

OCENA NIEZAWODNOŚCI USUWANIA ZWIĄZKÓW BIOGENNYCH W OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW METODĄ WEIBULLA

Piotr Bugajski

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Celem pracy była ocena niezawodności usuwania związków azotu i fosforu z zastosowaniem metody niezawodności Weibulla w zbiorczej oczyszczalni ścieków w Mszanie Dolnej. Wielkość projektowana oczyszczalni wyrażona RLM wynosi 18000. Badania prowadzono w latach 2007–2011, w których pobrano i poddano analizie fizyczno-chemicznej 60 próbek ścieków surowych i oczyszczonych. Na podstawie badań stwierdzono, że stężenia azotu ogólnego w ściekach dopływających w 83,3% przypadków odpowiadały charakterystycznym wartościom w ściekach bytowych, z kolei stężenia fosforu ogólnego były tylko w 30% na poziomie wartości charakterystycznych. Za pomocą tej metody oceniano poziom niezawodności technologicznej oczyszczalni, który to wynika z metodycznej analizy uzyskanych wcześniej wyników badań. Analizowana oczyszczalnia pracuje z obniżoną niezawodnością, która dla azotu ogólnego wynosi 87,1%, a dla fosforu ogólnego 93,9%. Na skutek obniżonej skuteczności usuwania związków azotu oraz fosforu w badanym obiekcie w ściekach odprowadzanych do odbiornika pojawiają się stężenia wyższe od dopuszczalnych określonych w pozwoleniu wodno-prawnym. Według zaproponowanego w pracy dopuszczalnego poziomu niezawodności dla tej wielkości oczyszczalni opisanego przez Andrakę i Dzienisa [2003], w przedmiotowej oczyszczalni tylko stężenia azotu są wyższe od przyjętego poziomu niezawodności, a w odniesieniu do stężeń fosforu poziom niezawodności usuwania tego biogenu zawiera się w dopuszczalnej granicy. Celem zwiększenia skuteczności procesów nityfikacji i denityfikacji w bioreaktorze badanej oczyszczalni należy prowadzić ciągły monitoring (*online*) i okresowo dawkować dodatkowe źródło węgla organicznego (BZT₅) bezpośrednio do bioreaktora w celu zachowania odpowiednich proporcji związków organicznych wyrażonych jako BZT₅ w stosunku do związków azotu, tak aby prawidłowo zachodziły procesy nityfikacji i denityfikacji odpowiedzialne za neutralizację związków azotu.

Słowa kluczowe: ścieki, oczyszczalnia, niezawodność usuwania, metoda Weibulla

WSTĘP

Dynamiczny rozwój w ostatnich latach infrastruktury sanitarnej na terenach gmin wiejskich w Polsce niewątpliwie wpływa na poprawę stanu czystości wód [Błażejowski 2012, Józwiakowski i in. 2012]. W miejscowościach, w których do niedawna mieszkańcy korzystali z wybieralnych zbiorników bezodpływowych (szamba), powstają zbiorcze systemy kanalizacyjne z oczyszczalnią ścieków, a na terenach o rozproszonej zabudowie instalowane są przydomowe oczyszczalnie [Krzanowski i Wałęga 2007, Heidrich i Stańko 2008, GUS 2012]. Według aktualnych danych GUS [2012], w Polsce funkcjonuje ponad 110 000 przydomowych oczyszczalni, a docelowo szacuje się, że będzie ich ponad 600 000. W krajach Unii Europejskiej, w tym też w Polsce, przepisy dotyczące wymagań jakości ścieków oczyszczonych odprowadzanych z oczyszczalni są zróżnicowane w zależności od wielkości obiektu określonej na podstawie równoważnej liczby mieszkańców [Dz.U. Nr 137, poz. 984 z późn. zm].

Zbiorcze oczyszczalnie ścieków instalowane na terenach wiejskich są obiektami, w których wymagania odnośnie unieszkodliwiania związków biogenych nie są uwzględniane lub wymogi odnośnie tych związków są bardzo liberalne. W związku z tym technologia oczyszczania w tych oczyszczalniach jest niedostosowana do usuwania związków azotu i fosforu. Uwzględniając dużą liczbę powstających tego typu oczyszczalni w Polsce, należy mieć na względzie, iż nadmiar związków azotu i fosforu w odprowadzanych ściekach będzie skutkował zwiększonymi procesami eutrofizacji wód, zwłaszcza stojących. Aby uniknąć tego zagrożenia, należy opracować wytyczne odnośnie całego kraju lub regionów szczególnie narażonych na zanieczyszczenia wód dotyczące doboru takiej technologii oczyszczania, która pozwoli na jak największe usuwanie zanieczyszczeń eutroficznych. W tego rodzaju działaniach należy oczywiście uwzględnić specyficzne warunki dla terenów wiejskich w Polsce, tj. stężenie zanieczyszczeń w ściekach, ilość powstających ścieków, a także warunki klimatyczne [Bojanowska i Pepliński 2002, Bugajski 2013].

CEL, ZAKRES ORAZ METODYKA BADAŃ

Celem pracy była ocena niezawodności usuwania związków azotu i fosforu z zastosowaniem metody Weibulla w zbiorczej oczyszczalni ścieków.

Badania prowadzono w latach 2007–2011 w zbiorczej oczyszczalni ścieków w Mszanie Dolnej. W okresie badań pobrano i poddano analizie fizyczno-chemicznej 60 próbek ścieków surowych i oczyszczonych zgodnie z metodami referencyjnymi określonymi w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2006 roku [Dz.U. Nr 137, poz. 984 z późn. zm.]. Ocenę efektywności usuwania zanieczyszczeń w przedmiotowej oczyszczalni określono z wykorzystaniem elementów teorii niezawodności Weibulla, która, jak wykazały wcześniejsze badania, jest przydatną metodą do oceny funkcjonowania oczyszczalni ścieków [Bugajski i in. 2012]. Rozkład Weibulla charakteryzuje się funkcją gęstości prawdopodobieństwa (1) z parametrami b , c i θ :

$$f(x) = \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{x - \theta}{b} \right)^{(c-1)} \cdot e^{-\left(\frac{x - \theta}{b} \right)^c} \quad (1)$$

gdzie:

x – zmienna określająca stężenie danego wskaźnika zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych,

b – parametr skali,

c – parametr kształtu,

θ – parametr położenia.

Przy założeniach: $\theta < x$, $b > 0$, $c > 0$.

Estymację parametrów rozkładu Weibulla wykonano metodą największej wiarygodności. Jakość dopasowania rozkładu Weibulla do danych empirycznych przeprowadzono testem Hollandera-Proschana [Bugajski i in. 2012]. Analizę wyników badań wykonano z użyciem programu STATISTICA 8.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

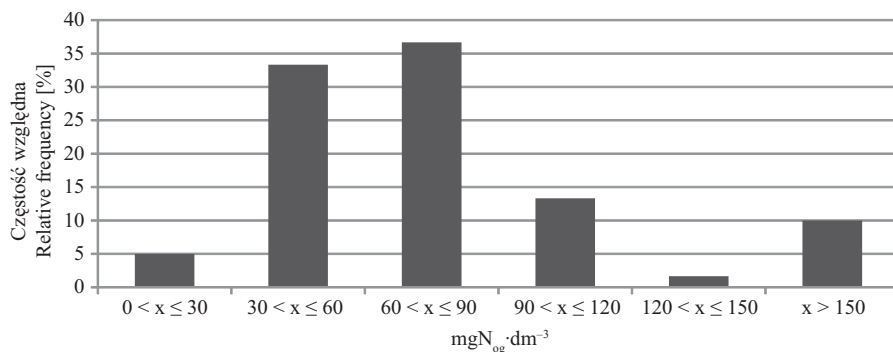
Analizowana oczyszczalnia ścieków w Mszanie Dolnej oddana do użytku w 2004 roku została zaprojektowana dla RLM = 18 000 M. Do obiektu dopływają ścieki systemem kanalizacji rozdzielczej z gospodarstw domowych z obszaru miasta oraz dowożone są ścieki taborem asenizacyjnym z obszarów nieskanalizowanych z terenu gminy. Projektowany średni dobowy dopływ ścieków wynosi $Q_{\text{dśr.}} = 3600 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, a dopływ maksymalny wynosi $Q_{\text{dmax.}} = 4680 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. W okresie 5-letnich badań średni dopływ ścieków był na poziomie 57% zakładanego dopływu, zatem możliwe jest przyjęcie większej ilości ścieków niż obecnie. Aktualnie przy niedociążeniu hydraulicznym obiektu zwiększony jest koszt jednostkowy oczyszczania ścieków. Oczyszczalnia ścieków funkcjonuje na podstawie pozwolenia wodno-prawnego OŚ-622/3/6/0 wydanego przez Starostwo Powiatowe w Limanowej w dniu 8 kwietnia 2004 roku. Pozwolenie ma ważność do 31 grudnia 2018 roku. Odbiornikiem ścieków oczyszczonych jest rzeka Mszanka – prawobrzeżny dopływ rzeki Raby. W pozwoleniu wodno-prawnym zostały określone dopuszczalne (maksymalne) stężenia badanych wskaźników, czyli azotu ogólnego i fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych, które wynoszą:

- azot ogólny – $15 \text{ mgN}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$,
- fosfor ogólny – $2 \text{ mgP}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Ciąg technologiczny przedmiotowej oczyszczalni składa się z dwóch etapów oczyszczania ścieków oraz urządzeń do unieszkodliwiania osadów ściekowych. Etap pierwszy to oczyszczanie mechaniczne ścieków poprzez zastosowanie kraty gęstej – schodkowej z automatycznym usuwaniem skratek oraz piaskownika pionowego – wirowego. Z kolei etap drugi to oczyszczanie biologiczne w czterech bioreaktorach sekwencyjnych typu SBR, w których zachodzą procesy nityfikacji i denityfikacji oraz proces oddzielania osadów od oczyszczonych ścieków. Przy aktualnym niskim obciążeniu hydraulicznym użytkowane są tylko 2 bioreaktory, a w razie zwiększonego dopływu możliwe jest uruchomienie dwóch kolejnych. W skład ciągu technologicznego unieszkodliwiającego osady ściekowe wchodzi dwa zbiorniki do tlenowej stabilizacji osadu oraz prasy filtracyjne, których zadaniem jest zmniejszenie uwodnienia osadów, tak aby zminimalizować ich objętość.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W ściekach dopływających do oczyszczalni stężenia azotu ogólnego w większości przypadków plasowały się na poziomie przeciętnych wartości podawanych w literaturze, czyli można je zakwalifikować do ścieków charakterystycznych odprowadzanych z gospodarstw domowych [Heidrich i in. 2008, Bugajski i Bergel 2008, Heidrich i Kozak 2009]. Jak wynika z wykresu przedstawionego na rysunku 1, w 83,3% przypadków stężenia azotu ogólnego zawierały się w przedziale odpowiadającym ściekom charakterystycznym odprowadzanym z gospodarstw domowych, czyli w granicach od 30 do 120 $\text{mgN}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$. W 5% przypadków stężenia azotu ogólnego były bardzo niskie, a w 11,7% przypadków były bardzo wysokie. Niskie stężenia azotu ogólnego w ściekach surowych mogą wynikać z okresowego dopływu wód obcych (infiltracyjnych i przypadkowych), w których ładunek azotu jest bardzo mały, z kolei ponadprzeciętnie wysokie wartości azotu w ściekach surowych były prawdopodobnie wynikiem dopływu do kanalizacji ścieków przemysłowych [Kaczor 2012, Bugajski i Satora 2011].

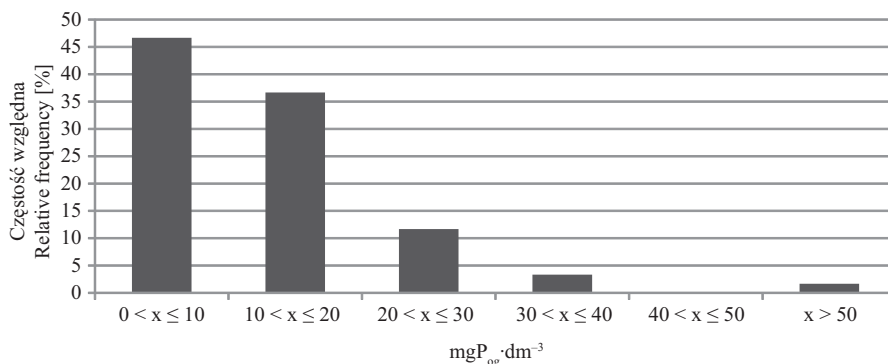


Rys. 1. Histogram rozkładu stężenia azotu ogólnego w ściekach dopływających do oczyszczalni

Fig. 1. Histogram of the total nitrogen concentration distribution in sewage flowing into the treatment plant

W odniesieniu do wielkości stężenia fosforu ogólnego stwierdzono małe wartości tego wskaźnika w ściekach surowych. W badanym okresie w blisko 1/3 badanych próbek ścieków stwierdzono stężenia charakterystyczne dla ścieków bytowych pochodzących z gospodarstw domowych, czyli zawierały się w przedziale od 10 do 20 $\text{mgP}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$ (36,7% przypadków). Znaczna ilość analiz (46,7% przypadków) wykazała, iż wartości stężeń fosforu ogólnego są poniżej 10 $\text{mgP}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$. Zdarzyły się również sporadycznie bardzo wysokie stężenia fosforu ogólnego, powyżej 50 $\text{mgP}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$ (1,7% przypadków). Stężenia fosforu ogólnego w ściekach dopływających do badanego obiektu przedstawiono na rysunku 2.

W dalszej analizie dla oszacowanych parametrów rozkładu dokonano weryfikacji hipotezy o przyjęciu rozkładu Weibulla do aproksymacji danych empirycznych. Wyniki dopasowania rozkładu testem Hollandera-Proschana wraz z estymowanymi parametrami przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Histogram rozkładu stężenia fosforu ogólnego w ściekach dopływających do oczyszczalni

Fig. 2. Histogram of the total phosphorus concentration distribution in sewage flowing into the treatment plant

Tabela 1. Wyniki estymacji parametrów rozkładu Weibulla wraz z miarami dobroci dopasowania do danych empirycznych

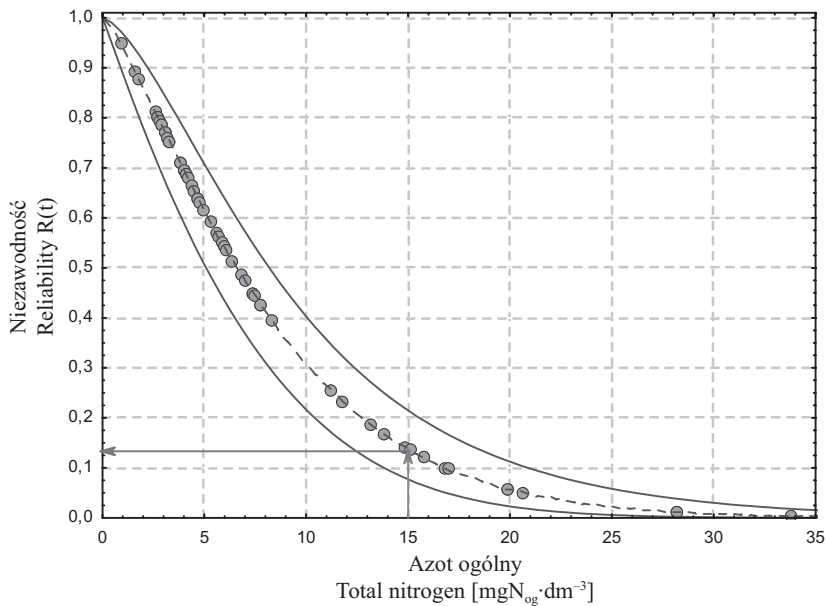
Table 1. Results of the estimation of the Weibull distribution parameters together with the measures of goodness of fit to empirical data

Wskaźnik Index	Parametry rozkładu Distribution parameters			Test Hollandera-Proschana	
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>θ</i>	Wartość testu Test value	<i>p</i> *
Azot ogólny Total nitrogen	8,793	1,284	0,728	0,589	0,555
Fosfor ogólny Total phosphorus	1,013	1,507	0,149	0,252	0,800

*Prawdopodobieństwo testowe; jeśli $p \leq 0,05$ należy odrzucić hipotezę zerową, że dane empiryczne można opisać rozkładem Weibulla.

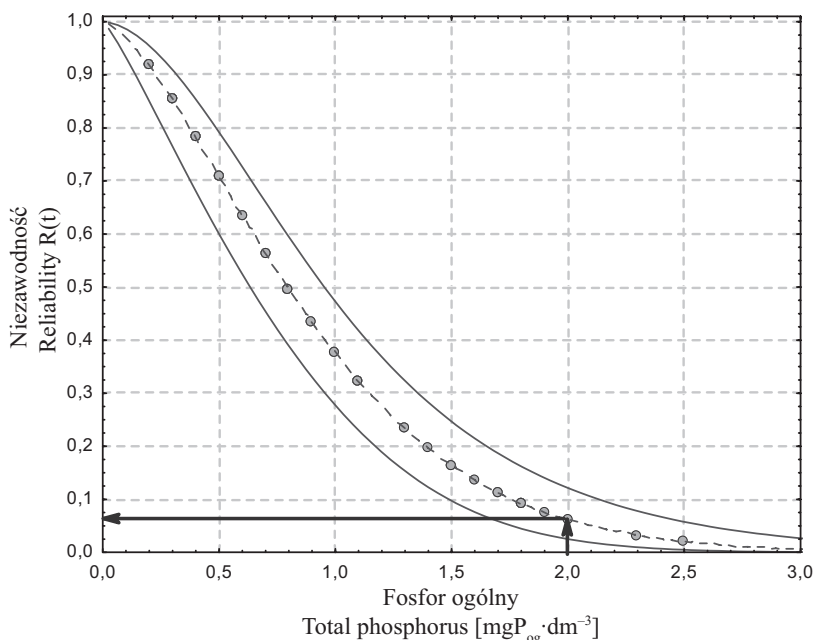
*Probability test; if $p \leq 0,05$ should be reject the null hypothesis that the empirical data can be described by Weibull distribution.

Wyniki analizy niezawodnościowej opartej o metodę Weibulla dotyczącą azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych przedstawiono na rysunku 3, a fosforu ogólnego na rysunku 4. Na podstawie dystrybucyj (rys. 3) stwierdza się, że w 13% pobranych próbkach ścieków oczyszczonych było przekroczone dopuszczalne stężenie azotu ogólnego, które wynosi $15 \text{ mgN}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$. Zatem w ściekach odprowadzanych do odbiornika z analizowanej oczyszczalni w około 47 dobach w rocznym okresie znajdują się ponad dopuszczalne wartości stężeń azotu ogólnego. W przypadku stężeń fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych wartość dopuszczalna $2 \text{ mgP}_{\text{og}} \cdot \text{dm}^{-3}$ została przekroczone w 6% przypadków, co obrazuje dystrybucja na rysunku 4. Zatem w rocznym okresie w około 22 dobach przekroczone są dopuszczalne wartości stężeń fosforu ogólnego. Przyjmując wytyczne zaproponowane przez Andrakę i Dzenisa [2003], według których tej wielkości oczyszczalnia powinna pracować z niezawodnością co najmniej 92,3% przy ryzyku producenta na poziomie $\alpha = 0,05$, dopuszcza się wadliwą



Rys. 3. Wyniki analizy niezawodnościowej Weibulla dla stężeń azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych

Fig. 3. Results of the Weibull reliability analysis for the total nitrogen concentrations in treated sewage



Rys. 4. Wyniki analizy niezawodnościowej Weibulla dla stężeń fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych

Fig. 4. Results of the Weibull reliability analysis for the total phosphorus concentrations in treated sewage

pracę oczyszczalni o RLM od 15 000 do 49 999 przez 27 dni w roku. W przypadku przedmiotowej oczyszczalni zmniejszona jest niezawodność usuwania azotu ogólnego w 20 dobach, a wartości stężeń fosforu ogólnego są na poziomie spełniającym wymagania dotyczące niezawodności.

WNIOSKI

Metoda, którą zaproponowano do oceny niezawodności funkcjonowania zbiorczej oczyszczalni ścieków w Mszanie Dolnej, została oparta o rozkład Weibulla i jak wykazały wcześniejsze analizy w odniesieniu do innych tego typu obiektów umożliwia ocenę ryzyka przekroczenia dopuszczalnych wartości wskaźników zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych [Bugajski i in. 2012]. Na podstawie tej metody możliwe jest również określenie czasu pracy oczyszczalni z obniżoną efektywnością usuwania zanieczyszczeń, co może być przydatne w podjęciu decyzji dotyczącej np. modernizacji ciągu technologicznego lub tylko regulacji procesów oczyszczania zachodzących w bioreaktorze.

Na podstawie przeprowadzonej analizy niezawodnościowej dla zbiorczej oczyszczalni w Mszanie Dolnej można sformułować następujące wnioski i stwierdzenia:

1. Oczyszczalnia ścieków charakteryzuje się okresowo obniżoną efektywnością usuwania zanieczyszczeń eutroficznych w odniesieniu do wartości granicznych. W odniesieniu do stężenia azotu ogólnego obniżona efektywność pracy wystąpiła w 13% czasu, a stężenia fosforu ogólnego były przekroczone w 6% czasu w analizowanym okresie 5 lat.

2. Ocena niezawodności pracy oczyszczalni oparta o model Weibulla w odniesieniu do wskaźników biogenych wykazała, że w przypadku skuteczności zmniejszenia stężenia azotu ogólnego obiekt ten spełniałby wymogi przez 318 dni, a w przypadku fosforu ogólnego przez 343 dni średnio w każdym roku.

3. Niezawodność działania według wskazanych wytycznych jest zadowalająca w odniesieniu do stężeń fosforu ogólnego, z kolei stężenia azotu ogólnego są wyższe od dopuszczalnych w 27 dobach w odniesieniu do rocznego okresu.

4. Na podstawie analiz fizyczno-chemicznych stwierdzono, że w ściekach dopływających stężenia azotu ogólnego w 83,3%, a stężenia fosforu ogólnego w 36,7% przypadków były na poziomie wartości stężeń charakterystycznym dla ścieków pochodzących z gospodarstw domowych.

5. Aby zwiększyć skuteczność usuwania związków azotu należy w okresie, gdy niezachowana jest odpowiednia proporcja związków organicznych (BZT₅) do azotu okresowo dawkować dodatkowe źródło węgla organicznego do bioreaktora, tak aby wspomagać działanie mikroorganizmów biorących udział w procesie nityfikacji i denityfikacji.

LITERATURA

Andraka D., Dzienis L., 2003. Wymagany poziom niezawodności oczyszczalni ścieków w świetle przepisów polskich i europejskich. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Seria Inżynieria Środowiska, z. 16, Białystok, 24–28.

- Błażejowski R., 2012. Kanalizacja terenów nieurbanizowanych. *Wodociągi i Kanalizacja* 1(95), 34–37.
- Bojanowska I., Pepliński M., 2002. Optymalizacja pracy oczyszczalni ścieków w Tczewie w zakresie usuwania biogenów i związków węgla. *Ochrona Środowiska* 3, 31–36.
- Bugajski P., Bergel T., 2008. Wielkości wybranych stężeń zanieczyszczeń w ściekach bytowych odpływających z terenów wiejskich. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 9, 28–29.
- Bugajski P., Satora S., 2011. Wpływ zanieczyszczeń odprowadzanych z ubożni trzody chlewnej oraz masarni na jakość ścieków dopływających do oczyszczalni. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiecetus* 10(2), 3–10.
- Bugajski P., Wałęga A., Kaczor G., 2012. Zastosowanie metody Weibulla do analizy niezawodności działania przydomowej oczyszczalni ścieków. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2, 56–58.
- Główny Urząd Statystyczny – Ochrona Środowiska, Warszawa 2013.
- Heidrich Z., Kalenik M., Podedworna J., Stańko G., 2008. *Sanitacja Wsi*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o. o., Warszawa.
- Heidrich Z., Kozak T., 2009. Jednostkowe ładunki zanieczyszczeń charakteryzujące ścieki miejskie. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 12, 20–22.
- Heidrich Z., Stańko G., 2008. Kierunki rozwiązań oczyszczalni ścieków dla wiejskich jednostek osadniczych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 5, 169–177.
- Jóźwiakowski K., Pytka A., Marzec M., Gizińska M., Dąbek J., Głaz B., Sławińska A., 2012. Rozwój infrastruktury wodno-ściekowej w województwie lubelskim w latach 2000–2011. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3(1), 73–86.
- Kaczor G., 2012. Wpływ wód infiltracyjnych i przypadkowych na funkcjonowanie małych systemów kanalizacyjnych. *Z. 375*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków.
- Krzanowski S., Wałęga A., 2007. New technologies of small domestic sewage volume treatment applied in Poland. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3, 69–78.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 roku w sprawie warunków jakim powinny odpowiadać ścieki wprowadzane do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [Dz.U. Nr 137, poz. 984, z późn. zm.]

ASSESSMENT OF NUTRIENT REMOVAL RELIABILITY IN A SEWAGE TREATMENT PLANT USING THE WEIBULL METHOD

Summary. The aim of this study was to assess the reliability of removal of nutrients, such as total nitrogen and total phosphorus, using the Weibull reliability method. The studies, conducted during the 5 year period from 2007 to 2011, concerned the collective sewage treatment plant in Mszana Dolna in the Lesser Poland voivodeship. The designed size of the treatment plant, expressed in PE is 18000 residents. In addition to sewage flowing into the treatment plant through the sewer system from the city, sewage is also transported from septic tanks from the commune areas not-covered with the sewerage system. Sixty samples of raw and treated sewage samples were collected and subjected to physico-chemical analysis within the study period. Based on the results it was found that in 83.3% cases the concentration of total nitrogen in inflowing sewage corresponded to the typical values for domestic sewage, while the concentrations of total phosphorus were at the level of the characteristic values only in 30%. The technological reliability of the treatment plant, which stems from

the methodological analysis of previously obtained results concerning treated sewage, was evaluated using the Weibull reliability method. Based on this method it was found that the analyzed treatment plant works with reduced operating reliability in the selected periods, which for total nitrogen is 87.1%, while for total phosphorus it is 93.9%. As a result of the decreased removal efficiency of nitrogen and phosphorus compounds in the analyzed facility, the concentrations of those indicators in sewage discharged into the receiver are higher than the limits specified in the water license. According to the acceptable level of reliability for this size of the treatment plant, proposed in this paper, i.e. 92.3%, only the nitrogen concentrations are greater than the accepted level of reliability in the subject treatment plant, while in the case of phosphorus concentrations, the level of removal reliability for this nutrient falls within the permissible risk limit. The assessment of the treatment plant operation reliability, based on the Weibull model with respect to the nutrients, showed that in the case of the total nitrogen removal effectiveness, this facility would meet the requirements for 318 days, while in the case of total phosphorus – on average for 343 days in each of the study year. A continuous monitoring (*online*) should be carried out in order to increase the effectiveness of nitrification and denitrification in the bioreactor of the analyzed sewage treatment plant. Moreover, additional organic carbon source (BOD_5) should be periodically dosed directly to the bioreactor, so as to maintain the correct proportions of organic compounds, expressed as BOD_5 in relation to nitrogen compounds, in order for the nitrification and denitrification processes, which are responsible for nitrogen compound neutralization, occur properly.

Key words: sewage, sewage treatment plant, removal reliability, Weibull method