

Możliwość usuwania zawiesin ze ścieków opadowych przy zastosowaniu zbiornika retencyjnego

Possibility of removing suspended solids from rainwater using a retention tank

ROBERT MALMUR, KAMIL PLUTA

DOI 10.36119/15.2025.10.8

Systemy kanalizacji deszczowej często są wykorzystywane do regulacji odpływu wód opadowych z obszarów miejskich. Systemy te powinny zapewnić efektywne odprowadzenie wód opadowych z obszarów zurbanizowanych zarówno w ujęciu ilościowym (zapobieganie zjawiskom podtopień) i jakościowym (redukcja ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych do odbiorników naturalnych). W najbliższej przyszłości wymagania i standardy ochrony wód powierzchniowych przed odpływem wód opadowych ulegną zaostrzeniu. Spowoduje to konieczność rozbudowy istniejących sieci kanalizacji deszczowych o urządzenia do podczyszczania ścieków opadowych. Głównym zanieczyszczeniem ścieków opadowych jest zawiesina, która jednocześnie jest nośnikiem innych zanieczyszczeń znajdujących się w spływach opadowych. Aby zapewnić odpowiednią ochronę wód powierzchniowych należy ograniczyć zrzut ścieków opadowych bez odpowiedniego oczyszczenia do odbiorników. Urządzeniami, których głównym zadaniem jest zatrzymanie jak największej ilości zanieczyszczeń – zawiesiny są osadniki.

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 przedstawione jest urządzenie służące do podczyszczania ścieków opadowych (deszczowych bądź roztopowych) przed ich zrzutem do odbiornika. Urządzenie łączy w sobie funkcję osadnika i zbiornika retencyjnego. Zaproponowana konstrukcja ma zastosowanie przede wszystkim w systemach kanalizacji deszczowej oraz wszędzie tam gdzie zachodzi potrzeba zagospodarowania wód opadowych.

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

Stormwater drainage systems are often used to regulate stormwater runoff from urban areas. These systems should ensure effective stormwater drainage from urban areas, both quantitatively (preventing flooding) and qualitatively (reducing pollutant loads discharged into natural receiving bodies). In the near future, requirements and standards for protecting surface waters from stormwater runoff will become more stringent. This will necessitate the expansion of existing stormwater drainage networks with stormwater pretreatment facilities. The main pollutant in stormwater is suspended solids, which also carry other pollutants found in stormwater runoff. To ensure adequate surface water protection, the discharge of untreated stormwater into receiving bodies should be limited. Settling tanks are the devices whose primary function is to retain as much suspended solids as possible.

Stormwater drainage systems should be designed sustainably. However, they cannot be implemented everywhere, primarily due to dense urban development or unfavorable soil and water conditions. Therefore, the development and modernization of underground systems, primarily by increasing their retention capacity, remains a significant engineering challenge.

This article presents a device for pretreating stormwater (rain or meltwater) before its discharge into the receiving body. The device combines the functions of a settling tank and a retention reservoir. The proposed design is primarily used in stormwater drainage systems and wherever stormwater management is needed.

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

Wstęp

Regulacja odpływu wód opadowych z obszarów miejskich jest realizowana głównie przez wykorzystanie systemów

kanalizacyjnych. Systemy te powinny zapewnić efektywne odprowadzenie wód opadowych z obszarów zurbanizowanych zarówno w ujęciu ilościowym (zapobieganie zjawiskom podtopień) i jakościowym

(redukcja ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych do odbiorników naturalnych) [13, 20].

Spływ powierzchniowy wód opadowych pochodzących z obszarów zlewni

Dr inż. Robert Malmur <https://orcid.org/ORCID:0000-0003-1916-8666> – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Częstochowa

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

Adres do korespondencji/Corresponding author: robert.malmur@pcz.pl

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 [4, 5].

Zagadnienie dotyczące składu jakościowego wód opadowych stanowi istotny element przy próbach oceny wpływu ich zrzutu na odbiornik wodny. Przez wiele lat ścieki deszczowe odprowadzane do wód powierzchniowych przez systemy kanalizacyjne uważane były za względnie czyste, nie mające znacznego wpływu na środowisko wodne. Prowadzone w ostatnich latach badania zaprzeczają tej tezie. Aktualne obserwacje potwierdzają znaczny wzrost ilości zanieczyszczeń występujących w spływie powierzchniowym, a także większą objętość samych ścieków deszczowych odprowadzanych do sieci kanalizacyjnej [7, 9, 12, 16].

Badania prowadzone w Polsce i na świecie wykazały, że bardzo trudne jest określenie dokładnego składu zanieczyszczeń w nich występujących. Spowodowane jest to głównie faktem, że na ilość i jakość odpływu do sieci kanalizacyjnych wpływa wiele różnych czynników i zjawisk [6, 8].

Sama wartość stężenia zanieczyszczeń występujących w ściekach opadowych jest zmienna w trakcie trwania deszczu. W wielu publikacjach pojawia się termin „pierwszej fali odpływu zanieczyszczeń” (z angielskiego „first flush”). Pojęcie to związane jest z okresami, gdy do kanalizacji dopływają nagle znaczne ilości ścieków po występującej przez dłuższy czas pogodzie bezdeszczowej. Pierwsza fala transportuje zanieczyszczenia zakumulowane w czasie trwania okresów bezdeszczowych, pomiędzy opadami. Z przeprowadzonych dotychczas badań wynika, że stężenie zanieczyszczeń osiąga wartości maksymalne w ciągu pierwszych 15-60 minut trwania opadu [1, 2, 3].

Przechwycenie i oczyszczenie ścieków pochodzących z pierwszej fali zanieczyszczeń pozwoli w znacznym stopniu ograniczyć negatywny wpływ zrzutów ścieków opadowych na odbiornik. W literaturze trudno jest znaleźć gotowe rozwiązania konstrukcyjne przeznaczone do przechwycenia pierwszej fali zanieczyszczeń. Zasadniczo urządzenia tego typu powinny zatrzymać określoną objętość najbardziej zanieczyszczonych ścieków opadowych. Zatrzymana objętość ścieków powinna być:

- poddana procesom oczyszczania (sedymencja),

- odprowadzona do kanalizacji sanitarnej i dalej do oczyszczalni ścieków komunalnych.

W pierwszym wariantcie możliwe jest stosowanie zbiorników retencyjnych łączących funkcje przechwycenia pierwszej fali oraz oczyszczania ścieków (osadnik), zaś w drugim wariantcie można wykorzystać zbiornik retencyjny jako regulator przepływu tworząc w ten sposób system półrozdzielczy [10, 14]. W niniejszym artykule przedstawiono konstrukcję oraz koncepcję zastosowania zbiornika retencyjnego do przechwycenia pierwszej fali zanieczyszczeń, który może pełnić funkcję regulatora rozdziálu ścieków opadowych i stanowić alternatywę dla opisanych w literaturze separatorów przepływu stosowanych w kanalizacji półrozdzielczej.

Konstrukcja i hydrauliczne działanie zbiornika retencyjnego

W prowadzonych badaniach zaproponowano konstrukcję zbiornika służącego do przechwycenia pierwszej fali zanieczyszczeń. Urządzenie może być wykorzystane jako regulator rozdziálu ścieków opadowych i może znaleźć zastosowanie w rozbudowie i modernizacji sieci kanalizacyjnych. Stanowi alternatywę dla separatorów przepływu stosowanych w kanalizacji półrozdzielczej.

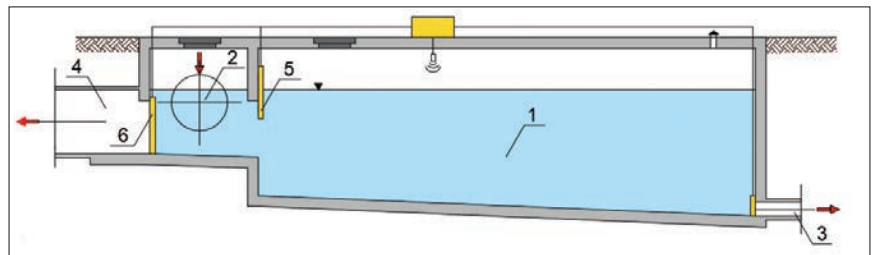
Konstrukcję zbiornika retencyjnego WRP3 (rys. 1) (na razie taka nazwa) wyróżnia to, że zarówno dopływ ścieków do komory retencyjnej, odpływ do odbiornika oraz kanalizacji sanitarnej jest sterowany przy pomocy regulatorów (w tym przypadku elektrozasuwy). Istnieje możliwość zastąpienia automatycznego sterowania poprzez układ hydrauliczny tam, gdzie problemem jest doprowadzenie energii elektrycznej. W takim przypadku przewidziano zastosowanie zaworu pływakowego, który będzie otwierał światło otworu spustowego w zależności od wysokości napełnienia kanału ściekowego. Podobne urządzenia

można zastosować do otwierania bądź zamykania dopływu do komory retencyjnej i odpływu do kanału odprowadzającego ścieki opadowe do odbiornika.

Cechą charakterystyczną zbiornika WRP3, jest to, że po jego całkowitym wypełnieniu dopływ do komory retencyjnej zostaje zamknięty. W tym samym czasie następuje otwarcie kanału odprowadzającego ścieki opadowe do odbiornika. Dopiero po całkowitym opróżnieniu zbiornika przez otwór spustowy następuje otwarcie zasowy na dopływie do komory retencyjnej i istnieje możliwość ponownego jego napełnienia. Można zatem mówić w tym przypadku o sekwencyjnym działaniu tego zbiornika.

Zbiornik ma przejąć pierwszą, najbardziej zanieczyszczoną, objętość ścieków opadowych i odprowadzić ją w całości poprzez sieć kanalizacji ściekowej do oczyszczalni ścieków. W działaniu omawianego zbiornika wyróżniono następujące fazy działania:

- **Faza przepływowa** występująca, gdy natężenie dopływających do zbiornika ścieków jest mniejsze lub równe od maksymalnego chwilowego natężenia odpływu ścieków do kanału ściekowego poprzez regulowany otwór spustowy. Wartość natężenia odpływu ścieków ze zbiornika do kanalizacji ściekowej nie jest stała i zależy od stopnia otwarcia otworu spustowego. Znajdujący się na wylocie do kanału odpływowego regulator (elektrozasuwa) steruje stopniem otwarcia otworu spustowego, a więc i przepływem w ten sposób, aby maksymalnie wykorzystać przepustowość kanalizacji ściekowej;
- **Faza akumulacji ścieków w zbiorniku** ma miejsce wtedy, gdy natężenie dopływu ścieków do komory retencyjnej zbiornika ma większą wartość niż natężenie ich odpływu. Następuje wtedy ciągły przyrost objętości ścieków w komorze retencyjnej. Odpływ



Rys. 1.

Schemat zbiornika WRP3 (1 – komora retencyjna, 2 – kanał dopływowy, 3 – otwór spustowy z zasową, 4 – odpływ do odbiornika, 5 – zasowa na dopływie do zbiornika, 6 – zasowa na odpływie do odbiornika)

Fig. 1. Diagram of the WRP3 tank (1 – retention chamber, 2 – inflow channel, 3 – drain opening with gate valve, 4 – outflow to the receiver, 5 – gate valve on the inflow to the tank, 6 – gate valve on the outflow to the receiver)

ze zbiornika odbywa się poprzez regulowany otwór spustowy;

- **Stan chwilowy – całkowite napełnienie zbiornika oraz działanie regulatorów** ma miejsce wtedy, gdy zbiornik zostanie wypełniony ściekami do założonej na etapie projektowania wysokości piętrzenia ścieków w komorze retencyjnej. W tym samym czasie następuje otwarcie zasowy na odpływie do kanału odprowadzającego ścieki do odbiornika przy jednoczesnym zamknięciu zasowy na dopływie do komory retencyjnej;
- **Faza opróżniania zbiornika** rozpoczyna się, w momencie zamknięcia dopływu ścieków do komory retencyjnej. W tej fazie następuje ciągle obniżanie się poziomu ścieków w zbiorniku. Natężenie odpływu ścieków jest zmienne i zależy od stopnia otwarcia otworu spustowego. Faza opróżniania trwa do momentu ustania przepływu w otworze spustowym (opróżnienie zbiornika);
- **Stan chwilowy – przygotowanie zbiornika do ponownego cyklu pracy** – następuje wtedy otwarcie zasowy na dopływie do komory retencyjnej i jednoczesne zamknięcie kanału odprowadzającego ścieki do odbiornika.

nicy 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. 2b). Dokładniejszy opis zlewni, wraz z parametrami użytymi w procesie kalibracji modelu hydraulicznego przedstawiono w publikacjach [11, 12, 17].

W symulacjach wykorzystano opady 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).

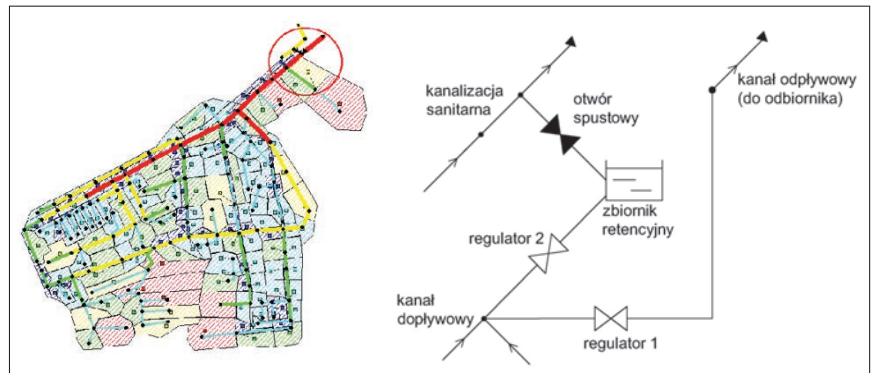
Badania zakładały modernizację istniejącej sieci deszczowej do kanalizacji półrozdzielczej przy wykorzystaniu zbiornika retencyjnego. Rozpatrywano zastosowanie kilku objętości komór retencyjnych: $V = 112,5\text{ m}^3$; 225 m^3 ; $337,5\text{ m}^3$; 450 m^3 ; $562,5\text{ m}^3$; 675 m^3 co daje w przeliczeniu na hektar powierzchni uszczelnionej 5; 10; 15; 20; 25; 30 m^3 . Maksymalne napełnienie komory retencyjnej zbiornika przyjęto równe 1,5 m. Zbiornik był umiejscowiony w końcowych odcinkach sieci (rys. 3) i sta-

nowił połączenie sieci kanalizacji deszczowej z kanalizacją bytowo-gospodarczą zlokalizowaną na tym obszarze. Na podstawie wykonanych obliczeń, dobrano średnicę kanału sanitarnego (0,3 m), a także ustalono przepływy ścieków w poszczególnych godzinach doby (szerzej opisane w [11, 17]). Na tej podstawie sporządzono hydrogram dopływu ścieków do kanału w czasie doby i zadano go do modelu. Pozwoliło to uzyskać bliski rzeczywistości przepływ ścieków bytowo – gospodarczych.

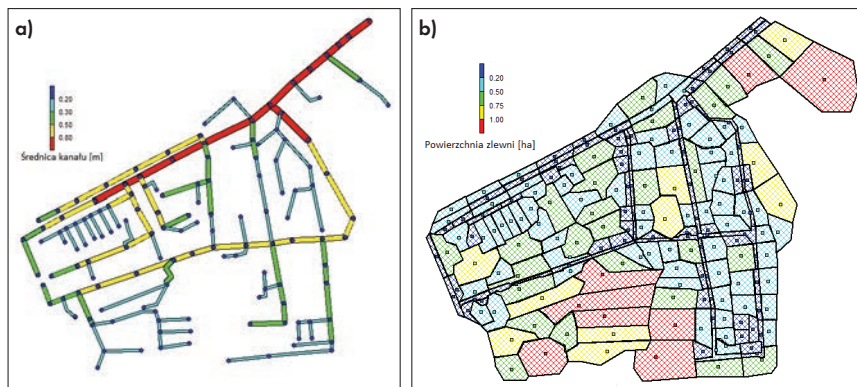
W badanym zbiorniku ścieki dopływają do komory retencyjnej zbiornika poprzez kanał dopływowy wyposażony w regulator przepływu (orifice). Gdy napełnienie zbiornika osiągnie założony poziom, dopływ do komory retencyjnej zostaje zamknięty przy jednoczesnym otwarciu odpływu (kanał z regulatorem) kierującego ścieki do odbiornika. Do zamodelowania sterowania regulatorami zastosowano znajdujący się w programie edytor reguł sterujących (control rules). Odpowiednie dobranie formuł pozwoliło sterować pracą regulatorów w zakładany sposób. Po całkowitym wypełnieniu komory retencyjnej dopływ ścieków do zbiornika zostaje zamknięty. Otwarcie dopływu ścieków i ponowne napełnianie komory retencyjnej jest

Badanie hydraulicznego działania zbiornika retencyjnego na podstawie modelu hydrodynamicznego

Analizy prowadzono w EPA SWMM na modelu rzeczywistej zlewni miejskiej, położonej w Częstochowie w dzielnicy Raków. Zlewnia zajmuje powierzchnię około 69 hektarów. Model badanej sieci składa się ze 138 odcinków (rys. 2a) o przekrojach kołowych i średnicach od 0,2 m do 1,0 m. Ścieki deszczowe są odprowadzane do wylotu kolektorem o śred-



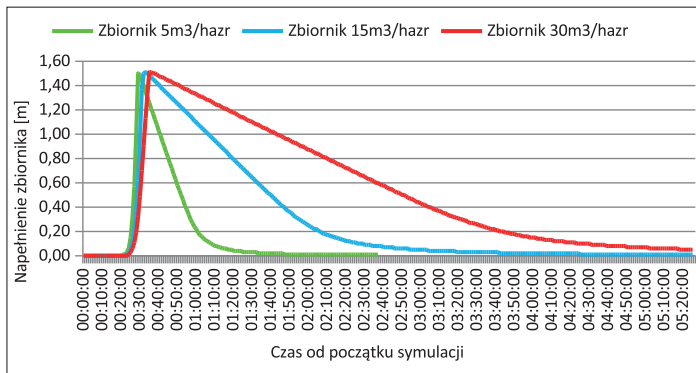
Rys. 3. Schemat zbiornika WRP3 w programie SWMM z zaznaczoną na mapie lokalizacją
Fig. 3. Diagram of the WRP3 reservoir in the SWMM program with its location marked on the map



Rys. 2. Schemat sieci: a) przebieg kanałów; b) podział na zlewnie cząstkowe
Fig. 2. Network diagram: a) channel layout; b) division into sub-catchment areas

możliwe dopiero po wcześniejszym całkowitym jej opróżnieniu. Odpływ ścieków ze zbiornika do kanału ściekowego odbywa się przez otwór spustowy sterowany regulatorem PID (regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący, ang. **proportional – integral – derivative controller**), pozwalający maksymalnie wykorzystać przepustowość kanału nie powodując jednocześnie jego przeciążenia. Schemat zbiornika wykonanego w SWMM przedstawiono na poniższym rysunku.

W pierwszym etapie badań z danych opadowych wybrano pojedyncze deszcze charakteryzujące się stosunkowo

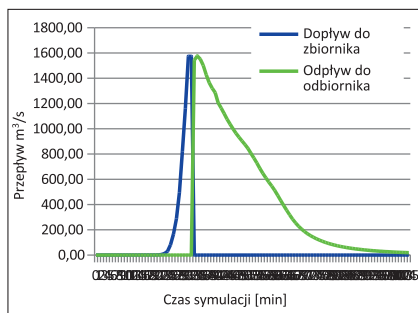


Rys. 4. Przebieg napełnienia zbiornika retencyjnego dla różnych objętości Fig. 4. Course of filling the retention tank for different volumes

wysokim natężeniem opadu i krótkim czasem trwania. Następnie przeprowadzono symulację dla każdego z analizowanych wariantów objętości zbiornika. Poniższe wyniki zebrano dla opadu z dnia 06.08.2011. Pierwszym parametrem była zmiana napełnienia komory retencyjnej w czasie (rys. 4).

Jak widać na wykresie, komora retencyjna zbiornika wypełnia się równo do zadanej głębokości wynoszącej 1,5 m. Regulator pozwala zamknąć dopływ ścieków do zbiornika, gdy osiągną założony poziom. Wraz ze zwiększaniem objętości zbiorników wydłuża się czas ich napełnienia oraz opróżniania.

Uzyskane wyniki symulacji pozwoliły zebrać dane dotyczące przepływu w kanałach przed i za zbiornikiem. W zbiorniku WRP3 są to kanał doprowadzający ścieki do zbiornika i przekierowujący ścieki do odbiornika, oba wyposażone w regulatory przepływu. Na wykresie (rys. 5) przedstawiono hydrogram dopływu ście-



Rys. 5. Przepływ ścieków na dopływie do zbiornika i odpływie do odbiornika [m³/s] dla zbiornika o objętości 15 m³/ha_{zr}

Fig. 5. Wastewater flow at the inflow to the tank and outflow to the receiver [m³/s] for a tank with a volume of 15 m³/ha_{zr}

ków do zbiornika i odpływu do odbiornika w omawianym układzie. Można tu zaobserwować działanie zastosowanych regulatorów przepływu. W momencie całkowitego wypełnienia ściekami zbiornika, dopływ do zbiornika zostaje zamknięty przy jednoczesnym otwarciu kanału odprowadzającego ścieki do odbiornika.

Badanie skuteczności usuwania zawiesin ze ścieków opadowych z wykorzystaniem zbiornika retencyjnego na podstawie modelu hydrodynamicznego

W tej części badań wykorzystano model jakościowy wykonany w programie SWMM dla opisanej wcześniej zlewni miejskiej. W opracowaniu modelowanym wskaźnikiem zanieczyszczeń była zawiesina ogólna. 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.

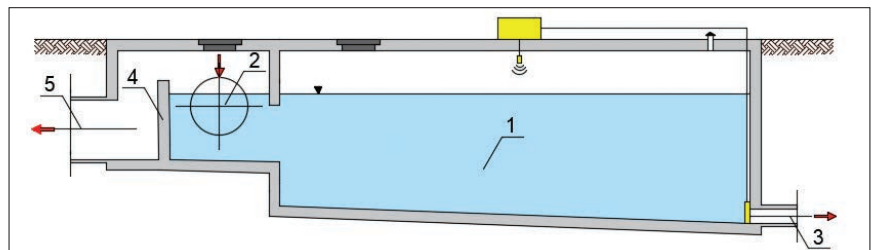
Do opisu gromadzenia zanieczyszczeń wybrano funkcję wykładniczą:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2t})$$

gdzie:

- B – aktualna akumulacja zanieczyszczeń [kg/ha],
- C₁ – graniczna masa gromadzonych zanieczyszczeń [kg/ha],
- C₂ – szybkość ubywania zanieczyszczeń (w wyniku wiatru i wynoszenia przez pojazdy [d₋₁]).

Parametry szybkości akumulacji zanieczyszczeń dobrano na podstawie literatury w ten sposób, aby osiągnąć wynik



Rys. 6. Schemat zbiornika WRP2: 1 – komora retencyjna, 2 – kanał dopływowy, 3 – otwór spustowy z zasuwą, 4 – przelew, 5 – odpływ do odbiornika. Fig. 6. Diagram of the WRP2 tank: 1 – retention chamber, 2 – inflow channel, 3 – drain opening with a gate valve, 4 – overflow, 5 – outflow to the receiver.

zblizony do średniej masy zawiesiny odprowadzanej z hektara nieprzepuszczalnej powierzchni rocznie kanalizacją, tj. około 430 kg/ha·rok. Wartości użyte w symulacjach przedstawiono w tabeli 1.

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

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

Natomiast do opisu procesu splukiwania zanieczyszczeń w wykonanym modelu zastosowano funkcję wykładniczą:

$$W = K_1 q K_2 B$$

gdzie:

- W – splukany ładunek zanieczyszczeń [kg/ha],
- K₁ – współczynnik szybkości splukiwania zanieczyszczeń [-],
- K₂ – współczynnik potęgowy [-],
- q – intensywność spływu powierzchniowego [mm/h],
- B – aktualna akumulacja zanieczyszczeń [kg/ha].

Parametry jakościowe nie były kalibrowane, a ich wartości parametrów charakteryzujących wyplukiwanie zanieczyszczeń zostały dobrane na podstawie zalecanych w literaturze [15, 18, 19], co przedstawiono w tabeli 1.

Aby dokładnie ocenić skuteczność usuwania zawiesin przez zastosowanie zbiornika WRP3, uzyskane wyniki należało porównać z innymi podobnymi rozwiązaniami, takimi jak zbiorniki pełniące funkcję regulatorów przepływu. Przykładowy zbiornik tego rodzaju opisano w artykule [12]. W publikacji [14] wykazano, że duży wpływ na efektywność działania tego typu urządzeń ma położenie przelewu, przez który nadmiar ścieków po wypełnieniu komory retencyjnej zostaje zrzucony do odbiornika. Badania [17] pokazały, że korzystniejsze jest zlokalizowanie przelewu w kanale dopływowym przed komorą

retencyjną, dlatego też do dalszych porównań wybrano ten wariant.

Konstrukcję zbiornika WRP2, o którym mowa, przedstawiono na rysunku 6. Podstawową różnicą w hydraulicznym działaniu pomiędzy zbiornikami jest to, że w przypadku WRP3 po całkowitym napełnieniu komory retencyjnej dopływ ścieków zostaje zamknięty aż do jego całkowitego opróżnienia, podczas gdy w WRP2 pewna ilość ścieków dopływa w sposób ciągły do komory retencyjnej. Wartość ta zależy od natężenia odpływu do kanału ściekowego poprzez otwór spustowy.

W początkowym etapie badań przeprowadzono symulacje ciągle dla lat 2011 i 2012.

W ciągu omawianego okresu do kanalizacji deszczowej dopłynęło około 110200 m³ ścieków opadowych, które niosły ze sobą łącznie 1900 kg zawiesiny, co daje w przeliczeniu na hektar powierzchni uszczelnionej 795 kg. Na wykresach rys. 7 a i 7 b zebrano dane dotyczące objętości ścieków oraz ilości zawiesiny, które zostały zrzucone do odbiornika w zależności od zastosowanego zbiornika retencyjnego.

Analizując powyższe dane można zauważyć znaczne różnice zarówno w objętości ścieków jak i masie zawiesiny odprowadzanych do odbiornika w zależności od wybranego wariantu zbiornika. Na rozdział w zbiornikach strumienia ścieków na te, które trafiły do odbiornika i te odprowadzone do kanalizacji ściekowej ma zastosowany rodzaj sterowania. Z założenia zbiorniki typu WRP3 mają za zadanie przejść tylko początkową, najbardziej zanieczyszczoną objętość opadów spływających ze zlewni. Odpowiednie sterowanie działaniem regulatorów zastosowanych w zbiorniku WRP3 pozwoliły ograniczyć ilość ścieków trafiających poprzez kanał spustowy zbiornika do kanalizacji sanitarnej. Mniejsza ilość ścieków odpływających do oczyszczalni nie spowoduje jej nadmiernego hydrauliczne-

go przeciążenia, jednak przyczyni się, w tym przypadku, do zrzućtu większej ilości zawiesiny do odbiornika (rys. 7 b).

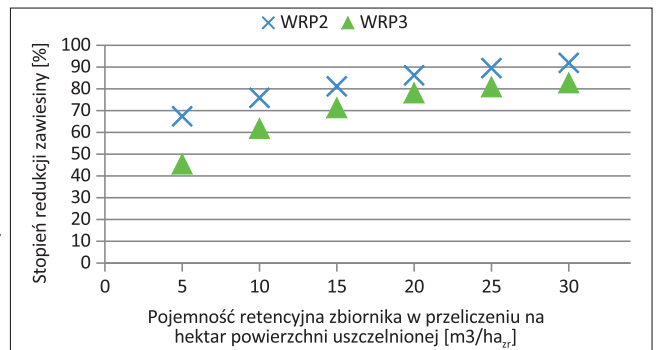
Jednym z najważniejszych parametrów pozwalających ocenić efektywność oczyszczania ścieków opadowych przez poszczególne urządzenia jest stopień redukcji zawiesiny. Uzyskane w symulacjach dane pozwoliły wyznaczyć wartość tego parametru (rys. 8).

Najlepsze efekty redukcji masy zawiesiny uzyskano stosując zbiornik WRP2. W zależności od objętości zbiornika stopień redukcji ładunku zawiesiny wynosi od 67% do 92%. W przypadku zbiornika WRP3 było to od 45% do 82%. Uzyskiwane wyniki można uznać za zadowala-

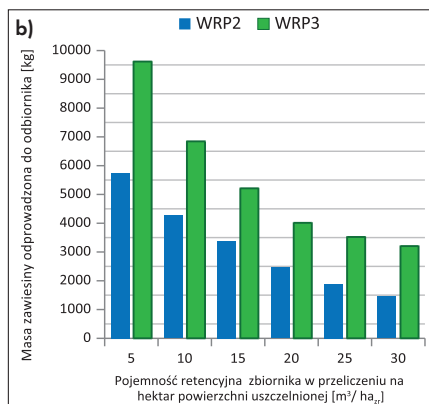
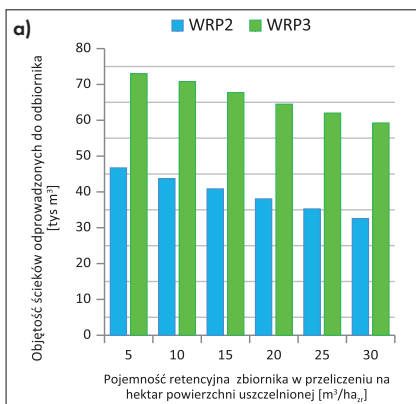
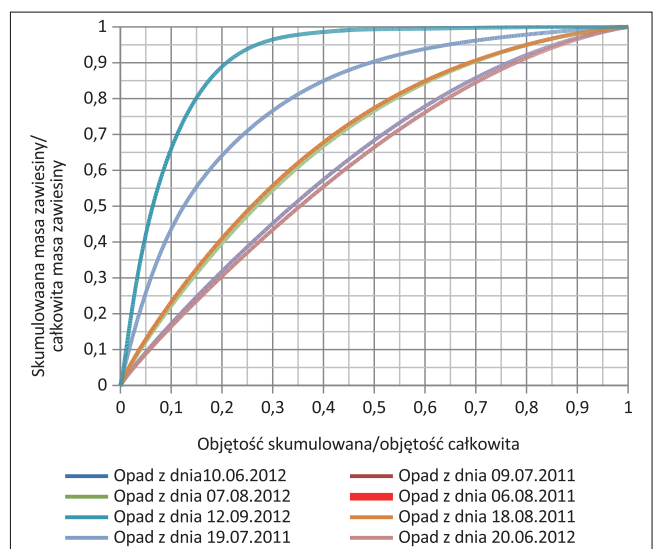
jące w szczególności dla zbiorników o większych pojemnościach.

Aby dokładniej zbadać mechanizm rozdziału zawiesin w proponowanym urządzeniu przeprowadzono symulację dla pojedynczego zjawiska opadowego. Z uwagi na to, że omawiany w artykule zbiornik WRP3 ma służyć przede wszystkim do przejścia pierwszej fali zanieczyszczeń sprawdzono czy na badanej zlewni zjawisko to występuje, a jeśli tak to jakiego rodzaju opady je powodują. W tym celu wybrano kilka zdarzeń opadowych z lat 2011 i 2012, charakteryzujących się wysokim natężeniem, których wystąpienie poprzedzało kilka dni okresu bezdeszczowego. Następnie przeprowa-

Rys. 8. Stopień redukcji zawiesiny w zależności od wariantu zbiornika i jego objętości w przeliczeniu na hektar powierzchni uszczelnionej [m³/ha_{zr}].
Fig. 8. Degree of suspended solids reduction depending on the tank variant and its volume per hectare of sealed area [m³/ha_{zr}].



Rys. 9. Całkowity ładunek zanieczyszczeń w całkowitej objętości ścieków odpływających ze zlewni dla wybranych opadów



Rys. 7. Objętość ścieków (a) i masa zawiesiny (b) odprowadzonych do odbiornika w zależności od objętości i rodzaju zbiornika retencyjnego w przeliczeniu na 1 ha powierzchni uszczelnionej [ha_{zr}].

Fig. 7. Volume of wastewater (a) and suspended solids mass (b) discharged into the receiving water body depending on the volume and type of retention basin per 1 ha of sealed surface area [ha_{zr}].

dono symulacje pozwalające sprawdzić charakterystykę odpływu ze zlewni, zmianę przepływu w czasie oraz przebieg stężeń na końcowych odcinkach sieci. Dokonano obliczeń według schematu przedstawionego w opracowaniach [2], które pozwoliły wyznaczyć krzywe określające stosunek całkowitego ładunku zanieczyszczeń w całkowitej objętości spływu (rys. 9).

Analizując powyższy wykres można stwierdzić, że na omawianym obszarze zlewni zjawisko pierwszej fali zanieczyszczeń występuje. W tym przypadku stwierdzono, że opady z dnia 19.07.2011, 06.08.2011, 07.08.2012, oraz 12.09.2012 powodują wystąpienie zjawiska odpływu pierwszej fali zanieczyszczeń.

Ostatecznie do badań wybrano opad z dnia 06.08.2011, który wcześniej został użyty do omówienia hydraulicznego działania zaproponowanego urządzenia. Symulacje prowadzono dla zbiorników o pojemności $15 \text{ m}^3/\text{ha}_{\text{zr}}$. Uzyskane wyniki zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki symulacji efektywności działania poszczególnych wariantów zbiorników dla opadu z dnia 06.08.2011

	WRP2	WRP3
Masa zawiesiny odprowadzona do odbiornika [kg]	129	150
Masa zawiesiny odprowadzonej do kanalizacji ściekowej [kg]	160	142
Objętość ścieków odprowadzona do odbiornika [m^3]	1550	2039
Objętość ścieków odprowadzona do kanalizacji ściekowej [m^3]	834	345
Stopień redukcji zawiesiny [%]	55	49
Średnie stężenie zawiesiny w ściekach odpływających do odbiornika [mg/dm^3]	83	74
Średnie stężenie zawiesiny w ściekach odpływających do kanalizacji ściekowej [mg/dm^3]	192	412

Jak widać na powyższym zestawieniu stopień redukcji zawiesiny występującej w ściekach był na podobnym poziomie i wynosił odpowiednio dla zbiornika WRP2 55% oraz dla zbiornika WRP3 49%. Średnie stężenia ścieków odprowadzanych do kanalizacji sanitarnej ze zbiornika WRP3 są o 1/3 wyższe niż w WRP2. W zbiorniku WRP2 dodatkowa objętość ścieków charakteryzujących się mniejszymi wartościami stężeń zawiesiny (po odpłynięciu pierwszej fali zanieczyszczeń) dopływa do zbiornika powodując zmniejszenie uśrednionych wartości stężeń zawiesiny w ściekach odprowadzanych ze zbiornika do kanalizacji ściekowej. Istotą działania zbiornika WRP3 jest przejście najbardziej zanieczyszczonych ścieków i odprowadzenie ich do oczyszczalni ścieków. Konstrukcja i zasada działania tego zbiornika pozwala w znacznym stopniu ograniczyć objętość ścieków jaka trafia do kanalizacji ściekowej. Zbiornik WRP3 najmniej oddziałuje na sieć kanalizacji ściekowej i w mniejszym stopniu obciąża hydraulicznie oczyszczalnię ścieków. Usunięcie 1 kg zawiesiny wymagało w tym przypadku odprowadzenia do kanalizacji ściekowej około $2,4 \text{ m}^3$ ścieków, podczas gdy w zbiorniku WRP2 było to już około $5,2 \text{ m}^3$ na 1 kg usuniętej zawiesiny. Taka różnica z pewnością ma duże znaczenie w kontekście wpływu poszczególnych rozwiązań na działanie oczyszczalni ścieków.

Podsumowanie

Omawiany w opracowaniu zbiornik, wydaje się być najkorzystniejszym spośród

przedstawionych w literaturze tego typu rozwiązań. Biorąc pod uwagę, oprócz stopnia redukcji zawiesiny także objętość ścieków odprowadzanych do kanalizacji ściekowej, zastosowanie zbiornika WRP3 jest najbardziej uniwersalne. W tym przypadku uzyskiwano zadowalający stopień redukcji, przy czym ograniczono w znaczący sposób objętość ścieków trafiających do kanału ściekowego. Wracając do wcześniej omówionych wyników można zauważyć, że stopień redukcji w zbiorniku WRP2 dla jego pojemności równej $15 \text{ m}^3/\text{ha}_{\text{zr}}$ wynosi 81,1 %. Niemal identyczną wartość (80,9%) uzyskano w zbiorniku WRP3 o pojemności wynoszącej $25 \text{ m}^3/\text{ha}_{\text{zr}}$. Objętości ścieków odprowadzane do kanalizacji sanitarnej różniły się natomiast dość znacznie. Stosując zbiornik WRP2, do kanalizacji ściekowej odpłynęło 69392 m^3 , podczas gdy w przypadku WRP3 było to 48238 m^3 ścieków. Jest to znacząca różnica mogąca mieć wpływ na funkcjonowanie oczyszczalni ścieków. Wynika z tego, że stosując zbiorniki do przejścia pierwszej fali zanieczyszczeń o większych pojemnościach można uzyskać zadowalające efekty przy jednoczesnym ograniczeniu odpływu ścieków do kanalizacji ściekowej. Problemem może być tutaj wielkość samego zbiornika, zwiększony koszt budowy, a także jego trudniejsza eksploatacja związana z bardziej złożonym sterowaniem przepływem (konieczność stosowania elektrozasuw bądź innych regulatorów przepływu).

Każde z zaprezentowanych urządzeń posiada zalety, ale i pewne ograniczenia, dlatego trudno jest jednoznacznie określić, który z wymienionych wariantów jest najlepszy. Wydaje się, że w przypadku omawianej zlewni będzie to zbiornik WRP3. Przy wyborze odpowiedniego wariantu ważna jest także przepustowość hydrauliczna oczyszczalni ścieków. Jeżeli jest ona duża można stosować mniejsze zbiorniki typu WRP2. Jeżeli istotniejsze będzie ograniczenie ilości ścieków odprowadzanych do sieci kanalizacyjnej efektywniejsze mogą okazać się zbiorniki do przejścia pierwszej fali zanieczyszczeń o większej pojemności. Warto dodać, że wyników otrzymanych w symulacjach nie powinno się przenosić bezpośrednio na inną zlewnię. Uzyskane dane zależą bowiem od wielu parametrów, charakterystycznych dla danego obszaru.

Praca naukowa finansowana w ramach projektu badawczego BS-PB-400/301/25

LITERATURA

- [1] Bandzierz D., Pierwsza fala splotu zanieczyszczeń-identyfikacja zjawiska na przykładzie GOŚ, Interdyscyplinarne zagadnienia w ochronie środowiska 2, 57-68, 2013,
- [2] Bertrand – Krajewski J., Chebbo G., Saget A., Distribution of pollutant mass vs volume in storm-

- [3] water discharges and first flush phenomenon, Water Resources, Vol. 32 No.8, s.2341-2356, Dziedziela B., Modelowanie splotu i składu ścieków opadowych dla rzeczywistej zlewni miejskiej, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, 2015,
- [4] Królikowska J., Królikowski A., Wody opadowe. Odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie, i wykorzystanie, Wydawnictwo Seidel-Przywiecki, Lublin, 2014,
- [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] Królikowska J., Podczyszczanie ścieków opadowych-rozwiazania, możliwości, efekty. Część I. Charakterystyka ścieków opadowych. Usuwanie zawiesiny Gaz, Woda i technika sanitarna 3/2011 s.109-115,
- [7] typ B., Infrastruktura wodno-ściekowa w planowaniu miast, Wydawnictwo Komunikacji i łączności, Warszawa,2008,
- [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 – Bystre 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., Sterowanie przepływem w kanalizacji półrozdzielczej, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, Tom 4 Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2014,
- [13] Ociepa E., Kisiel A., Lach J., Ochrona wód powierzchniowych przed zrzutami ścieków deszczowych z sieci kanalizacyjnych, Proceedings of ECOpole 2009, Vol. 3, No 1, 115-120,
- [14] Pluta K., Malmur R., Świątochowski 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,
- [15] Rossman L. A.: Storm Water Management Applications Manual, EPA, Cincinnati, 2009.
- [16] Sakson G., Zawilski M., Badowska E., Brzezińska A., Zanieczyszczenie ścieków opadowych jako podstawa wyboru sposobu ich zagospodarowania, Czasopismo Inżynierii Łdawowej i architektury, t. XXXI, z. 61 (3/1/14), lipiec-wrzesień 2014, s. 253-264,
- [17] Soonthornnonnda P., Christensen E.R., Liu Y, Li J.: A washoff model for stormwater pollutants, Science of Total Environment, 402, 2008, s 248-256,
- [18] Temprano J., Arango O., Cagiao J., Suarez J., Tejero I.: Stormwater quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain, Water SA, vol.32, no.1, 2006, s. 55-63,
- [19] Wang L., Wei J., Huang Y., Wang G., Maqsood I., Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County, Environmental Pollution, 159, 2009 s.1932-1940,
- [20] Zawilski M., Prognozowanie wielkości odpływu i ładunków zanieczyszczeń ścieków opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1997.