ścieków dopływających do komory. Przegrada ta pełni funkcję deflektora dla strumienia napływających ścieków, a w celu poprawienia jej działania dolna część przegrody odchylna jest w kierunku kanału doprowadzającego ścieki.

Objętość komory retencyjnej rozdzielona jest na objętość retencyjną (2) oraz osadową (3). Położenie otworu spustowego (4) określa granicę rozdziału objętości w komorze retencyjnej osadnika. Ścieki są odprowadzane do odbiornika poprzez regulator przepływu. Jest nim przelew pływakowy połączony za pomocą przewodu przegubowego (6) z otworem spustowym (4) znajdującym się w przegrodzie przelewowej. Dzięki odpowiedniej konstrukcji przelewu możliwe jest utrzymanie stałej wartości natężenia odpływu niezależnie od chwilowego napełnienia osadnika. Dodatkowo w przelewie pływającym zastosowano przegrody uniemożliwiające odpływ zanieczyszczeń unoszących się na powierzchni ścieków w komorze, a także cieczy o gęstości mniejszej niż gęstość ścieków (substancje ropopochodne).

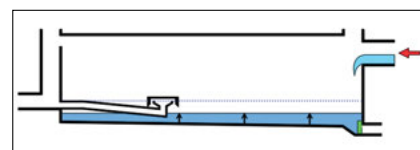
Aby zabezpieczyć zbiornik przed przepełnieniem zastosowano przegrodę przelewową (7), pełniącą funkcję przelewu awaryjnego. Wysokość maksymalnego, dopuszczalnego napełnienia zbiornika wyznacza górna krawędź przegrody przelewowej. Odprowadzenie ścieków następuje kanałem odpływowym (8). Aby zabezpieczyć kanał odpływowy przed przedostaniem się do niego zanieczyszczeń o dużych wymiarach, należy zamocować przegrodę perforowaną pomiędzy przegrodą przelewową, a górną ścianką komory retencyjnej. Spadek dna zbiornika zastosowano w kierunku przeciwnym do generalnego kierunku przepływu ścieków przez komorę. Otwór do spustu części osadowej zbiornika umiejscowiony jest w najniższym położonym punkcie (10) komory zbiornika. Otwór ten połączony jest hydraulicznie przewodem z siecią kanalizacji sanitarnej (11).

Do opróżniania części osadowej zastosowano układ sterujący, składający się

z czujnika napełnienia zbiornika (12) oraz elektrozasuw (13). Zastosowanie sterowania pozwala na odpływ objętości osadowej dopiero od momentu, całkowitego opróżnienia objętości retencyjnej (2). Istnieje możliwość zastąpienia automatycznego sterowania poprzez układ hydrauliczny tam, gdzie problemem jest doprowadzenie energii elektrycznej. W takim przypadku przewidziano zastosowanie zaworu pływakowego, otwierającego światło otworu spustowego przy obniżeniu się zwierciadła w komorze retencyjnej poniżej poziomu rozdziału objętości retencyjnej i osadowej. Wariant wykonania omawianego osadnika ścieków deszczowych zakłada brak automatycznego układu opróżniania części osadowej. W tym przypadku zgromadzona w komorze zawiesina usuwana jest okresowo przez pojazdy asenizacyjne. Jest to jednak mniej korzystne pod względem technicznym rozwiązanie. Charakterystyczne dla urządzenia fazy działania przedstawiono poniżej.

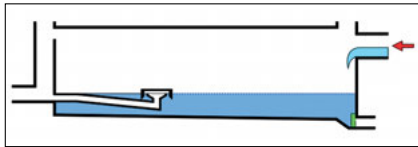
Hydrauliczne działanie osadnika ścieków opadowych

Faza akumulacji ścieków w części osadowej komory osadnika (rys. 2) rozpoczyna się od momentu, w którym ścieki zaczynają dopływać do urządzenia. Odpływ z osadnika jest zamknięty, co powoduje stosunkowo szybką akumulację i ciągły przyrost objętości ścieków w części osadowej komory retencyjnej.



Rys. 2. Faza akumulacji ścieków w części osadowej komory osadnika
Fig. 2. The phase of sewage accumulation in the sedimentation part of the sedimentation tank chamber

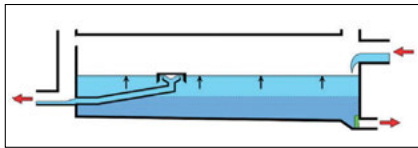
Stan chwilowy – całkowite wypełnienie części osadowej (rys. 3) obserwuje się w momencie, w którym ścieki osiągną założone napełnienie, będące poziomem rozdziału na część osadową



Rys. 3.
Stan chwilowy – całkowite wypełnienie osadnika
Fig. 3. Temporary state – complete filling of the sedimentation tank

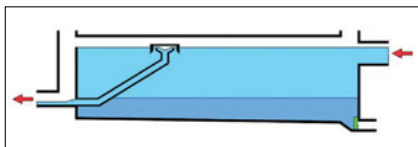
i retencyjną osadnika. Jest to charakterystyczny stan chwilowy działania urządzenia, kończący fazę wypełniania części osadowej. Do tego momentu ścieki nie przepływają przez pływakowy regulator przepływu, a część retencyjna osadnika pozostaje pusta.

Faza akumulacji ścieków w części retencyjnej komory osadnika (rys. 4) rozpoczyna się w momencie, w którym dopływ ścieków do urządzenia powoduje rozpoczęcie działania pływakowego regulatora przepływu, którego cechą charakterystyczną jest to, że pozwala utrzymać natężenie odpływu ścieków z osadnika na stałym, wcześniej założonym poziomie. Aby mogło dojść do akumulacji ścieków w części retencyjnej, natężenie dopływających ścieków musi być większe od natężenia ścieków odpływających z urządzenia. W takich warunkach następuje ciągły przyrost objętości ścieków wypełniających komorę retencyjną.



Rys. 4.
Faza akumulacji ścieków w części retencyjnej
Fig. 4. The phase of sewage accumulation in the retention part

Stan chwilowy – całkowite napełnienie osadnika (rys. 5.) występuje, gdy zmniejszająca się stopniowo wartość natężenia dopływu zrówna się z wartością natężenia odpływu z urządzenia. W tym

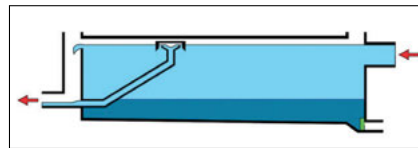


Rys. 5.
Stan chwilowy – całkowite napełnienie osadnika
Fig. 5. Temporary state – complete filling of the sedimentation tank

momencie komora osadnika wypełniona jest całkowicie do momentu, w którym natężenie dopływu zmniejszy się poniżej wartości natężenia odpływu poprzez regulator pływakowy. W przypadku gdy

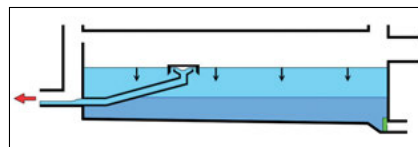
dopływ ścieków opadowych będzie nadal większy od natężenia odpływu to nastąpi odpływ przez przegrodę przelewową.

Faza przepływowa przy całkowitym napełnieniu osadnika (rys. 6) ma miejsce w momencie, gdy osadnik wypełniony jest do wysokości krawędzi przegrody przelewowej, a natężenie dopływu ścieków jest większe od chwilowego natężenia odpływu przez regulator pływakowy. Dochodzi wtedy do zadziałania przelewu. Faza ta trwa do chwili, w której wartość malejącego natężenia dopływu zostaje przewyższona przez natężenie odpływu z komory osadnika.



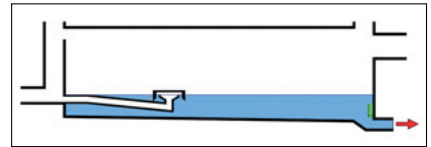
Rys. 6.
Faza przepływowa przy całkowitym napełnieniu osadnika
Fig. 6. Flow phase when the sedimentation tank is completely filled

Faza opróżniania części retencyjnej komory osadnika (rys. 7) zachodzi, gdy natężenie dopływu ścieków jest mniejsze od wartości natężenia odpływu ścieków z urządzenia. W fazie tej następuje ciągłe obniżanie poziomu zwierciadła ścieków w części retencyjnej osadnika. W tym przypadku natężenie odpływu ścieków z osadnika jest stałe i zależy od parametrów konstrukcyjnych pływakowego regulatora przepływu. W tej fazie można wyodrębnić etap opróżniania, w którym nie obserwuje się już dopływu ścieków do osadnika. Proces opróżniania części retencyjnej urządzenia można uznać za zakończony w chwili, gdy zwierciadło ścieków osiągnie poziom rozdzielu komory osadnika na część retencyjną i osadową. Jest to moment, w którym nie obserwuje się już odpływu ścieków poprzez pływakowy regulator przepływu.



Rys. 7.
Faza opróżniania części retencyjnej osadnika
Fig. 7. The phase of emptying the retention part of the sedimentation tank

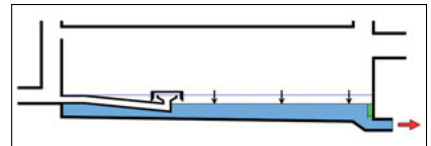
Stan chwilowy – otwarcie zasuw (rys. 8) ma miejsce przy obniżeniu zwierciadła ścieków do poziomu rozdzielu komory osadnika na część osadową i retencyjną. Jest to moment, w którym część retencyjna osadnika zostanie całkowicie



Rys. 8.
Stan chwilowy – otwarcie zasuw
Fig. 8. Momentary state – opening the valve

opróżniona. Następuje wtedy otwarcie zasuw umiejscowionej w kanale odpływowym, co umożliwi rozpoczęcie procesu opróżniania części osadowej urządzenia.

Faza opróżniania części osadowej komory osadnika (rys. 9) rozpoczyna się w momencie otwarcia zasuw znajdującej się w kanale odprowadzającym ścieki i osad z urządzenia. Wartość natężenia odpływu jest zmienna i zmniejsza się wraz z obniżaniem zwierciadła ścieków. Faza trwa do momentu, w którym osadnik zostanie całkowicie opróżniony. Całkowite opróżnienie komory retencyjnej zbiornika jest równoznaczne z zanikiem odpływu. W chwili, gdy w osadniku nie ma już ścieków następuje zamknięcie zasuw na odpływie.



Rys. 9.
Faza opróżniania części osadowej osadnika
Fig. 9. The phase of emptying the sediment part of the sedimentation tank

Badania hydraulicznego działania osadnika ścieków opadowych

Badania prowadzono w programie EPA SWMM na modelu rzeczywistej zlewni miejskiej, położonej w Częstochowie w dzielnicy Raków. W analizach wykorzystano modele jakościowe i ilościowe. Zlewnia zajmuje powierzchnię około 69 hektarów. Model analizowanej sieci składa się ze 138 odcinków (rys. 10a) o przekrojach kołowych i średnicach od 0,2 m do 0,9 m. Ścieki deszczowe są odprowadzane do wylotu kolektorem o średnicy 1 m. Przebieg granic zlewni cząstkowych został ustalony na podstawie ukształtowania terenu, tras kanałów oraz sposobu zagospodarowania terenu i rodzaju zabudowy. W modelu uwzględniono 197 zlewni cząstkowych (rys. 10b). Dokładniejszy opis zlewni, wraz z parametrami użytymi w procesie kalibracji modelu hydraulicznego przedstawiono w publikacjach [3, 5, 10, 11].

Modelowanym w badaniach wskaźnikiem zanieczyszczeń była zawiesina ogólna, która jest jednym z ważniejszych



Rys. 10. Schemat sieci: a) przebieg kanałów; b) podział na zlewnie cząstkowe
Fig. 10. Stormwater sewage system diagram: a) canal course; b) division into subcatchments

kryteriów normowanych w przepisach prawnych dotyczących ścieków opadowych. Każda ze zlewni cząstkowych została podzielona, ze względu na zagospodarowanie, na dwa obszary (ang. Land uses):

- główne ciągi komunikacyjne, ulice i parkingi – jako tereny silniej zanieczyszczone,
- pozostałe tereny osiedlowe, przede wszystkim dachy budynków – na których nagromadzenie zanieczyszczeń jest mniejsze.

Do opisu gromadzenia zanieczyszczeń wybrano funkcję wykładniczą:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2 t})$$

gdzie:

- B – aktualna akumulacja zanieczyszczeń [kg/ha],
- C_1 – graniczna masa gromadzonych zanieczyszczeń [kg/ha],
- C_2 – szybkość ubywania zanieczyszczeń (w wyniku wiatru i wynoszenia przez pojazdy [d_{-1}]).

Natomiast do opisu procesu sfluwowania zanieczyszczeń w wykonanym modelu zastosowano funkcję:

$$W = K_1 q^{K_2} B$$

gdzie:

- W – sfluwany ładunek zanieczyszczeń [kg/ha],

- K_1 – współczynnik szybkości sfluwowania zanieczyszczeń [-],
- K_2 – współczynnik potęgowy [-],
- q – intensywność spływu powierzchniowego [mm/h],
- B – aktualna akumulacja zanieczyszczeń [kg/ha].

Parametry jakościowe nie były kalibrowane, a wartości parametrów charakteryzujących nagromadzenie i wypłukiwanie zanieczyszczeń zostały dobrane na podstawie zalecanych w literaturze, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu nagromadzenia i sfluwowania zanieczyszczeń w EPA SWMM

Tab. 1. EPA SWMM Pollutant Accumulation and Flushing Model Parameter Values

Rodzaj uszczelnionej powierzchni	Parametr			
	C_1	C_2	K_1	K_2
Ulice (tereny silniej zanieczyszczone)	70	0,1	0,2	2
Dachy (tereny mniej zanieczyszczone)	20	0,1	0,2	2

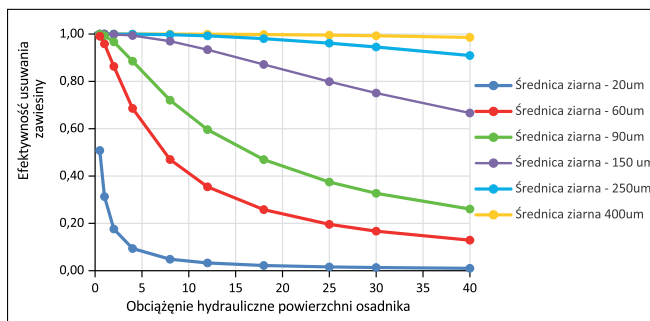
Szerszy opis dotyczący modelowania jakościowego na omawianej zlewni przedstawiono w publikacjach [11, 12].

Efektywność usuwania zawiesiny w osadniku ścieków opadowych

Na podstawie wykonanego modelu jakościowego, przeprowadzono badania mające na celu ocenę efektywności usuwania zawiesiny przez proponowany osadnik ścieków deszczowych.

Program SWMM daje możliwość zastosowania funkcji oczyszczania ścieków w obiektach, w których występują procesy

Rys. 11. Efektywność usuwania poszczególnych frakcji zawiesiny w zależności od obciążenia hydraulicznego osadnika
Fig. 11. Efficiency of removing individual suspension fractions depending on the hydraulic load of the sedimentation tank



oczyszczania. Przyjęcie parametrów do funkcji usuwania zawiesiny w osadniku wymagało jednak określenia szeregu założeń wstępnych związanych z charakterystyką sedimentacyjną jako, że program SWMM nie umożliwia symulowania transportu i usuwania zawiesiny z rozdziałem na poszczególne frakcje.

Skład granulometryczny zawiesiny przyjęto na podstawie danych literaturowych (tabela 2). W obliczeniach teoretycznej prędkości opadania poszczegól-

nych frakcji uwzględniono zmianę gęstości. Dla mniejszych frakcji gęstość jest mniejsza, ponieważ zwiększa się udział zawiesiny o charakterze organicznym.

Tabela 2. Skład granulometryczny zawiesiny
Tab. 2. Granulometric composition of the suspension

Średnica ziarna d, µm	Gęstość ziarna kg/m³	Udział wagowy frakcji (%)	Prędkość opadania m/h
20	1500	30	0,40
60	1800	15	5,65
90	1800	15	12,71
150	2200	15	52,97
250	2200	15	147,15
400	2600	10	376,70

Dla zdefiniowanej charakterystyki sedymentacyjnej, obliczono efektywność usuwania zawiesiny przy zastosowaniu wzoru:

$$R = 1,0 - \left[1,0 + \frac{1}{n} \cdot \frac{v_s}{Q} \cdot A \right]^{-n}$$

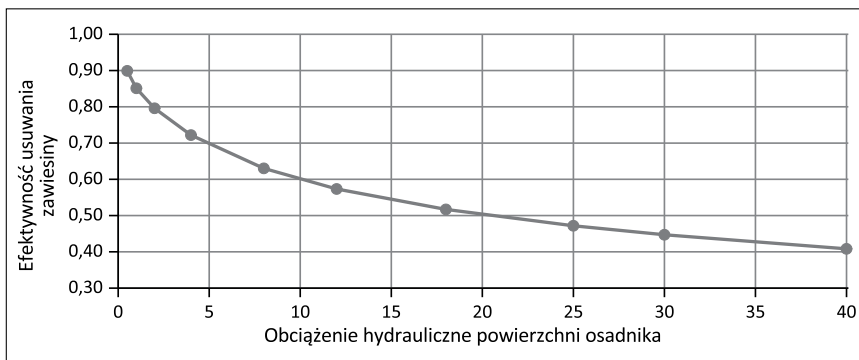
gdzie:

- R – część początkowego stężenia zawiesiny o prędkości opadania v_s usunięta w osadniku,
- v_s – prędkość opadania cząstki (m/s),
- Q – natężenie przepływu (m³/s),
- A – powierzchnia osadnika (zbiornika),
- n – współczynnik turbulencji opisujący działanie osadnika (zwykle przyjmowany jako $n=3$).

Efektywność obliczono osobno dla każdej frakcji dla zmiennej wartości obciążenia hydraulicznego osadnika, a następnie wykonano wykres (rys. 11).

Uwzględniając zależności otrzymane na rysunku (rys. 11) oraz udział poszczególnych frakcji w masie zawiesiny możliwe było obliczenie średniego stopnia usuwania zawiesiny w zależności od obciążenia hydraulicznego osadnika. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono wykres zależności pomiędzy efektywnością usuwania zawiesiny a obciążeniem hydraulicznym (rys. 12).

Końcowym etapem było opracowanie funkcji, która aproksymowałaby zależność



Rys. 12. Średnia efektywność usuwania modelowanego składu frakcyjnego zawiesiny w zależności od hydraulicznego obciążenia osadnika
Fig. 12. Average removal efficiency of the modeled fractional composition of the suspension depending on the hydraulic load of the sedimentation tank

przedstawioną na rysunku do obliczeń symulacyjnych w programie SWMM. Z dostępnych w programie kilku możliwych wariantów równania opisującego funkcje usuwania zanieczyszczeń wybrano równanie uwzględniające natężenie dopływu ścieków do osadnika (Q_{OS}) i powierzchnię czynną urządzenia (F_{OS}).

Wykorzystane w symulacjach równanie ma postać:

$$R = 0,45 + 0,5 \cdot \exp\left(-0,3 \cdot \left(\frac{Q_{OS}}{F_{OS}}\right)\right)$$

gdzie:

Q_{OS} – przepływ przez osadnik (m^3/s),
 F_{OS} – powierzchnia czynna osadnika (m^2).

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano rzeczywiste dane opadowe z lat 2011 oraz 2012. Opady te zostały zarejestrowane w Częstochowie na deszczomierzu SEBA RG50 znajdującym się przy ulicy Brzeźnickiej. Na potrzeby prowadzonych badań wybrano zdarzenia z okresu od początku marca do końca października. Suma opadów w tym czasie wyniosła łącznie 750,5 mm (w roku 2011 – 361,8 mm, a w roku 2012 – 388,7 mm). Badania prowadzono dla osadników, których podstawowe parametry zebrano w tabeli 3. Symulacje prowadzone były jako ciągle z dwóch lat (2011 i 2012).

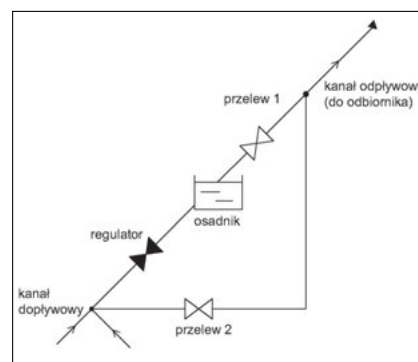
W celu dokonania prawidłowej oceny efektywności usuwania zawiesiny przez badany osadnik, należało dokonać porównania proponowanego rozwiązania z osadnikami klasycznymi, powszechnie stosowanymi do podczyszczania ścieków opadowych. W tym celu wykonano serię symulacji dla tych samych danych opadowych i podstawowych parametrów osadnika (objętość, powierzchnia).

Miejsce na zlewni, w którym zlokalizowano osadnik zaznaczono czerwonym okręgiem na rysunku 13. Do hydraulicznego odwzorowania działania osadnika użyto różnych obiektów dostępnych w programie, których rozmieszczenie przedstawiono na schemacie (rys. 13).

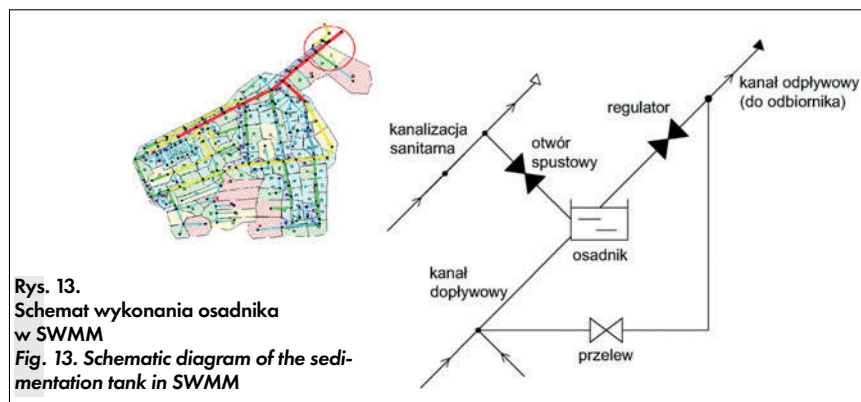
Ścieki opadowe w początkowej fazie dopływają do osadnika kanałem deszczowym. Gdy ich poziom w komorze urz-

czenia osiągnie założone napełnienie (0,5 m) zaczyna działać regulator (orifice) odprowadzający ścieki do odbiornika. Zastosowano tu reguły sterujące oraz kontroler PID regulujący stopień otwarcia otworu spustowego w ten sposób, aby utrzymać stałą wartość natężenia. W tym przypadku wartość tą przyjęto równą $15 \text{ dm}^3/s \cdot \text{ha}$. Osadnik zabezpieczono przed przepełnieniem za pomocą przelewu (weir). Wysokość krawędzi przelewowej ustalono tak, aby maksymalne napełnienie komory osadnika nie mogło przekroczyć wartości założonej to jest 1,5 m. W najniższym punkcie komory osadowej zlokalizowano otwór spustowy (orifice 2), połączony z kanałem ściekowym.

W przypadku osadnika klasycznego (rys. 14) dopływ do urządzenia odbywa się przez kanał, na którym zlokalizowany jest regulator utrzymujący stałą wartość



Rys. 14. Schemat osadnika klasycznego w SWMM
Fig. 14. Schematic diagram of a classic settler in SWMM



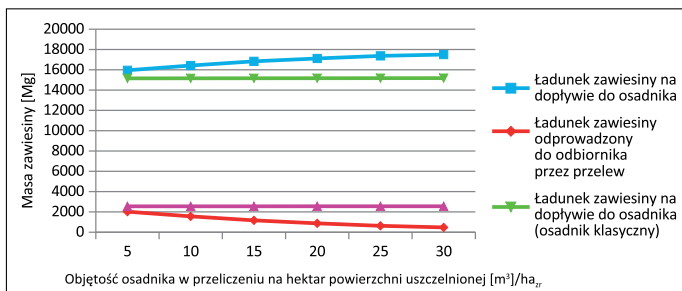
Rys. 13. Schemat wykonania osadnika w SWMM
Fig. 13. Schematic diagram of the sedimentation tank in SWMM

Tabela. 3. Podstawowe parametry badanych osadników
Tab. 3. Basic parameters of the tested the sedimentation tanks

Objętość osadnika w przeliczeniu na 1 ha powierzchni uszczelnionej [m^3/ha_{zr}]	Rzeczywista objętość części osadowej osadnika [m^3]	Rzeczywista objętość części retencyjnej osadnika [m^3]	Całkowita rzeczywista objętość osadnika [m^3]	Rzeczywista powierzchnia osadnika przy napełnieniu $h=1,5m$ [m^2]
5	37,5	75	112,5	75
10	75	150	225	150
15	112,5	225	337,5	225
20	150	300	450	300
25	187,5	375	562,5	375
30	225	450	675	450

natężenia przepływu równą $15 \text{ dm}^3/s \cdot \text{ha}_{zr}$. Cała objętość ścieków, dla której natężenie ma wartość większą jest odprowadzana poprzez przelew bezpośrednio do odbiornika. Na końcu osadnika znajduje się przelew, przez który ścieki z urządzenia kierowane są do kolektora deszczowego i dalej do odbiornika.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono sumaryczne ładunki zawiesiny na dopływie do urządzeń oraz



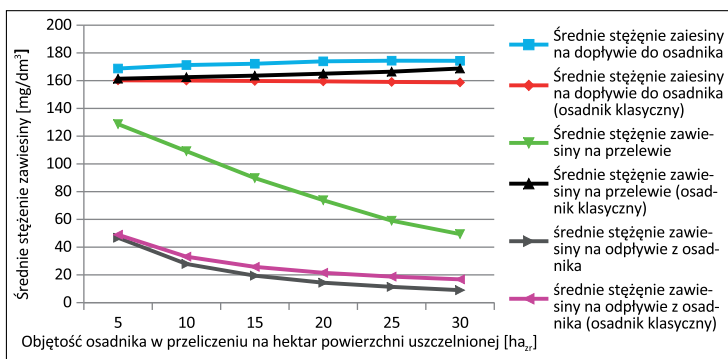
Rys. 15
Ładunki zawiesiny w poszczególnych kanałach osadników [Mg]
Fig. 15. TSS loads in individual settling tank channels [Mg]

masę zawiesiny odprowadzaną bez oczyszczenia do odbiornika poprzez przelew. Uzyskane wyniki zebrano i przedstawiono na wykresie (rys. 15).

W przypadku osadników klasycznych wielkość urządzenia nie ma wpływu na sumaryczny ładunek zawiesiny dopływający do urządzenia jak i odprowadzany poprzez przelew do odbiornika. W ściekach dopływających do osadnika wynosi około 15310 kg, a w ściekach odprowadzanych przez przelew 2590 kg.

Natomiast w przypadku proponowanej konstrukcji osadnika wraz ze wzrostem objętości komory retencyjnej osadnika wzrasta masa zawiesiny, która razem ze ściekami trafia do urządzenia. Dla najmniejszej z analizowanych pojemności (5 m³/ha_{zr}) ładunek trafiający do osadnika wynosił około 15950 kg, natomiast dla największej (30 m³/ha_{zr}) było to już prawie 17700 kg (wzrost o około 9%). W przypadku ładunku odprowadzanego przez przelew zwiększenie objętości osadnika powoduje zmniejszenie całkowitej masy zawiesiny odprowadzanej do odbiornika. Zdolność retencyjna osadnika, daje możliwość przejścia i oczyszczenia większej masy zawiesiny zawartej w ściekach opadowych.

Na rysunku 16 przedstawiono wyniki dotyczące wartości średnich stężeń dla osadnika klasycznego i proponowanego osadnika z objętością retencyjną.



Rys. 16. Średnie stężenia zawiesiny w zależności od wybranego rodzaju osadnika
Fig. 16. Average TSS concentrations depending on the selected sedimentation tank type

Jak widać, średnie stężenie zawiesiny na dopływie do osadnika klasycznego jest takie samo, bez względu na wielkość urządzenia i wynosi około 160 mg/dm³. Nieznacznie wyższe wartości obserwo-

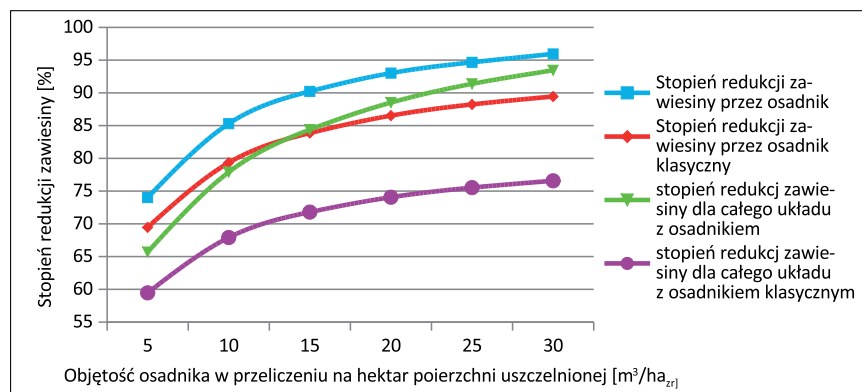
wano dla proponowanej konstrukcji osadnika – średnio około 170 mg/dm³. Zmiana wielkości osadnika nie ma tu również istotnego wpływu na wartości stężeń.

W przypadku średnich stężeń zawiesiny notowanych na przelewie można zauważyć znaczne różnice w wartościach w zależności od wybranego rodzaju osadnika. W przypadku osadników klasycznych zmiana ich wielkości nie wpływa w znaczący sposób na średni poziom stężeń. Natomiast dla osadników, które posiadają objętość retencyjną obserwowano znaczny spadek średnich wartości stężeń wraz ze wzrostem pojemności osadnika. Zmiana objętości z 5 m³/ha_{zr}

szczych niż 15 m³/ha_{zr}, średnie stężenie wynosiło poniżej 100 mg/dm³.

Porównując średnie stężenia zawiesiny w ściekach odpływających z urządzeń po oczyszczeniu można zauważyć nieznaczny przewagę proponowanego rozwiązania nad klasycznymi osadnikami. Wraz z powiększaniem osadników obserwowano spadek wartości stężenia zawiesiny z poziomu około 47 mg/dm³ do 9 mg/dm³ dla proponowanego rozwiązania oraz z 49 mg/dm³ do 17 mg/dm³ w przypadku osadnika klasycznego.

Na podstawie otrzymanych wyników z symulacji wyznaczono stopień usunięcia ładunku zawiesiny. Jest to jeden z najważniejszych parametrów opisujących efektywność działania osadników. Wartość wliczono dla poszczególnych urządzeń, a także dla całego współdziałającego z osadnikiem zespołu elementów: przelewu, zlokalizowanego przed kanałem dopływowym, regulatorów przepływu oraz, w przypadku osadnika z retencją, regulatora i kanału odprowadzającego zgromadzony w części osadowej komory osad



Rys. 17. Stopień redukcji zawiesiny w zależności od wariantu osadnika i jego objętości w przeliczeniu na hektar powierzchni uszczelnionej [m³/ha_{zr}]
Fig. 17. The degree of TSS reduction depending on the sedimentation tank variant and its volume per hectare of sealed surface [m³/ha_{zr}]

do kanalizacji ściekowej. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 17).

Jak widać na powyższym wykresie, najlepszą efektywność usuwania zawiesiny uzyskano przy zastosowaniu proponowanego rozwiązania. Wyższy stopień redukcji zawiesiny osiągnięto tu zarówno dla samego urządzenia jak i dla całego układu elementów współdziałających z osadnikiem. Analizując powyższe dane można zauważyć, że efektywność usuwania zawiesiny wzrasta wraz z wielkością osadników. Uzyskany w osadnikach stopień redukcji można uznać za zadowalający nawet w przypadku najmniejszych z zastosowanych urządzeń. Natomiast wykorzystanie osadników o objętości równej 30 m³/ha_{zr} pozwoliło usunąć ponad

90% masy zawiesiny, która wraz ze ściekami trafia do urządzeń, co stanowi bardzo dobry wynik. Zauważyć można tutaj także, że różnice w uzyskanym stopniu redukcji zawiesiny w przypadku samych osadników są stosunkowo niewielkie i wahają się od około 5-7%, w zależności od wielkości urządzenia.

Większa dysproporcja w stopniu usunięcia zawiesiny pojawia się w przypadku osadników z układami współdziałających z nimi elementów (przelewy, regulatory). Należy podkreślić, że wyniki uzyskane dla całego układu są ważniejsze do prawidłowej oceny efektywności ochrony odbiornika przed zanieczyszczeniami. Duża ilość nieoczyszczonych ścieków zostaje zrzucona bezpośrednio do odbiornika poprzez przelew, co znacznie obniża skuteczność usuwania zawiesiny odprowadzanej ze zlewni systemem kanalizacyjnym. Dzięki zastosowaniu osadników z dostępną pojemnością retencyjną uzyskiwano wyniki o około 10-13 % lepsze niż w przypadku osadników klasycznych, w zależności od wybranej wielkości urządzenia.

W celu wyjaśnienia przyczyny zauważonej różnicy w efektywności usuwania zanieczyszczeń przez porównywane urządzenia wykonano symulacje działania osadników w programie SWMM dla pojedynczego zjawiska opadowego. W analizach rozpatrywano urządzenia o objętościach równych: 5, 10 i 15 [m³/ha_{zr}]. Uzyskane wyniki zebrano dla osadników działających w układach z przelewami i regulatorami i przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki symulacji działania osadników dla opadu z dnia 10.06.2012
Tab. 4. Simulation results of a sedimentation tank operation for rainfall from 10/06/2012

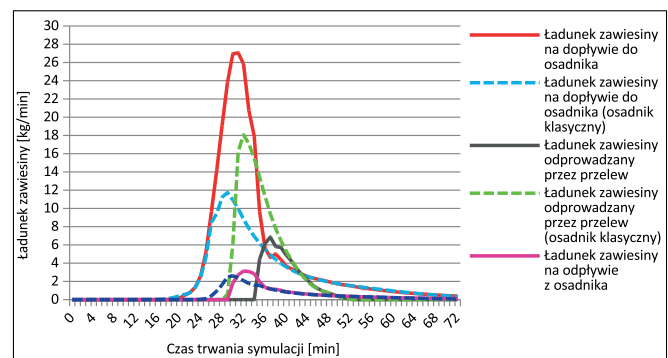
Objętość osadnika [m ³ /ha _{zr}]	Osadnik – cały układ			Osadnik klasyczny – cały układ		
	5	15	25	5	15	25
Masa zawiesiny usunięta przez osadnik [kg]	148	243	292	113	145	155
Masa zawiesiny odprowadzona do odbiornika przez przelew [kg]	114	51	13	149	148	148
Masa zawiesiny odprowadzona do odbiornika bezpośrednio z osadnika [kg]	64	32	21	64	33	23
Stopień redukcji zawiesiny dla samego osadnika [%]	70	88	93	63	81	87
Stopień redukcji zawiesiny dla całego układu [%]	45	75	90	35	44	48

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można stwierdzić, że przy wykorzystaniu w sieci osadników ze zdolnością retencyjną uzyskuje się znacznie lepsze efekty oczyszczania ścieków opadowych. Pozwalają one usunąć o wiele większą masę zawiesiny dla wszystkich z rozpatrywanych wielkości urządzeń. Dla osadnika o objętości 5 m³/ha_{zr} różnica ta wyniosła 35 kg (10,5 % całkowitej masy zawiesiny odprowadzanej ze zlewni), a dla największego z rozpatrywanych było to już 137 kg (42 % całkowitej masy zawiesiny odprowadzanej ze zlewni).

Jeszcze większe różnice występują w przypadku ładunku zawiesiny w ściekach odprowadzanych do odbiornika przez przelew. Stosując osadnik z pojemnością retencyjną ograniczono zrzut ładunku bez oczyszczenia o odpowiednio 23 %, 66 % i 91 % dla analizowanych wariantów wielkości osadników. Natomiast ładunek, jaki po oczyszczeniu trafia do odbiornika jest prawie taki sam, niezależnie od przyjętej konstrukcji osadnika. Zwiększenie objętości osadnika w rozpatrywanym zakresie pozwoliło na zmniejszenie masy zawiesiny odprowadzanej do odbiornika przez osadnik o 2/3.

Różnice uzyskanego stopnia redukcji zawiesiny przez sam osadnik nie są natomiast duże i wynoszą 6-7%, przy czym lepsze efekty osiągnięto stosując osadnik z pojemnością retencyjną. Większe dysproporcje można zaobserwować, gdy rozpatruje się cały układ (osadnik wraz z przelewem i innymi urządzeniami z nim współdziałającymi). W takim przypadku

Rys. 18. Ładunek zawiesiny w poszczególnych kanałach dla osadnika o objętości równej 15m³/ha_{zr}. Fig. 18. TSS load in individual channels for a sedimentation tank with a volume of 15m³/ha_{zr}



mi, a także na przelewach zabezpieczających urządzenia przed przepełnieniem. Na podstawie uzyskanych wyników wykonano, dla osadników o powierzchni 225 m² i objętości równej 337,5 m³ (15m³/ha_{zr}) wykresy, obrazujące zmianę ładunku w czasie na wyżej wymienionych odcinkach (rys. 18). Zebrane na wykresie dane pozwalają na wyjaśnienie różnic w efektywności usuwania zawiesin przez osadniki. Porównując wykres przebiegu ładunku w czasie w kanale dopływowym do osadnika można zauważyć stosunkowo duże różnice w maksymalnych wartościach dla poszczególnych urządzeń.

W osadniku klasycznym wartość maksymalnego chwilowego ładunku trafiającego do komory osadnika wynosi około 12 kg/min i jest ponad dwukrotnie mniejsza niż ma to miejsce w przypadku zaproponowanej konstrukcji osadnika. Podstawowa różnica w funkcjonowaniu omawianych urządzeń wynika z możliwości wykorzystania retencji. W proponowa-

nym osadniku, gdzie taka możliwość istnieje, dodatkowa objętość ścieków, wypełniająca w początkowej fazie komorę retencyjną osadnika, niesie ze sobą znacznie większy ładunek zawiesiny niż ma to miejsce w przypadku osadników klasycznych.

W osadniku klasycznym dopływ do urządzenia ograniczony był do wartości 15 dm³/s·ha_{zr}. Wynika to z ogólnie przyjętych zasad projektowania osadników, a także z wymogów dotyczących minimalnej wartości odpływu ścieków ze zlewni jaki musi zostać oczyszczony. Brak ograniczenia natężenia dopływu w kanale doprowadzającym ścieki w standardowym osadniku mogłyby powodować, przy dużych wartościach natężenia dopływu ścieków do urządzenia, znaczne zwiększenie obciążenia hydraulicznego i tym samym zmniejszenie w znacznym stopniu jego zdolność do redukcji masy zawiesiny. W skrajnych przypadkach mogłoby dochodzić do wypłukiwania i wynoszenie poza urządzenie znajdujących się na dnie

układ z osadnikiem klasycznym pozwala zredukować całkowitą masę zawiesiny o 35-58 % w zależności od wielkości urządzenia, podczas gdy stosując osadnik ze zdolnością retencyjną osiągnięto stopień redukcji na poziomie 45-90 %. Na tej podstawie można uznać, że wpływ na efektywność usuwania zanieczyszczeń ma możliwość wykorzystania dodatkowej objętości retencyjnej w osadniku.

Dzięki przeprowadzonym dla pojedynczego opadu symulacjom można było ustalić rozkład ładunku zawiesiny w kanałach znajdujących się przed i za osadnika-

osadów. Dzięki wykorzystaniu retencji można było zwiększyć wartość maksymalnego chwilowego natężenia dopływu ścieków do osadnika. W przypadku wystąpienia analizowanego opadu wynosiło ono blisko $50 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}_{\text{zr}}$. Po napełnieniu osadnika natężenie dopływu zrównuje się z natężeniem odpływu wynoszącym $15 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}_{\text{zr}}$, a osadnik działa w taki sam sposób jak osadnik klasyczny.

W omawianym przypadku istotne jest też to, że opad, który został wybrany do symulacji, generował zjawisko odpływu pierwszej fali zanieczyszczeń. Początkowa, silnie zanieczyszczona objętość ścieków została przejęta dzięki wykorzystaniu objętości retencyjnej osadnika. Pozwoliło to uzyskać znacznie lepszy efekt usuwania ogólnej masy zawiesiny odprowadzanej wraz ze ściekami opadowymi z powierzchni zlewni.

Jak wcześniej wykazano duży wpływ na stopień redukcji zawiesiny w całym układzie ma masa zawiesiny zrzucana do odbiornika przez przelew. Ścieki takie nie są w żaden sposób oczyszczone przed ich zrzutem do odbiornika. Wykorzystanie objętości retencyjnej pozwala znacznie zmniejszyć objętość odprowadzanych ścieków, a tym samym ładunek zawiesiny jaki ze sobą noszą. Potwierdzają to zebrane na powyższym wykresie dane. Jak widać na rysunku dodatkowa objętość ścieków przejęta przez osadnik pozwoliła opóźnić rozpoczęcie działania przelewu i znacznie zmniejszyć ładunek zawiesiny zrzucany bezpośrednio do odbiornika.

Analizując zawarte na wykresie dane dotyczące ładunku zawiesiny na odpływie z osadnika, można stwierdzić, że maksymalne wartości dla poszczególnych wariantów osadników nie różnią się znacznie od siebie. Różnica widoczna jest w czasie, w którym oczyszczone ścieki zaczynają odpływać do odbiornika. W przypadku osadnika z retencją jest to kilka minut później, co spowodowane jest początkowym wypełnianiem ściekami części osadowej urządzenia.

Podsumowanie

Zaostrzenie standardów dotyczących ochrony wód powierzchniowych przed zrzutami z kanalizacji deszczowej może w przyszłości spowodować konieczność rozbudowy istniejących sieci kanalizacji deszczowych o urządzenia do podczyszczania ścieków opadowych. Aby zapewnić odpowiednią ochronę wód powierzchniowych należy ograniczyć zrzut ścieków opadowych bez odpowiedniego oczyszczenia do odbiorników. Główne zanie-

czyszczenie ścieków opadowych stanowią zawiesina, która jednocześnie jest jednym z najważniejszych parametrów przy ocenie stopnia zanieczyszczenia wód opadowych, a także nośnikiem innych zanieczyszczeń znajdujących się w spływach opadowych. Urządzeniami, których głównym zadaniem jest zatrzymanie jak największej ilości zanieczyszczeń – zawiesiny są osadniki. Przedstawiony w opracowaniu wariant wykonania osadnika przeznaczonego dla podczyszczania ścieków opadowych stanowi rozwiązanie, pozwalające w znacznym stopniu ograniczyć ilość zanieczyszczeń trafiających do odbiornika. Konstrukcja znajduje zastosowanie przede wszystkim w systemach kanalizacji deszczowej lub, gdy istnieje potrzeba zagospodarowania wód opadowych.

Aby prawidłowo dokonać oceny otrzymanych wyników dotyczących efektywności działania osadnika należy pamiętać, że w prowadzonych badaniach zawiesinę przygotowano wyłącznie z materiału mineralnego w postaci piasku kwarcowego o gęstości 2650 kg/m^3 , który stosunkowo łatwo sedymentuje, w szczególności frakcje o największych średnicach.

W rzeczywistości gęstość poszczególnych cząstek jest zmienna i mniejsza się wraz ze zmniejszaniem średnicy. Zmniejszenie gęstości z 2650 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 powoduje obniżenie wartości prędkości sedymentacji nawet o połowę [5]. W związku z tym nie należy przenosić otrzymanych wyników wprost na warunki rzeczywiste. Dodatkowo w badaniach posługiwano się stałymi wartościami stężenia zawiesiny oraz obciążenia hydraulicznego powierzchni osadnika podczas trwania poszczególnych eksperymentów. W rzeczywistości parametry te są zmienne w czasie, a dokładne odwzorowanie i przeniesienie do modelu fizycznego polutogramów i hydrogramów dopływu byłoby dość trudne. Poza tym badania laboratoryjne nie dają możliwości wykonania analiz ciągłych, obejmujących na przykład cały rok i uwzględniających wszystkie przepływy i niesiony przez nie ładunek zawiesiny. Jak wcześniej wspomniano, badania laboratoryjne nie miały na celu dokładnego odwzorowania procesu sedymentacji zachodzącego w osadniku, dlatego wykonano je w sposób uproszczony stosując do przygotowania zawiesiny piasek kwarcowy, zamiast na przykład zmiotków ulicznych. Uzyskiwany wówczas stopień redukcji zawiesiny miałby zapewne niższą wartość, co wcale nie wyklucza stosowania tego typu urządzeń do oczyszczania ścieków opadowych.

Praca naukowa finansowana w ramach projektu badawczego BS-PB-400/301/24

LITERATURA

- [1] Bergue J.M. Ruperd Y., Stormwater Retention Basin, Balkema Publishers, Rotterdam, 2000,
- [2] Fidala-Szope M., Ochrona wód powierzchniowych przed zrzutami ścieków opadowych z kanalizacji deszczowej i półrozdzielczej, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 1997,
- [3] Heldrich A., Witkowski A., Urządzenia do oczyszczania ścieków. Projektowanie, przykłady obliczeń, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Warszawa, 2005,
- [4] Królikowska J., Ocena przydatności hydroseparatorów do podczyszczania ścieków opadowych, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010,
- [5] Królikowska J., Ograniczenie ładunku zanieczyszczeń ścieków opadowych zrzucanych do odbiornika przez przelewy burzowe przy zastosowaniu hydroseparatora, Instal nr 2 /2011 s. 44-48,
- [6] typ B., Infrastruktura wodno-ściekowa w planowaniu miast, Wydawnictwo Komunikacji i łączności, Warszawa, 2008,
- [7] Malmur R., Pluta K., Świetochowski K., Kalenik M.: „Possibility of Using Retention Reservoirs as Flow Controllers”, Instal nr 12/2023 (458), str. 84-90, DOI: 10.36119/15.2023.12.13
- [8] Malmur R.: “Przypadki procesów wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiorczych energooszczędnego zbiornika retencyjno-przerzutowego”, Instal nr 12/2022(446) str. 62-70, DOI: 10.36119/15.2022.12.11
- [9] Mrowiec M., Możliwości realizacji układów kanalizacji półrozdzielczej przy zastosowaniu separatorów przepływu typu Septurn, Postęp w Inżynierii Środowiska. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Rzeszów – Bystrze s. 219-228, 2006
- [10] Mrowiec M., Pluta K., Analiza działania kanalizacji półrozdzielczej z zastosowaniem różnego typu separatorów przepływu, Inżynieria i Ochrona Środowiska 2014, t. 17, nr 1, s. 75-88,
- [11] Mrowiec M., Pluta K., Efektywne sterowanie w systemach kanalizacji półrozdzielczej, Instal, nr 9, s. 81-84, 2015,
- [12] Mrowiec M., Pluta K., Innowacyjna konstrukcja osadnika ścieków opadowych, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, Tom 6 Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2015,
- [13] Mrowiec M., Pluta K., Sterowanie przepływem w kanalizacji półrozdzielczej, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, Tom 4 Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2014
- [14] Mrowiec M., Pluta K., Zbiornik retencyjny cieczy, patent nr 226 619, Wiadomości Urzędu Patentowego 8/2017
- [15] Obarska – Pępkowiak. H., Gajewska M., Arendacz M., Oczyszczanie wód opadowych w obiektach hydrofitowych, GWS 2008 nr 9,
- [16] Skotnicki M., Komputerowe modele sieci kanalizacyjnych, program SWMM 5.0, Przegląd Komunalny, nr. 3 (164), 2005, str. 76-78,
- [17] Zawilski M., Sakson G., Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część II. Weryfikacja modelu., Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 9, s. 321–323, 2011,