



# **Analiza efektywności kosztowej różnych wariantów technologicznych przydomowych oczyszczalni ścieków**

*Beata Karolinczak, Rafał Miłaszewski, Adrian Sztuk*  
*Politechnika Białostocka*

## **1. Wstęp**

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2013 roku z sieci wodociągowej korzystało 76,6% ludności wsi, a z sieci kanalizacyjnej zaledwie 30,9% [5]. Niski stopień skanalizowania terenów niezurbanizowanych, przy jednocześnie wysokim stopniu zwodociągowania, stwarza istotne zagrożenie dla środowiska, a także pogarsza warunki życiowe ludności [22]. Stwarza również bariery w rozwoju tych terenów [13].

Przyjmuje się, że budowa sieci kanalizacyjnej jest uzasadniona finansowo i technicznie, gdy na 1 km jej długości przypada nie mniej niż 120 osób, a w szczególnych okolicznościach nie mniej niż 90 [17]. W pozostałych przypadkach należy stosować kanalizację bezodpływową lub oczyszczać ścieki w miejscu ich powstania za pomocą przydomowych oczyszczalni ścieków. Sposób odprowadzania i oczyszczania ścieków zależy od struktury zabudowy i może być różny w poszczególnych częściach miejscowości bądź gminy [1].

Według wielu autorów [6, 8, 11], średnioroczne koszty ponoszone przez użytkowników przydomowych oczyszczalni ścieków są niższe w porównaniu z kosztami gromadzenia nieczystości ciekłych w szczelnych zbiornikach bezodpływowych i ich okresowego wywożenia do zbiorczych oczyszczalni ścieków. W większości opracowań brakuje jednak informacji na temat struktury nakładów inwestycyjnych ponoszonych na budowę poszczególnych rodzajów przydomowych oczyszczalni ścieków, a także

rodzaju kosztów eksploatacji ujętych w kalkulacji. Pomijane są także warunki gruntowo-wodne, znacznie wpływające na wielkość nakładów inwestycyjnych. W efekcie potencjalni użytkownicy, kierujący się przy doborze oczyszczalni zwykle kryterium ekonomicznym, nie znają wielkości całkowitych kosztów ani warunków, jakie muszą być spełnione w celu uzyskania wymaganej efektywności technologicznej [19].

Celem artykułu jest ocena efektywności kosztowej różnych rozwiązań technologicznych przydomowej oczyszczalni ścieków zaprojektowanej dla czteroosobowego gospodarstwa domowego, położonego na gruncie o dobrej przepuszczalności i wodach gruntowych na najmniejszej głębokości 3,5 m p.p.t. Analizie poddano koszty budowy i eksploatacji siedmiu następujących wariantów technologicznych przydomowej oczyszczalni ścieków: drenażowej, z tunelami rozsączającymi, z pakietami rozsączającymi, hydrofitowej, z komorą osadu czynnego, ze złożem biologicznym oraz oczyszczalni hybrydowej. Uwzględniono wszystkie możliwe sposoby odprowadzania ścieków oczyszczonych, czyli drenaż rozsączający, tunele rozsączające i pakiety rozsączające, studnię chłonną i oczko wodne. Obliczone koszty zestawiono także z kosztami budowy i eksploatacji szczelnego zbiornika bezodpływowego.

Za wskaźnik będący miarą całkowitego kosztu ponoszonego przez użytkownika przyjęto średnioroczny koszt oczyszczania ścieków. Zależy on od wielkości nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacji oczyszczalni, a także zakładanego okresu jej eksploatacji i stopy dyskontowej, uwzględnianych w wartości współczynnika odzysku kapitału. Zgodnie z założeniami analizy efektywności kosztowej, przeprowadzono ją przy założeniu jednakowego we wszystkich przypadkach efektu użytkowego, za który przyjęto ilość oczyszczonych ścieków. W analizie tej pomija się kryteria jakości ścieków oczyszczonych, a także pozostałe efekty inwestycji [12].

## **2. Materiały i metody**

### **2.1. Charakterystyka gospodarstwa domowego**

Gospodarstwo domowe, dla którego jest projektowana przydomowa oczyszczalnia ścieków, znajduje się na terenie gminy Augustów w województwie podlaskim. Działka o powierzchni 800 m<sup>2</sup> jest położona na obrzeżach miasta bez dostępu do sieci kanalizacyjnej, a ścieki są tym-

czasowo gromadzone w zbiorniku bezodpływowym i wywożone do zbiorczej oczyszczalni. Plan zagospodarowania przestrzennego dopuszcza na tym terenie budowę przydomowych oczyszczalni ścieków. Prace hydrogeologiczne wykazały, iż na działce występują grunty niespoiste (piaski średnioziarniste), charakteryzujące się dobrą przepuszczalnością, a maksymalny poziom wód gruntowych wynosi 3,5 m p.p.t.

Z posadowionego na działce podpiwniczonygo budynku mieszkalnego kanalizacja wewnętrzna jest wyprowadzona na głębokości 0,8 m p.p.t. W budynku na stałe mieszkają 4 osoby, a średnie roczne zużycie wody wynosi  $Q_r = 90 \text{ m}^3$ . Zakładając 5% wskaźnik bezzwrotnego zużycia wody, średniodobową ilość powstających ścieków szacuje się na  $Q_{d\text{śr}} = 0,25 \text{ m}^3/\text{d}$ , a maksymalną  $Q_{d\text{max}} = 0,50 \text{ m}^3/\text{d}$  (przyjmując wskaźnik nierównomierności dobowej  $N_d = 2,00$ ).

## **2.2. Charakterystyka poszczególnych wariantów technologicznych oczyszczalni**

Poniżej opisano sposób wykonania poszczególnych wariantów technologicznych przydomowej oczyszczalni ścieków. W celu uzyskania porównywalnych wyników przyjęto następujące założenia:

- zastosowanie przepompowni wstępnej;
- wykorzystanie dwukomorowego osadnika gnilnego o pojemności  $2 \text{ m}^3$ , wyposażonego w kosz filtracyjny, z wyjątkiem oczyszczalni kontenerowych (z komorą osadu czynnego, ze złożem biologicznym i hybrydowej), wyposażonych fabrycznie w osadnik gnilny;
- przykrycie dna wykopu pod osadnik, przepompownię i oczyszczalnię kontenerowe 10 cm warstwą piasku stabilizowanego cementem, w celu zabezpieczenia przed wyporem przy okresowo podwyższonym poziomie wód gruntowych;
- połączenie urządzeń rurami PVC  $\text{Ø}110$ ;
- wentylacja przez obejście z wywiewką wyprowadzoną 0,6 m ponad górną krawędź okien i drzwi zewnętrznych.

W kalkulacji kosztów natomiast założono:

- uwzględnienie cen katalogowych polskich producentów, których produkty mają wymagane atesty i dopuszczenia;

- uwzględnienie realnych lokalnych stawek robocizny (pracownicy: 15 zł/h, koparka: 120 zł/h) i godzinowego wymiaru prac ustalonego z firmą wykonawczą;
- przyjęcie kosztu transportu kruszywa z najbliższej żwirowni oddalonej o 30 km (stawka transportu: 4 zł/km – droga liczona w obie strony);
- transport własny pozostałych materiałów i urządzeń;
- przyjęcie kosztu pracy wykwalifikowanego personelu do okresowej obsługi i kontroli pracy oczyszczalni znajdujących się na terenie gminy (30 zł/h);
- uwzględnienie maksymalnej stawki za wywóz osadów z przydomowej oczyszczalni ścieków określonej w uchwale Rady Gminy Augustów (49 zł/m<sup>3</sup> brutto), a w przypadku nieczystości ciekłych średniej ceny oferowanej przez podmioty świadczące usługi w zakresie opróżniania zbiorników bezodpływowych na terenie gminy (20 zł/m<sup>3</sup> brutto).

### **Oczyszczalnia z drenażem rozsączającym**

Oczyszczalnia z drenażem rozsączającym, dzięki stosunkowo niskim kosztom budowy i eksploatacji, jest w wielu gminach w Polsce dominującym rozwiązaniem [7]. Ze względu na ograniczoną możliwość poboru próbek ścieków oczyszczonych, w wielu państwach europejskich jego stosowanie zostało zabronione. Budowa oczyszczalni z drenażem rozsączającym jest możliwa tylko na gruntach o bardzo dobrej, dobrej i średniej przepuszczalności. Zabronione jest jej stosowanie na gruntach nieprzepuszczalnych. Ponadto wymagane jest zachowanie odległości min. 1,5 m od najwyższego użytkowego poziomu wód gruntowych. W innym przypadku konieczna jest budowa kopca filtracyjnego.

W kalkulacji kosztów przyjęto, że oczyszczalnia składa się z przepompowi wstępnej, osadnika gnilnego, przepompowni właściwej i drenażu rozsączającego w układzie otwartym. Drenaż tworzą 3 ciągi o długości 13 m każdy, ułożone w rozstawie 1,5 m. Rury drenażowe są ułożone ze spadkiem 1% w wykopie o szerokości 50 cm i głębokości 1 m, wypełnionym 35 cm warstwą kruszywa o granulacji 16–32 mm przykrytą geowłókniną, a następnie gruntem rodzimym. Ciągi drenażowe są zakończone wentylacją w postaci rur PVC z wywiewką usytuowaną 0,5 m n.p.t.

W tabeli 1 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni z drenażem rozsączającym. W kosztach robocizny uwzględniono 30 roboczogodzin, a w kosztach sprzętu 10 godzin pracy koparki, a także koszt transportu 12 ton kruszywa. W kosztach eksploatacji uwzględniono koszty: energii elektrycznej pobieranej przez pompy w przepompowniach, wywozu osadów z osadnika gnilnego (1 na rok) i zakupu biopreparatów. Założono, że okresowe przeglądy i czyszczenie kosza filtracyjnego osadnika gnilnego będą wykonywane przez użytkownika oczyszczalni.

**Tabela 1.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni z drenażem rozsączającym (poziom cen z 2014 r.)

**Table 1.** Investment and operating costs of drainage treatment plant (2014 price level)

Oczyszczalnia z drenażem rozsączającym			
1. nakłady inwestycyjne		8 547 zł	
a)	materiały	6 657 zł	78%
b)	robocizna	450 zł	5%
c)	sprzęt	1 200 zł	14%
d)	transport	240 zł	3%
2. roczne koszty eksploatacji		340 zł	

Źródło: opracowanie własne

### Oczyszczalnia z tunelami rozsączającymi

W kalkulacji kosztów założono zastosowanie tuneli rozsączających zamiast tradycyjnego drenażu, zachowując opisany powyżej osadnik i przepompownie. Sposób ich montażu, a także wymagania co do przepuszczalności gruntu i odległości od poziomu wód gruntowych pozostają niezmiennie. Dwa ciągi tuneli o długości 11 m każdy są ułożone w rozstępie 1,5 m ze spadkiem 1%, w wykopie o głębokości 1 m i szerokości 1,4 m, pokrytym 10 cm warstwą podsypki ze żwiru płukanego. Tunele są przykryte geowłókniną i przysypane warstwą gruntu rodzimego. W odróżnieniu od tradycyjnego drenażu, tunele zaprojektowano w układzie zamkniętym, tj. ciągi połączono studzienką zamykającą z wentylacją w postaci rur PVC z wywiewką usytuowaną 0,5 m n.p.t.

W tabeli 2 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni z tunelami rozsączającymi. W porównaniu z oczyszczalnią z tradycyjnym drenażem rozsączającym, zastosowanie tuneli podwyższa koszty materiałów, ale obniża koszty transportu kruszywa. Pozostałe składowe kosztów budowy i eksploatacji są takie same.

**Tabela 2.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni z tunelami rozsączającymi (poziom cen z 2014 r.)

**Table 2.** Investment and operating costs of drainage – tunnels treatment plant (2014 price level)

Oczyszczalnia z tunelami rozsączającymi			
1. nakłady inwestycyjne		10 606 zł	
a)	materiały	8 836 zł	84%
b)	robocizna	450 zł	4%
c)	sprzęt	1 200 zł	11%
d)	transport	120 zł	1%
2. roczne koszty eksploatacji		340 zł	

*Źródło: opracowanie własne*

### **Oczyszczalnia z pakietami rozsączającymi**

W kalkulacji kosztów założono zastosowanie pakietów rozsączających, zamiast tradycyjnego drenażu lub tuneli, zachowując opisany powyżej osadnik i przepompownię. Sposób ich montażu, a także wymagania co do przepuszczalności gruntu i poziomu wód pozostają niezmienne. Zastosowano 4 pakiety rozsączające ułożone w jednym ciągu, ze spadkiem 1% w wykopie o szerokości 40 cm i głębokości 1 m. Na pakietach są ułożone główne rury drenażowe PVC Ø110, do których podłączono rury boczne. Na końcu ciągu została zastosowana wentylacja w postaci rur PVC Ø110, zakończona wywiewką usytuowaną 0,5 m n.p.t.

W tabeli 3 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni z pakietami rozsączającymi. W porównaniu z poprzednimi oczyszczalniami drenażowymi, zmiana ulega koszt materiałów. Pozostałe składowe kosztów budowy i eksploatacji są takie same, przy czym nie występują tu koszty transportu żwiru.

**Tabela 3.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni z pakietami rozsączającymi (poziom cen z 2014 r.)

**Table 3.** Investment and operating costs of drainage panels treatment plant (2014 price level)

Oczyszczalnia z pakietami rozsączającymi			
1. nakłady inwestycyjne		7 834 zł	
a)	materiały	6 184 zł	79%
b)	robocizna	450 zł	6%
c)	sprzęt	1 200 zł	15%
2. roczne koszty eksploatacji		340 zł	

*Źródło: opracowanie własne*

### Oczyszczalnia hydrofitowa

Zastosowanie złożeń hydrofitowych w Polsce jest coraz bardziej powszechne ze względu na ich dużą odporność na nierównomierność dopływu ścieków i temperaturę, a także prostą obsługę [16]. Oprócz oczyszczania ścieków bytowych i komunalnych, złoża te znajdują również zastosowanie, m. in. do odwadniania osadów ściekowych [14], oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów [23], czy też zmniejszania obciążenia oczyszczalni poprzez podczyszczanie nieczystości ciekłych [20] lub oczyszczanie odcieków z przeróbki osadów [3]. W złożach o pionowym podpowierzchniowym przepływie (VF-CW), wysokie efekty oczyszczania utrzymują się przez wiele lat [21].

W odróżnieniu od oczyszczalni drenażowych, oczyszczalnia hydrofitowa może być stosowana na każdym gruncie i niezależnie od poziomu wód gruntowych, przy czym oba czynniki wpływają na wybór sposobu odprowadzania ścieków oczyszczonych, a także głębokość posadowienia oczyszczalni. W kalkulacji kosztów przyjęto, że oczyszczalnia składa się z przepompowni wstępnej, osadnika gnilnego, przepompowni właściwej i złoża hydrofitowego o powierzchni 12 m<sup>2</sup>. Częściowo zagłębione złożo uszczelniono folią basenową i folią kubełkową. Zgodnie z zaleceniami [4, 2] wypełniono je wyłącznie materiałem mineralnym: na dnie zastosowano kamienie o granulacji 60–100 mm (grubość warstwy 15 cm), następnie żwir płukany 12,5–25 mm (grubość warstwy 30 cm) i piasek 0,1–2 mm (grubość warstwy 15 cm). Drenaż rozsączający z rur PVC Ø110, połączony ze studzienką rozdzielczą, składa się z dwóch

ciągów o długości 3,5 m każdy. Drenaż zbierający, ułożony w warstwie kamieni, składa się również z dwóch ciągów o długości 3,5 m każdy, łączących się w studziencie zbierającej. Wentylację obu drenaży zapewniają pionowe rury PVC Ø110 mm zakończone wywiewką. Zgodnie z zaleceniami [2] złoże zasadzono zakupionymi sadzonkami trzciny pospolitej (*Phragmites australis*).

W tabeli 4 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni hydrofitowej. W kosztach robocizny uwzględniono 40 roboczogodzin, w kosztach sprzętu 16 godzin pracy koparki, a także koszt transportu 14 ton kruszywa. W kosztach eksploatacji uwzględniono koszty: energii elektrycznej pobieranej przez pompy w przepompowniach oraz wywozu osadów z osadnika gnilnego (1 na rok). Założono, że okresowe przeglądy i czyszczenie kosza filtracyjnego osadnika gnilnego będą wykonywane przez użytkownika oczyszczalni.

**Tabela 4.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni hydrofitowej (poziom cen z 2014 r.)

**Table 4.** Investment and operating costs of constructed wetlands (2014 price level)

<b>Oczyszczalnia hydrofitowa</b>			
1. nakłady inwestycyjne		8 964 zł	
a)	materiały	6 084 zł	68%
b)	robocizna	600 zł	7%
c)	sprzęt	1 920 zł	21%
d)	transport	360 zł	4%
2. roczne koszty eksploatacji		103 zł	

*Źródło: opracowanie własne*

### **Oczyszczalnia ze złożem biologicznym**

Oczyszczalnie ze złożem biologicznym przez wiele lat były w Polsce powszechnie stosowane do oczyszczania małych ilości ścieków na terenach wiejskich. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku, podwyższenie wymagań prawnych w zakresie usuwania związków biogennych spowodowało wyparcie tej technologii przez urządzenia osadu czynnego. Zmiana przepisów i udoskonalenie technologii złożeń biologicznych sprawiło, że są one obecnie znów chętnie stosowane zarówno w małych



zbiorczych, jak też przydomowych oczyszczalniach ścieków [9]. Ich zaletą jest niewielkie zapotrzebowanie terenu, odporność na nierównomierność obciążeń hydraulicznego i ładunkiem zanieczyszczeń, a także niższe w porównaniu do technologii osadu czynnego zużycie energii. Oczyszczalnie te mogą być stosowane niezależnie od rodzaju gruntu i poziomu wód gruntowych, przy czym oba te czynniki wpływają na wybór sposobu odprowadzania ścieków oczyszczonych. W kalkulacji kosztów założono, że oczyszczalnia składa się z czterokomorowego złoża biologicznego z wydzielonym osadnikiem wstępnym, przed którym zamontowano przepompownię wstępną.

W tabeli 5 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni ze złożem biologicznym. W kosztach robocizny uwzględniono 20 roboczogodzin, a w kosztach sprzętu 8 godzin pracy koparki. W kosztach eksploatacji uwzględniono koszty: energii elektrycznej pobieranej przez pompę w przepompowni oraz przez złożo biologiczne, wywozu osadów z osadnika gnilnego (1 na rok) oraz okresowej zewnętrznej obsługi oczyszczalni (przyjęto 1h/miesiąc).

**Tabela 5.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni ze złożem biologicznym (poziom cen z 2014 r.)

**Table 5.** Investment and operating costs of biological filter treatment plant (2014 price level)

<b>Oczyszczalnia ze złożem biologicznym</b>			
1. nakłady inwestycyjne		11 484 zł	
a)	materiały	10 224 zł	89%
b)	robocizna	300 zł	3%
c)	sprzęt	960 zł	8%
2. roczne koszty eksploatacji		561 zł	

*Źródło: opracowanie własne*

### **Oczyszczalnia z komorą osadu czynnego**

Efektywna technologicznie i kosztowo w dużych oczyszczalniach metoda osadu czynnego, przeniesiona na grunt przydomowych oczyszczalni ścieków nie zawsze daje oczekiwane efekty [10]. Obsługa oczyszczalni z komorą osadu czynnego wymaga fachowej wiedzy, a zatem konieczne jest zatrudnienie dochodzącej obsługi do okresowego nadzoru jej

pracy. Podobnie jak oczyszczania ze złożem biologicznym, oczyszczalnia z komorą osadu czynnego zajmuje mało miejsca. Może być stosowana na każdym gruncie i niezależnie od poziomu wód gruntowych, przy czym oba czynniki wpływają na wybór sposobu odprowadzania ścieków oczyszczonych. W kalkulacji kosztów przyjęto zastosowanie reaktora kompaktowego, składającego się z osadnika wstępnego, komory osadu czynnego i osadnika wtórnego. Przed oczyszczalnią znajduje się przepompownia wstępna.

W tabeli 6 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni z komorą osadu czynnego. W kosztach robocizny uwzględniono 20 roboczogodzin, a w kosztach sprzętu 8 godzin pracy koparki. W kosztach eksploatacji uwzględniono koszty: energii elektrycznej pobieranej przez reaktor i przepompownię, wywozu osadów ściekowych (2 razy w roku), biopreparatów oraz okresowej zewnętrznej obsługi oczyszczalni (przyjęto 2h/miesiąc).

**Tabela 6.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni z komorą osadu czynnego (poziom cen z 2014 r.)

**Table 6.** Investment and operating costs of activated sludge treatment plant (2014 price level)

<b>Oczyszczalnia z komorą osadu czynnego</b>			
1. nakłady inwestycyjne		11 676 zł	
a)	materiały	10 416 zł	89%
b)	robocizna	300 zł	3%
c)	sprzęt	960 zł	8%
2. roczne koszty eksploatacji		1 123 zł	

*Źródło: opracowanie własne*

### **Oczyszczalnia hybrydowa**

Oczyszczalnia hybrydowa stanowi połączenie technologii osadu czynnego i złoż biologicznych. Łączy wysoką efektywność osadu czynnego, z większą odpornością złoż biologicznych na zmieniające się obciążenie hydrauliczne i obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń [15]. Warunkiem pełnego wykorzystania możliwości tej oczyszczalni jest zapewnienie okresowego nadzoru wyspecjalizowanej obsługi, przy czym zakres jej prac jest mniejszy niż w przypadku oczyszczalni z komorą osadu

czynnego. Podobnie jak trzy poprzednie oczyszczalnie, może być ona stosowana na każdym gruncie i niezależnie od poziomu wód gruntowych, przy czym oba czynniki wpływają na wybór sposobu odprowadzania ścieków oczyszczonych. W kalkulacji kosztów założono zastosowanie kompaktowej oczyszczalni, poprzedzonej przepompownią wstępną. Oczyszczalnia składa się z dwukomorowego osadnika gnilnego o pojemności 2,5 m<sup>3</sup>, wyposażonego w filtr szczelinowy, a także bioreaktora o pojemności 2,5 m<sup>3</sup> z przegrodą dzielącą zbiornik na dwie strefy: osad czynny i złożo biologiczne.

W tabeli 7 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji oczyszczalni hybrydowej. W kosztach robocizny uwzględniono 20 roboczogodzin, a w kosztach sprzętu 8 godzin pracy koparki. W kosztach eksploatacji uwzględniono koszty: energii elektrycznej pobieranej przez przepompownię oraz oczyszczalnię, wywozu osadów ściekowych i obumarłej błony biologicznej (2 razy na rok) oraz okresowej zewnętrznej obsługi oczyszczalni (przyjęto 1 h/miesiąc).

**Tabela 7.** Koszty budowy i eksploatacji oczyszczalni hybrydowej (poziom cen z 2014 r.)

**Table 7.** Investment and operating costs of hybrid treatment plant (2014 price level)

<b>Oczyszczalnia hybrydowa</b>			
1. nakłady inwestycyjne		14 607 zł	
a)	materiały	13 347 zł	91%
b)	robocizna	300 zł	2%
c)	sprzęt	960 zł	7%
2. roczne koszty eksploatacji		809 zł	

*Źródło: opracowanie własne*

### 2.3. Sposoby odprowadzania ścieków oczyszczonych

Ścieki oczyszczone mogą być odprowadzane do wód, gruntu i atmosfery. Najczęściej ich odbiornikiem jest grunt, do którego są odprowadzane za pomocą drenażu, pakietów i tuneli rozsączających lub studni chłonnej. Stosując oczko wodne zasiedlone roślinnością wodną i wodnolubną, ścieki oczyszczone są odprowadzane do atmosfery przez odparowanie i ewapotranspirację. Można je także wykorzystać do pod-

lewania trawników. W okresie niskich temperatur, oczko wodne może zamarznąć, dlatego warto za nim przewidzieć odcinek drenażu.

Wybierając sposób odprowadzania ścieków oczyszczonych, należy uwzględnić konieczność zachowania odległości minimum 1,5 m od najwyższego użytkowego poziomu wód gruntowych, a także przepuszczalność gruntu. Na gruntach nieprzepuszczalnych jedyną możliwość odprowadzania ścieków oczyszczonych stanowi odparowanie w oczku wodnym.

W kalkulacji kosztów przyjęto sposób montażu drenażu rozsączającego, tuneli i pakietów rozsączających zgodny ze wcześniejszym opisem, przy czym ich długość jest o połowę mniejsza niż w przypadku, gdy są one stosowane jako urządzenie do biologicznego oczyszczania ścieków (czyli: 2 ciągi drenażu po 10 m, ciąg tuneli o długości 11 m, 2 pakiety). We wszystkich przypadkach w kosztach robocizny uwzględniono 10 roboczogodzin, w kosztach sprzętu 5 godzin pracy koparki. W przypadku drenażu i tuneli rozsączających uwzględniono dodatkowo koszt transport kruszywa.

W kalkulacji studni chłonnej założono zastosowanie studni w kształcie dzwonu o średnicy u podstawy  $d=1,3$  m, z nadstawką i pokrywą. Umieszczono ją w poszerzonym wykopie o szerokości 1,7 m, pokrytym 1 m warstwą żwiru płukanego o granulacji 16-32 mm. Zapewniono również jej wentylację poprzez rury PVC Ø110 zakończone wywiewką położoną 0,5 m n.p.t. W kosztach robocizny uwzględniono 8 roboczogodzin, w kosztach sprzętu 3 godziny pracy koparki, a w kosztach transportu koszt transportu 4 ton kruszywa.

W przypadku oczka wodnego założono, że jego głębokość wynosi 0,7 m, a powierzchnia  $6 \text{ m}^2$ . Jego dno jest uszczelnione geomembraną 1 mm, a boki obsadzone roślinnością wodnolubną. W kosztach robocizny uwzględniono 8 roboczogodzin, w kosztach sprzętu 3 godziny pracy koparki.

W tabeli 8 zestawiono informacje o kosztach budowy poszczególnych rozwiązań. Do tych kosztów należy doliczyć koszt prac hydrogeologicznych, poprzedzających decyzję o wyborze sposobu odprowadzenia ścieków oczyszczonych, sięgający 300–500 zł.

**Tabela 8.** Koszty budowy systemu odprowadzania ścieków oczyszczonych (poziom cen z 2014 r.)

**Table 8.** Costs for construction of a system for discharge of treated sewage (2014 price level)

1. Drenaż rozsączający		
nakłady inwestycyjne	1486 zł	
a) materiały	616 zł	42%
b) robocizna	150 zł	10%
c) sprzęt	600 zł	40%
d) transport	120 zł	8%
2. Tunele rozsączające		
nakłady inwestycyjne	2467 zł	
a) materiały	1597 zł	65%
b) robocizna	150 zł	6%
c) sprzęt	600 zł	24%
d) transport	120 zł	5%
3. Pakiety rozsączające		
nakłady inwestycyjne	1139 zł	
a) materiały	389 zł	34%
b) robocizna	150 zł	13%
c) sprzęt	600 zł	53%
4. Studnia chłonna		
nakłady inwestycyjne	1954 zł	
a) materiały	1354 zł	69%
b) robocizna	120 zł	6%
c) sprzęt	360 zł	19%
d) transport	120 zł	6%
5. Oczko wodne		
nakłady inwestycyjne	955 zł	
a) materiały	475 zł	50%
b) robocizna	120 zł	12%
c) sprzęt	360 zł	38%

Źródło: opracowanie własne

## 2.4. Zbiornik bezodpływowy

Alternatywą do budowy przydomowej oczyszczalni ścieków jest gromadzenie nieczystości ciekłych w zbiorniku bezodpływowym i ich okresowe wywożenie do zbiorczej oczyszczalni ścieków w Augustowie. W kalkulacji kosztów założono zastosowanie dwukomorowego zbiornika bezodpływowego o pojemności 8 m<sup>3</sup>, opróżnianego ze średnią częstotliwością raz w miesiącu. Zbiornik zamontowano na podsypce z piasku stabilizowanego cementem, a jego wentylację zapewnia obejście z wentewką wyprowadzoną 0,6 m ponad górną krawędź okien i drzwi.

W tabeli 9 zestawiono informacje o kosztach budowy i eksploatacji tego zbiornika. W kosztach robocizny uwzględniono 15 roboczogodzin, a w kosztach sprzętu 5 godzin pracy koparki. W kosztach eksploatacji uwzględniono koszty okresowego wywozu nieczystości ciekłych do zbiorczej oczyszczalni ścieków (20 zł/m<sup>3</sup> brutto).

**Tabela 9.** Koszty budowy i eksploatacji zbiornika bezodpływowego (poziom cen z 2014 r.)

**Table 9.** Investment and operating costs of a holding tank (2014 price level)

Zbiornik bezodpływowy			
1. nakłady inwestycyjne		7 948 zł	
d)	materiały	7 123 zł	90%
e)	robocizna	225 zł	3%
f)	sprzęt	600 zł	7%
2. roczne koszty eksploatacji		1 920 zł	

Źródło: opracowanie własne

## 2.5. Metodyka wyznaczania całkowitego średniorocznego kosztu oczyszczania ścieków

Całkowity średnioroczny koszt oczyszczania ścieków jest obliczany ze wzoru [12]:

$$K_r = I\alpha + K_e \quad (1)$$

gdzie:

$K_r$  – całkowity średnioroczny koszt oczyszczania ścieków [zł/rok],

$I$  – nakłady inwestycyjne [zł],

$\alpha$  – współczynnik zwrotu kapitału [ $\text{rok}^{-1}$ ],  
 $K_e$  – koszty eksploatacji (bez amortyzacji) [ $\text{zł}/\text{rok}$ ].

Jak zatem wynika ze wzoru (1) całkowity średnioroczny koszt oczyszczania ścieków ( $K_r$ ) zależy od nakładów inwestycyjnych ( $I$ ), kosztów eksploatacji ( $K_e$ ), a także opisanego równaniem (2) współczynnika zwrotu kapitału:

$$\alpha = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik zwrotu kapitału [ $\text{rok}^{-1}$ ],  
 $r$  – stopa dyskontowa [ $\text{rok}^{-1}$ ],  
 $n$  – kalkulacyjny okres eksploatacji [lata].

Założony okres eksploatacji wszystkich oczyszczalni wynosi  $n = 20$  lat. Stopę dyskontową przyjęto na poziomie  $r = 5\%$ . W nakładach inwestycyjnych uwzględniono sumę kosztów ponoszonych na budowę urządzeń do oczyszczania ścieków, a także systemu odprowadzania ścieków oczyszczonych. Podane koszty eksploatacji dotyczą całego układu.

### 3. Wyniki i dyskusja

W tabeli 10 zestawiono wyniki obliczeń wielkości nakładów inwestycyjnych, rocznych kosztów eksploatacji i całkowitego średniorocznego kosztu oczyszczania w poszczególnych wariantach oczyszczalni, uwzględniając różne sposoby odprowadzania ścieków oczyszczonych.

Średnioroczny koszt gromadzenia nieczystości ciekłych w szczelnym zbiorniku bezodpływowym i ich wywożenia do zbiorczej oczyszczalni ścieków w Augustowie wynosi 2 556  $\text{zł}/\text{rok}$ . Średnioroczny koszt oczyszczania ścieków w oczyszczalni przydomowej, zależnie od zastosowanej technologii i sposobu odprowadzania ścieków oczyszczonych, waha się od 896  $\text{zł}/\text{rok}$  do 2 255  $\text{zł}/\text{rok}$  i wynosi średnio 1 627  $\text{zł}/\text{rok}$ . Jest tym samym niemal dwukrotnie niższy od kosztów budowy i eksploatacji szczelnego zbiornika bezodpływowego. Należy jednak przy tym zaznaczyć, iż relacja tych kosztów w istotny sposób zależy od ceny wywozu nieczystości ciekłych, które są w skali kraju bardzo zróżnicowane.

**Tabela 10.** Zestawienie nakładów inwestycyjnych, kosztów eksploatacji i całkowitych średniorocznych kosztów oczyszczania ścieków w zależności od technologii i sposobu odprowadzania ścieków oczyszczonych (poziom cen z 2014 r.)

**Table 10.** Comparison of investment, operating and total annual costs of sewage treatment depending on the technology and system of treated sewage discharge (2014 price level)

Wariant technologiczny oczyszczalni		Układ odprowadzający ścieki oczyszczone				
		drenaż rozsączający	tunele rozsączające	pakiety rozsączające	studnia chłonna	oczko wodne
Nakłady inwestycyjne [zł]		1 486	2 467	1 139	1 954	955
z drenażem rozsączającym	8 547	–	–	–	–	–
z tunelami rozsączającymi	10 606	–	–	–	–	–
z pakietami rozsączającymi	7 834	–	–	–	–	–
hydrofitowa	8 964	10 450	11 431	10 103	10 918	9 919
ze złożem biologicznym	11 484	12 970	13 951	12 623	13 438	12 439
z komorą osadu czynnego	11 676	13 162	14 143	12 815	13 630	12 631
hybrydowa	14 607	16 093	17 074	15 746	16 561	15 562
Zbiornik bezodpływowy	7 948					
Roczne koszty eksploatacji [zł/rok]						
z drenażem rozsączającym	340	–	–	–	–	–
z tunelami rozsączającymi	340	–	–	–	–	–
z pakietami rozsączającymi	340	–	–	–	–	–
hydrofitowa	–	103	103	103	103	103
ze złożem biologicznym	–	561	561	561	561	561
z komorą osadu czynnego	–	1 123	1 123	1 123	1 123	1 123
hybrydowa	–	809	809	809	809	809
Zbiornik bezodpływowy	1 920					



Tabela 10. cd.

Table 10. cont.

Wariant technologiczny oczyszczalni		Układ odprowadzający ścieki oczyszczone				
		drenaż rozsączający	tunele rozsączające	pakiety rozsączające	studnia chłonna	oczko wodne
Całkowity średnioroczny koszt oczyszczania ścieków [zł/rok]						
z drenażem rozsączającym	1 023	–	–	–	–	–
z tunelami rozsączającymi	1 188	–	–	–	–	–
z pakietami rozsączającymi	966	–	–	–	–	–
hydrofitowa	–	939	1 017	911	976	896
ze złożem biologicznym	–	1 599	1 677	1 571	1 636	1 556
z komorą osadu czynnego	–	2 176	2 255	2 149	2 214	2 134
hybrydowa	–	2 096	2 175	2 069	2 134	2 054
Zbiornik bezodpływowy	2 556					
Jednostkowy średnioroczny koszt oczyszczania ścieków [zł/m <sup>3</sup> /rok]						
z drenażem rozsączającym	11	–	–	–	–	–
z tunelami rozsączającymi	13	–	–	–	–	–
z pakietami rozsączającymi	11	–	–	–	–	–
hydrofitowa	–	10	11	10	11	10
ze złożem biologicznym	–	18	18	17	18	17
z komorą osadu czynnego	–	24	25	24	24	23
hybrydowa	–	23	24	23	23	23
Zbiornik bezodpływowy	28					

Źródło: opracowanie własne

Spośród analizowanych rozwiązań technologicznych oczyszczalni ścieków, najniższych nakładów inwestycyjnych wymaga oczyszczalnia z pakietami lub drenażem rozsączającym. Najtańszy sposób odprowadzania ścieków oczyszczonych stanowi oczko wodne, a najdroższy tunele rozsączające. Najniższymi kosztami eksploatacji charakteryzuje się

oczyszczalnia hydrofitowa, a najwyższymi zbiornik bezodpływowy, oczyszczalnia z komorą osadu czynnego i oczyszczalnia hybrydowa. Stosunkowo wysokie są także koszty eksploatacji oczyszczalni drenażowych i ze złożem biologicznym. Najniższym średniorocznym kosztem charakteryzuje się oczyszczalnia hydrofitowa z odprowadzaniem ścieków oczyszczonych do oczka wodnego, a najwyższym oczyszczalnia hybrydowa z odprowadzaniem ścieków oczyszczonych do gruntu za pomocą tuneli rozsączających. Wnioski z analizy przeprowadzonej przez innych autorów są podobne [8, 11, 18]. W pracy otrzymano jednak wyższe średnioroczne koszty oczyszczania ścieków we wszystkich oczyszczalniach, co wynika z uwzględniania, zwykle pomijanych składowych kosztów, takich jak zakup kruszywa, praca ludzi i sprzętu przy budowie oczyszczalni czy też koszt okresowych przeglądów przeprowadzanych przez wykwalifikowaną obsługę. Są to koszty bez których nie da się osiągnąć wymaganych efektów w zakresie jakości ścieków oczyszczonych odprowadzanych do odbiornika.

#### **4. Wnioski**

Z przeprowadzonej analizy efektywności kosztowej różnych rozwiązań technologicznych przydomowych oczyszczalni ścieków można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Całkowity średnioroczny koszt oczyszczania ścieków w obiektach przydomowych jest średnio niemal dwukrotnie niższy od kosztu ponoszonego w przypadku budowy i eksploatacji szczelnego zbiornika bezodpływowego, przy czym relacja ta w dużej mierze zależy od zróżnicowanych w skali kraju kosztów opróżniania zbiorników bezodpływowych.
2. Najwyższy udział w nakładach inwestycyjnych, ponoszonych na budowę przydomowych oczyszczalni ścieków stanowią materiały (średnio 83%) i koszty wynajęcia sprzętu (średnio 12%). W przypadku systemu odprowadzania ścieków oczyszczonych koszty te stanowią odpowiednio średnio 52% i 35%.
3. Spośród analizowanych rozwiązań technologicznych, najniższych nakładów inwestycyjnych wymaga oczyszczalnia drenażowa z pakietami lub drenażem rozsączającym. Najniższe koszty eksploatacji występują w przypadku oczyszczalni hydrofitowej. Najbardziej efektywnym pod względem ekonomicznym rozwiązaniem, charakteryzującym

się najniższym całkowitym średniorocznym kosztem oczyszczania ścieków, jest oczyszczalnia hydrofitowa z odprowadzeniem ścieków oczyszczonych do oczka wodnego. Wnioski z analizy mogą się różnić w przypadku przyjęcia innych zestawień materiałowych, w tym modeli oczyszczalni kontenerowych, a także stawek pracy ludzi i kosztów wynajęcia sprzętu.

## Literatura

1. **Boruszko D., Piotrowski P., Miłaszewski R.:** *Ocena ekonomicznej efektywności komunalnej oczyszczalni ścieków w gminie Sokoły*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 15, 1086–1097 (2013).
2. **Cooper P.F.:** *What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over the past 20 years*. Desalination, 246, 11–26 (2009).
3. **Dąbrowski W., Wiater J.:** *The Possibility of Dairy WWTP Load Decreasing by Using Separate Constructed Wetland for Effluents from Sludge Processing Treatment*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 15, 823–834 (2013).
4. **Environmental Protection Agency:** *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater. Manual*. EPA Report 625/R-99-010, Cincinnati, Ohio 2000.
5. **Główny Urząd Statystyczny:** *Infrastruktura Komunalna* (2014).
6. **Goleń M., Maśloch G., Warężak T., Ziółkowski T.:** *Ekonomia gospodarki ściekowej na wsi. Poradnik dla gminy oraz mieszkańców terenów niezurbanizowanych*. Oficyna Wydawnicza Szkoły Głównej Handlowej w Warszawie, Warszawa 2011.
7. **Grygorczuk-Petersons E.H.:** *Ocena funkcjonowania przyzgodowych oczyszczalni ścieków na terenie wybranej gminy Zielonych Płuc Polski*. Inżynieria Ekologiczna, 24, 32–37 (2011).
8. **Heidrich Z., Stańko G.:** *Leksykon przydomowych oczyszczalni ścieków*. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2007.
9. **Ignatowicz K., Puchlik M.:** *Złoża biologiczne jako alternatywa oczyszczania małych ilości ścieków*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 1385–1404 (2011).
10. **Józwiakowski K., Marzec M.:** *Problemy funkcjonowania przydomowych oczyszczalni ścieków z osadem czynnym – badania wstępne*. Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 2 (34), 163–171 2006.

11. **Kundzewicz A., Miłaszewski R.:** *Analiza efektywności kosztowej indywidualnych systemów usuwania i oczyszczania ścieków.* Inżynieria Ekologiczna, 24, 174–183 2011.
12. **Miłaszewski R.:** *Ekonomika ochrony wód powierzchniowych,* Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok 2003.
13. **Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi:** *Założenia do strategii zrównoważonego rozwoju wsi i rolnictwa.* Warszawa 2010.
14. **Kolecka K., Obarska-Pempkowiak H.:** *The quality of sewage sludge stabilized for a long time in reed basins.* Environment Protection Engineering, 34(3), 13–20 (2008).
15. **Krzanowski S., Wałęga A.:** *Effectiveness of organic substance removal in household conventional activated sludge and hybrid treatment plants,* Environment Protection Engineering, 34(3), 5–12 (2008).
16. **Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E.:** *Efficiency of Wastewater Treatment in Single-Family Constructed Wetlands in Kaszuby Lake District.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 15, 81–95 (2013).
17. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 lipca 2014 r. w sprawie sposobu wyznaczania obszaru i granic aglomeracji* (Dz. U. 2014 poz. 995).
18. **Skoczko I.:** *Economic analysis of options for sewage treatment plant.* Teka Kom. Ochr. Kszt. Środ. Przyr. – OL PAN, 7, 5–11 (2010).
19. **Skoczko I.:** *Ekonomiczna analiza rozwiązań oczyszczalni ścieków dla wsi przy rozproszonej zabudowie,* Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 6, 271–275 (2012).
20. **Tomczuk B., Dąbrowski W.:** *New applications of hydrophyte method in environmental protection:* W: Environment Alterations - research and protection methods (ed. J. Koc), 8, 171–184 (2011).
21. **Warężak T., Sadecka Z., Myszograj S., Suchowska-Kisielewicz M.:** *Skuteczność oczyszczania ścieków w oczyszczalni hydrofitowej typu VF-CW,* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 15, 1243–1259 (2013).
22. **Wiater J.:** *Ocena świadomości ekologicznej gminy Choroszcz,* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 653–680 (2011).
23. **Wojciechowska E.:** *Removal of persistent organic pollutants from landfill leachates treated in three constructed wetland systems,* Water Science and Technology, 68(5), 1164–1172 (2013).

## **Cost-effectiveness Analysis of Different Technological Variants of Single-house Sewage Treatment Plants**

### **Abstract**

The cost-effectiveness of a range of variants of single-house sewage treatment plants is analyzed in the article. They include plants with drainage pipe, with package drainage, with tunnel drainage, constructed wetlands, activated sludge chamber, biological filter and a hybrid plant. The analysis focuses on different ways of discharging treated wastewater, i.e. drainage pipe, package drainage, tunnel drainage, pond and soakaway. Selection of the most financially efficient system was made on the basis of the minimal rate of the average annual treatment cost. The total cost was compared with the construction costs as well as the operating costs of a holding tank.

The analysis shows that, on the average, the total average annual cost of single-house sewage treatment facilities is almost 2-times lower than the cost incurred on the construction and operations of a holding tank. This ratio, however, depends largely on different prices for emptying a tank. Materials (avg. 83%) and equipment rental (avg. 12%) constitute the greatest share of the investment costs incurred on the construction of sewage treatment plants.

Among the analyzed sewage treatment plant technologies the lowest investment outlays are required for drainage pipes and packages as well as constructed wetlands. The lowest treated sewage discharge costs are generated by ponds, whereas the highest by tunnel drainage. The lowest operation costs are generated by constructed wetlands, whereas the highest by holding tank, activated sludge chambers and hybrid plants. The most cost effective, characterized by the lowest average total annual cost, is constructed wetland with discharge by a pond. The greatest average annual cost of wastewater treatment is generated by hybrid plants with treated wastewater discharged into the ground by drainage tunnels.

The conclusions of analysis carried out by other authors are similar to those presented in this paper. However, the presented research shows that the average annual outlays for wastewater treatment for all plants are greater. This is because additional cost factors, such as the purchase of gravel, human costs, equipment expenditures or maintenance of periodic inspections carried out by qualified personnel, were taken into account. These are costs without which it is impossible to achieve the required quality of treated sewage.

### **Słowa kluczowe:**

efektywność kosztowa, przydomowe oczyszczalnie ścieków, warianty technologiczne

### **Keywords:**

cost effectiveness, single-house sewage treatment plants, technological variants