

SKUTECZNOŚĆ OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW W SYSTEMACH HYDROFITOWYCH NA PRZYKŁADZIE ZŁÓŻ TRZCINOWYCH Z PRZEPLYWEM POZIOMYM

Agnieszka Karczmarczyk, Józef Mosiej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Wśród funkcjonujących w Polsce hydrofitowych systemów oczyszczania ścieków dominują złoża gruntowo-trzcinowe z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków. Przeważają wśród nich oczyszczalnie wykorzystujące technologię Kickutha, gdzie do wypełnienia złoża stosuje się odpowiednio przygotowany grunt gliniasty. Przedstawiono wyniki wieloletnich obserwacji skuteczności oczyszczania ścieków w dwóch złożach gruntowo-trzcinowych. Zaobserwowano spadek skuteczności usuwania w nich substancji organicznej ze ścieków w miarę czasu eksploatacji obiektu. Wskazano na istotną rolę rodzaju i właściwości filtracyjnych materiału wypełniającego złożę w przebiegu skuteczności oczyszczania ścieków w czasie.

Słowa kluczowe: BZT₅, materiał filtracyjny, ścieki bytowe, złoża gruntowo-roślinne

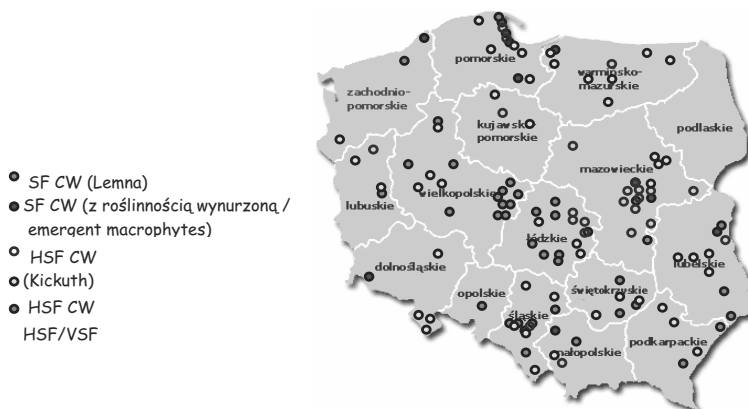
WSTĘP

Systemy hydrofitowe mogą być skuteczną metodą usuwania ze ścieków substancji organicznej i zawiesin. Prosta konstrukcja oraz niższe w porównaniu z konwencjonalnymi systemami koszty budowy i eksploatacji spowodowały ich szerokie zastosowanie w oczyszczaniu ścieków na terenach niezurbanizowanych. Pierwsze tego typu obiekty powstały w Polsce w latach osiemdziesiątych. W Europie systemy te zaczęto stosować w latach sześćdziesiątych, głównie do oczyszczania ścieków bytowych, jednak obecnie znajdują one zastosowanie w oczyszczaniu ścieków przemysłowych, spływów z terenów użytkowanych rolniczo czy odcieków ze składowisk odpadów komunalnych [Vymazal 2005]. Oczyszczalnie hydrofitowe, według kryterium przypiływu ścieków, można podzielić na systemy z przepływem powierzchniowym SF – stawy i rowy z roślinnością makrofitową) lub z przepływem podpowierzchniowym poziomym (HSF) i pionowym (VSF – złoża gruntowo-roślinne). Systemy z powierzchniowym przepływem ścieków charakteryzują się niskimi kosztami budowy i prostą eksploatacją. Jed-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Agnieszka Karczmarczyk, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Kształtowania Środowiska, Zakład Kształtowania Środowiska i Melioracji, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa,
e-mail: agnieszka_karczmarczyk@sggw.pl

nak ze względu na znaczne obniżenie efektywności oczyszczania ścieków w okresie niskiej temperatury ich przydatność w klimacie umiarkowanym jest przedmiotem dyskusji [Ozimek i Renman 1995, Wittgren i Tobiasson 1995, Sundblad 1998, Skillicorn 2002]. W Polsce funkcjonuje ponad 50 systemów hydrofitowych z przepływem powierzchniowym (o przepływie ponad $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), z czego zdecydowaną większość stanowią stawy z rzęsą wodną (*Lemna*). Służą one jako II stopień oczyszczania ścieków bytowych w ilości od kilkudziesięciu do $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. W kilkunastu systemach (stawy i rowy porośnięte makrofitami wynurzonymi) oczyszczane są głównie ścieki przemysłowe (III stopień oczyszczania). Kilka obiektów służy również do oczyszczania wód powierzchniowych.

Systemy hydrofitowe z podpowierzchniowym przepływem ścieków znalazły zastosowanie w oczyszczaniu ścieków bytowych, ścieków z zakładów przetwórstwa rolno-spożywczego oraz odcieków ze składowisk odpadów [Biernacka i Obarska-Pempkowiak 1996, Kowalik i Obarska-Pempkowiak 1997]. Spośród krajów europejskich największa liczba tego typu oczyszczalni została wybudowana w Niemczech – ponad 50 000 obiektów, w Austrii – około 1000, w Wielkiej Brytanii – 800, we Włoszech – 300, w Danii – 200, w Czechach – 160 i w Portugalii – 120 [Vymazal 2005]. W Ameryce Północnej liczbę takich oczyszczalni oszacowano na 8000 [Kadlec 2003]. W Polsce funkcjonuje ponad 70 złóż gruntowo-roślinnych (głównie z trzcina *phragmites*), oczyszczających ścieki w ilości powyżej $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, oraz około 6–7 tys. oczyszczalni o przepustowości poniżej $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, których rzeczywista liczba jest trudna do oszacowania ze względu na brak ewidencji takich obiektów. Lokalizacje systemów hydrofitowych z powierzchniowym przepływem ścieków (powyżej $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) w Polsce przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie hydrofitowych systemów oczyszczania ścieków w Polsce (opr. własne)
Fig. 1. Location of different types of constructed wetlands in Poland (by author)

Efektywność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków bytowych w różnych typach systemów oczyszczania z udziałem roślin zestawiono w tabeli 1. Duże rozbieżności między uzyskiwanymi parametrami usuwania zanieczyszczeń w obrębie jednego rodzaju systemu wynikają z różnic w obciążeniu obiektów ładunkiem zanieczyszczeń, obciążeniu hydraulicznym, czasem zatrzymania ścieków, a w przypadku usuwania fosforu – z rodzajem materiału filtracyjnego zastosowanego w wypełnieniu złoża oraz – co jest pośrednio z tym związane – z możliwością kontaktu ścieków z materiałem filtracyjnym.

Ponad 60% hydrofitowych oczyszczalni ścieków w Polsce stanowią złoża, w których ścieki oczyszczane są podczas ich przepływu przez porowaty materiał poprzerastany ko-

Tabela 1. Efektywność oczyszczania ścieków bytowych w różnych typach systemów eksploatowanych w warunkach krajowych (w % redukcji wskaźnika)

Table 1. Efficiency of domestic wastewater treatment in different types of constructed wetlands operated in Poland (reduction of index in %)

Wskaźnik Index	Złoża gruntowo-roślinne Vegetated submerged beds		Oczyszczalnie wodno-roślinne Surface flow wetlands	
	HSF	VSF	FWS	LEMNA
	L / Z	L	L	L / Z
BZT ₅	79–98 / 19–98 (90) / (71)	89–95	89–95 (92)	91–96 / 91–92 (94) / (92)
N _{og}	25–97 / 9–74 (50) / (44)	15–76 (44)	27–90 (48)	34–89 / 52–93 (62) / (73)
N-NH ₄	14–93 / 43–91 (58) / (60)		9–95 (45)	35–91 / 47–96 (63) / (72)
P _{og}	30–96 / 1–97 (57) / (54)	15–95 (47)	3–86 (32)	30–41 / 61–73 (36) / (67)

Objaśnienia – Explanation:

HSF – złoża z poziomym przepływem ścieków – horizontal subsurface flow constructed wetlands.

VSF – złoża z pionowym przepływem ścieków – vertical subsurface flow constructed wetlands.

FWS – systemy z powierzchniowym przepływem ścieków z roślinnością wynurzoną – free water surface constructed wetlands with emergent macrophytes).

LEMNA – stawy z rzęsą wodną – free water surface constructed wetlands with lemna.

L – okres letni – summer period.

Z – okres zimowy – winter period).

() – wartość średnia – mean value.

Zestawienie na podstawie – based on: Kalisz i Sałbut [1996], Biernacka i Obarska-Pempkowiak [1996], Grygorczuk-Petersons [1997], Czyżyk i Soroko [1997], Kowalik i Obarska-Pempkowiak [1997], Mierzejewski [1999], Soroko [1999].

rzeniami roślin makrofitowych. Około 30 obiektów to oczyszczalnie wykorzystujące technologię Kickutha, w której do wypełnienia złoża stosuje się odpowiednio przygotowany, zwykle drobnoziarnisty grunt miejscowy (zazwyczaj piasek gliniasty). Sposób przygotowania i skład wypełnienia złoża jest chroniony patentem. W pozostałych obiektach do wypełnienia złoża stosuje się materiał gruboziarnisty (żwir) lub piasek. Stosowanie materiałów gruboziarnistych zwykle gwarantuje odpowiednie warunki przepływu ścieków przez złożo, jednak efektywność tych obiektów w okresie pierwszych lat eksploatacji jest niezadowolająca. W złożach wypełnianych materiałem o mniejszych średnicach ziaren może występować problem z przepływem ścieków. Oczyszczanie ścieków w systemach hydrofitowych odbywa się na drodze fizycznej filtracji, sorpcji oraz rozkładu mikrobiologicznego. Charakterystykę procesów biorących udział w usuwaniu zanieczyszczeń w tych systemach szeroko omówili autorzy Reed... [1996] oraz Vymazal i inni [1998]. W takich systemach w znacznym stopniu substancja organiczna ulega rozkładowi, zatrzymywane są zawiesiny, związki azotu, fosforu, metale ciężkie i patogeny. Zasadniczą rolę w procesie oczyszczania ścieków w systemach hydrofitowych odgrywają mikroorganizmy. Dzięki działalności bakterii w ściekach następuje redukcja azotu i związków organicznych wyrażonych wskaźnikiem BZT₅. Na przebieg procesów oczyszczania ma wpływ temperatura, pH, warunki hydrauliczne i zawartość tlenu w porach gruntu.

Ze względu na fakt, iż eksploatację większości funkcjonujących w Polsce złóż gruntowo-roślinnych rozpoczęto w połowie lat dziewięćdziesiątych można obecnie podjąć próbę oceny ich funkcjonowania wraz z analizą zmian ich efektywności w czasie. Może to być podstawą do oszacowania ich trwałości.

Celem pracy jest ocena skuteczności oczyszczania ścieków w systemach hydrofitowych z podpowierzchniowym poziomym przepływem z uwzględnieniem wpływu czasu eksploatacji i obciążenia hydraulicznego na jakość ścieków odprowadzanych do odbiornika. W pracy przedstawiono wyniki wieloletnich obserwacji dwóch hydrofitowych oczyszczalni ścieków bytowych wykorzystujących technologię Kickutha.

MATERIAŁ I METODY

Oczyszczalnia w Bolimowie została wybudowana w 1994 roku, a pierwsze ścieki przyjęła w lutym 1995 roku, natomiast oczyszczalnia w Sadowej została włączona do eksploatacji w grudniu 1998 roku. Są to oczyszczalnie gruntowo-roślinne. Składają się z części mechanicznej oraz biologicznej, w której skład wchodzi następujące urządzenia: poletka filtracyjne porośnięte trzcina z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków, rów odfosforyzowujący oraz staw doczyszczający. Odbiornikiem oczyszczonych ścieków z oczyszczalni w Bolimowie jest rzeka Rawka, tworząca wraz z rozgałęzieniami, starorzeczami i kilkoma dopływami Rezerwat Rzeki Rawki w Bolimowskim Parku Krajobrazowym. Oczyszczone ścieki z oczyszczalni w Sadowej są odprowadzane do Wilczego Jaru, przepływającego przez Kampinoski Park Narodowy.

Ścieki dostarczane do oczyszczalni w Bolimowie są to ścieki bytowe, pochodzące z osady Bolimów i terenu gminy (od około 4000 RM). Początkowo większość ścieków była dowożona do oczyszczalni za pomocą taboru asenizacyjnego. Charakterystyczną cechą ścieków gromadzonych w zbiornikach bezodpływowych jest wysokie stężenie zanieczyszczeń, w związku z czym wymagały one rozcieńczenia. W końcu 2002 roku skanalizowana była jedynie osada Bolimów, a z pozostałych 19 sołectw ścieki nadal dowożono taborami asenizacyjnymi. Ze względu na brak urządzeń pomiarowych ilość ścieków dopływających do oczyszczalni może być jedynie oszacowana na podstawie pomiaru ilości ścieków odprowadzanych i bilansu wody na kwaterach. W okresie od grudnia 2000 roku do maja 2002 roku szacunkowa dobowa objętość ścieków dostarczanych do oczyszczalni wahała się od 11,2 do 63,5 m³·d⁻¹ [Jakimowicz 2002].

Eksploatację hydrofitowego systemu oczyszczania ścieków w Sadowej, obsługującego 150 osób, rozpoczęto w grudniu 1998 roku. Maksymalna projektowana przepustowość systemu to 30 m³·d⁻¹, natomiast w 2004 roku średnia ilość oczyszczanych ścieków wynosiła 13,7 m³·d⁻¹.

Ocenę efektywności usuwania zanieczyszczeń w złożach trzcinowych w Bolimowie i Sadowej przeprowadzono na podstawie danych udostępnionych przez administratorów obiektów (okres pierwszych lat eksploatacji) oraz na podstawie badań własnych prowadzonych w Bolimowie od 1999 do 2004 roku, a w Sadowej od 2004 do lipca 2006 roku. W tym okresie kontrolowano zawartość substancji organicznej wyrażonej wskaźnikiem BZT₅ w ściekach dopływających i odpływających ze złoż. Biochemiczne zapotrzebowanie tlenu (BZT₅) oznaczono metodą respirometryczną przy użyciu zestawu OxiTop firmy WTW, inkubowanego przez 5 dni w szafie termostatowej w temperaturze 20°C. Średnią w roku skuteczność złoża gruntowo-trzcinowego w usuwaniu zanieczyszczeń, wyrażonych wskaźnikiem BZT₅, obliczono ze wzoru:

$$\eta = \frac{\overline{C_{wl}} - \overline{C_{wyl}}}{\overline{C_{wl}}} \quad (1)$$

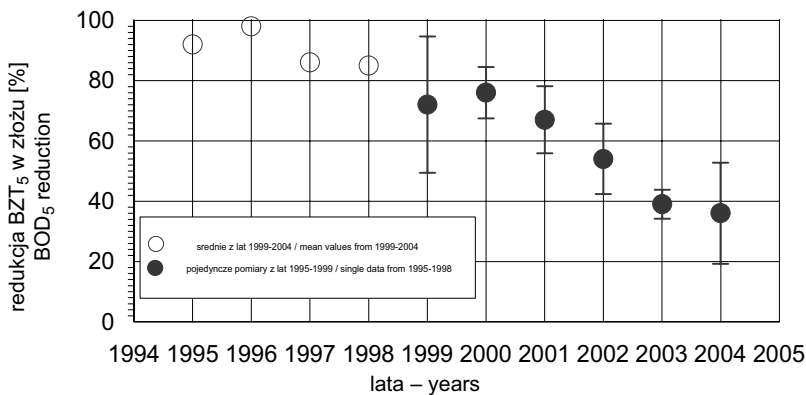
gdzie $\overline{C_{wl}} - \overline{C_{wyl}}$ to średnie roczne wartości BZT₅ w ściekach odpowiednio dopływających i odpływających ze złoża. Obliczone wartości wyrażono w procentach. Funkcję trendu rocznego redukcji BZT₅ ze ścieków przepływających przez złożo oszacowano metodą regresji liniowej.

WYNIKI

Po dwóch miesiącach od rozpoczęcia eksploatacji gruntowo-trzcinowej oczyszczalni ścieków w Bolimowie efekt usuwania zanieczyszczeń organicznych w złożu gruntowo-trzcinowym był wysoki i przekraczał 90%. W całym okresie badań BZT₅ ścieków odpływających ze złoża było niższe od BZT₅ ścieków dopływających, co świadczy o skuteczności złoża gruntowo-trzcinowego w usuwaniu biodegradowalnej substancji organicznej. Na podstawie średnich rocznych współczynników redukcji wskaźnika BZT₅, można jednak zaobserwować tendencję do obniżania skuteczności pracy złoża w czasie eksploatacji (rys. 2).

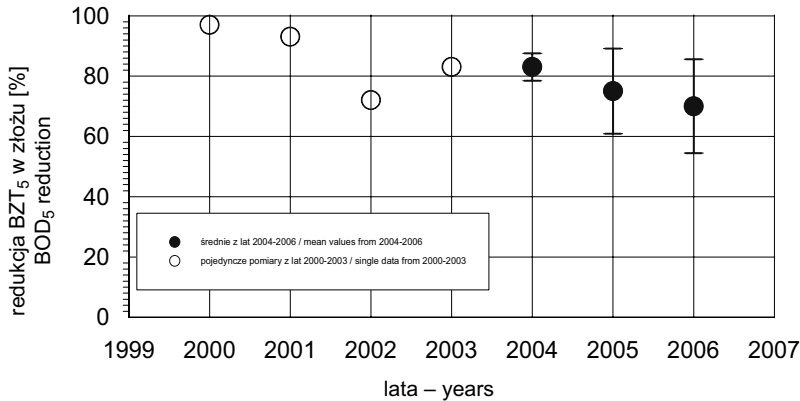
W drugim i trzecim roku eksploatacji oczyszczalni w Sadowej (lata 2000–2001) skuteczność usuwania substancji organicznej ze ścieków w złożu wynosiła odpowiednio 95 i 72% (rys. 3). W 2003 i 2004 roku skuteczność usuwania substancji organicznej ze ścieków osiągnęła wartość 83%, a w 2005 roku tylko 74%. Ogólnie można stwierdzić, że skuteczność usuwania substancji organicznej ze ścieków w siódmym roku eksploatacji oczyszczalni (2005 r.) była wciąż na wysokim poziomie, jednakże w porównaniu z drugim rokiem funkcjonowania systemu (2000 r.) uległa obniżeniu.

Obniżanie skuteczności usuwania substancji organicznej ze ścieków może wynikać ze stopniowego nagromadzenia materii organicznej i substancji nieorganicznych w złożu, co powoduje pogorszenie warunków przepływu ścieków i skrócenie czasu ich kontaktu z błoną biologiczną rozwiniętą na powierzchni ziaren gruntu [García i in. 2005]. Podobne wyniki uzyskane dla obu złóż gruntowo-trzcinowych systemu Kickutha mogą świadczyć, że takie zachowanie jest typowe dla złóż o wypełnieniu z gruntu drobnoziarnistego. Badania prowadzone w obiektach w Europie i Stanach Zjednoczonych wykazały, że w zło-



Rys. 2. Usuwanie ze ścieków substancji organicznej wyrażonej wskaźnikiem BZT₅ w złożu gruntowo-trzcinowym oczyszczalni ścieków w Bolimowie

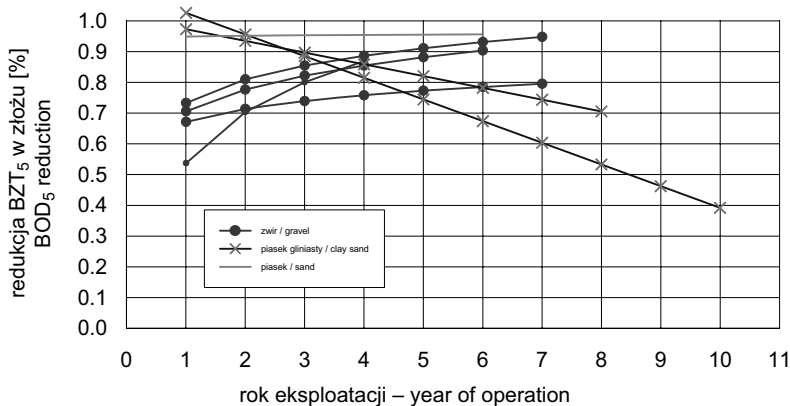
Fig. 2. The removal of BOD₅ in the reed bed in Bolimów



Rys. 3. Usuwanie ze ścieków substancji organicznej wyrażonej wskaźnikiem BZT5 w złożu gruntowo-trzcinowym oczyszczalni ścieków w Sadowej.

Fig. 3. The removal of BOD5 in the reed bed in Sadowa

żach z poziomym przepływem ścieków często następuje flokulacja, osadzanie i filtracja zawieszin oraz cząstek koloidalnych, co powoduje zmniejszanie i zatykanie się porów [Obarska-Pempkowiak 2002] i stwarza prawdopodobieństwo kolmatacji złoża. Zjawisko takie nie występuje w przypadku złożeń gruntowo-trzcinowych, z wypełnieniem żwirowym, których skuteczność usuwania substancji organicznej często pozostaje stabilna nawet po kilku latach eksploatacji [Cooper i Green 1998]. W niektórych obiektach obserwowano także wzrost skuteczności usuwania materii organicznej ze ścieków w ciągu pierwszych 2–3 lat eksploatacji (rys. 4), co można wytłumaczyć „wpracowaniem złożeń” związanym z rozwojem błony biologicznej i roślin hydrofitowych [Sadecka 2003].



Rys. 4. Usuwanie ze ścieków substancji organicznej wyrażonej wskaźnikiem BZT5 w złożach o wypełnieniu żwirowym (4 złoża, za: Cooper i Green 1998), piaskowym (1 złożo, za: Soroko 1999) i drobnoziarnistym gruntem miejscowym (2 złoża, na podstawie badań autorów)

Fig. 4. The removal of BOD5 in HSF beds filled with gravel (4 beds, based on Cooper and Green 1998), sand (1 bed, based on Soroko 1999) and clayey soil (2 beds, based on author's observations)

W oczyszczalni w Bolimowie w okresie badań średnie obciążenie złoża substancją organiczną wynosiło $4,6 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, a w Sadowej $3,4 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, przy jednostkowej powierzchni złóż wynoszącej odpowiednio $0,45$ i $6,6 \text{ m}^2 \cdot \text{M}^{-1}$. Według różnych wytycznych, powierzchnia jednostkowa niezbędna dla redukcji substancji organicznej wyrażonej BZT₅ dla złóż z przepływem podpowierzchniowym powinna wynosić: od 1 do $10 \text{ m}^2 \cdot \text{M}^{-1}$ [Water... 1998], od 5 do $10 \text{ m}^2 \cdot \text{M}^{-1}$ [Kalisz i Sałbut 1996] i od 7 do $12 \text{ m}^2 \cdot \text{M}^{-1}$ [Boller 1997], przy czym dla złóż poziomych przyjmuje się minimalną powierzchnię jednostkową $5 \text{ m}^2 \cdot \text{M}^{-1}$. Według założeń projektowych, dla oczyszczalni w Sadowej obciążenie złoża substancją organiczną wyrażoną wskaźnikiem BZT₅ powinno wynosić około $1 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, czyli jest kilkakrotnie większe od założonego. W analizowanych obiektach złoża były przeciążone, szczególnie w przypadku oczyszczalni w Bolimowie, gdzie powierzchnia jednostkowa jest ponaddziesięciokrotnie zaniżona w stosunku do zalecanej. Przyczyną obniżania zdolności złoża do usuwania substancji organicznej ze ścieków może być ograniczona możliwość kontaktu ścieków z materiałem filtracyjnym. Podczas poboru próbek na obiekcie wielokrotnie obserwowano przepływ ścieków po powierzchni złoża. Przepływ powierzchniowy jest zjawiskiem dość częstym w systemach opartych na technologii Kickutha, gdyż u podstawy tych systemów leży założenie, że przepuszczalność złoża gruntowo-trzciniowego, z początkowo małym współczynnikiem filtracji (około $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), po trzech latach wzrośnie do $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, w związku z formowaniem się makroporów w konsekwencji rozkładu korzeni i kłączy trzciny [Kickuth 1982]. Tymczasem w większości systemów obserwuje się obniżanie zdolności filtracyjnych w trakcie eksploatacji złóż, głównie na skutek kolmatacji i osiadania materiału filtracyjnego [Kadlec i Watson 1993, Börner i in. 1998, Sundblad 1998]. Obniżenie to wynosi najczęściej jeden lub dwa rzędy wielkości, głównie w zależności od rodzaju gruntu i jakości ścieków [Błażejewski 1995, Börner i in. 1998]. Zjawisko przepływu powierzchniowego ścieków, skutkujące skróceniem czasu przepływu i ograniczeniem możliwości kontaktu ścieków ze złożem, prowadzi w efekcie do obniżenia skuteczności oczyszczania [Constructed... 1991]. Dlatego przy projektowaniu złóż gruntowo-trzciniowych należy zakładać, że złożo nie uzyska większego współczynnika filtracji niż posiada sam materiał użyty w jego konstrukcji, a na przykład w duńskich wytycznych do projektowania zakłada się, że współczynnik filtracji złóż żwirowo-piaskowych powinien być większy od $200 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ [Birkedal i in. 1993].

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki obserwacji dwóch hydrofitowych oczyszczalni ścieków ze złożami gruntowo-trzciniowymi, z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków wykazały, że w całym okresie obserwacji zapewniały one usuwanie ze ścieków substancji organicznej, jednak skuteczność oczyszczania ścieków obniżała się w miarę eksploatacji obiektów, co wynika z akumulacji substancji organicznej w złożu, a w jej efekcie kolmatacji prowadzącej do pogarszania się warunków przepływu oraz skracania czasu kontaktu ścieków z błoną biologiczną. Malejąca skuteczność usuwania substancji organicznej w złożach gruntowo-trzciniowych obu badanych oczyszczalni jest wynikiem większego niż zakładane w projekcie obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń. Kolmatacja złóż, szczególnie strefy dopływu i pierwszej części złoża właściwego, jest zjawiskiem powszechnym, jednak w złożach o wypełnieniu gruboziarnistym nie powoduje ich wyłączenia.

czenia z eksploatacji. Analiza przedstawionych w pracy obserwacji zmian skuteczności oczyszczania ścieków w dwóch złożach gruntowo-trzcinowych w czasie ich eksploatacji pozwala na sformułowanie następujących konkluzji:

1. Efektywność usuwania zanieczyszczeń (BZT5, P) w systemach hydrofitowych z przepływem podpowierzchniowym zależy w znacznym stopniu od materiału wypełniającego złożo.

2. Prawidłowa, zgodna z założeniami projektowymi eksploatacja złóż (kontrola jakości ścieków dopływających do oczyszczalni, okresowe przewietrzanie i płukanie złóż) jest koniecznym warunkiem stabilnej i dużej skuteczności oczyszczania ścieków w oczyszczalniach hydrofitowych Kickutha.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę powszechność stosowania hydrofitowej technologii oczyszczania ścieków także w systemach przydomowych, konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej inwentaryzacji oczyszczalni hydrofitowych w Polsce, z uwzględnieniem ich skuteczności, wytypowanie reprezentatywnych obiektów i objęcie ich monitoringiem w celu oszacowania ich trwałości. Obserwacje utraty funkcjonalności złóż gruntowo-trzcinowych w miarę ich użytkowania pozwalają stwierdzić, iż istnieje pilna konieczność opracowania koncepcji utylizacji lub zagospodarowania „zużytego” materiału filtracyjnego po zakończeniu eksploatacji złoża.

PIŚMIENNICTWO

- Biernacka E., Obarska-Pempkowiak H., 1996. Możliwość wykorzystania ekosystemu bagiennego do usuwania zanieczyszczeń. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW* 10, 105–113.
- Birkedal K., Brix H., Johansen N.H., 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands – designers manual. The Management Institute. Ebeltoft, Denmark.
- Błazejewski R., 1995. Obliczenia hydrauliczne złóż gruntowo-roślinnych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Oczyszczalnie hydrobotaniczne”, Gdańsk, 31–36.
- Boller M., 1997. Small wastewater treatment plants – a challenge to wastewater engineers. *Wat. Sci. Techn.* 35, 1–12.
- Börner T., von Felde K., Gschlössl T., Kunst S., Wissing F.W., 1998. Germany. In: *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, 169–190.
- Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment – Design Manual, 1991. USEPA.
- Cooper P.F., Green B., 1998. United Kingdom. In: *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*, Backhuys Publishers, Leiden, 315–335.
- Czyżyk F., Soroko M., 1997. Wstępne wyniki badań efektywności gruntowo-roślinnych i wodno-roślinnych oczyszczalni ścieków. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy oczyszczania ścieków i ochrony wód w dorzeczu Odry”, Świeradów Zdrój, 219–225.
- Garcia J., Aguirre P., Barragán J., Mujeriego R., Matamoros V., Bayona J.M., 2005. Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 25, 405–418.
- Grygorczuk-Petersons E., 1997. Doczyszczanie ścieków po kontenerowych oczyszczalniach z biologicznymi złożami obrotowymi. IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych”, Rajgród, 329–334.
- Jakimowicz J., 2002. Operat wodnoprawny na odprowadzanie oczyszczonych ścieków z gminnej oczyszczalni w Bolimowie gm. Bolimów do rzeki Rawki. Maszynopis.

- Kadlec R.H., 2003. Status of treatment wetlands in North America. In: The use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. Eds. V. Dias, J. Vymazal, ICN and INAG, Lisbon, 363–401.
- Kadlec R.H., Watson J.T., 1993. Hydraulics and solid accumulation in a gravel bed treatment wetland. Constructed wetlands for water quality improvement. Ed. G.A. Moshiri. Lewis Publ., Boca Raton.
- Kalisz L., Sałbut J., 1996. Wykorzystanie makrofitów do oczyszczania ścieków w tzw. oczyszczalniach korzeniowych. Wyniki badań i zalecenia. IOS, Warszawa.
- Kickuth R., 1982. Verfahrens- und dimensionierungsgrundlagen der wurzelraumsorgung. Teil Die mineralischen Bodenhorizonte. Report Gesamthochschule, Kassel (fragmenty tłum.).
- Kowalik P., Obarska-Pempkowiak H., 1997. Oczyszczalnie hydrofitowe w Polsce. IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych“, Rajgród, 32–44.
- Mierzejewski M., 1999. Efektywność usuwania zanieczyszczeń na złożach trzciniowych o przepływie pionowym. Międzynarodowe Seminarium „Oczyszczanie ścieków z wykorzystaniem roślin – nowe doświadczenia i osiągnięcia”. Cedzyna k/Kielc, 105–116.
- Obarska-Pempkowiak H., 2002. Oczyszczalnie hydrofitowe. Wydawnictwo PG, Gdańsk.
- Ozimek T., Renman G., 1995. Wykorzystanie makrofitów w niekonwencjonalnych oczyszczalniach ścieków. Wiadomości Ekologiczne 239–254.
- Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment, 1996. Eds. P.F. Cooper, G.D. Job, M.B. Green, R.B.E. Shutes. WRC Publications, Swindon, Wiltshire.
- Sadecka Z., 2003. Ocena efektywności pracy wybranych oczyszczalni hydrobotanicznych. Ochrona Środowiska 25, 1, 13–16.
- Skillicorn P., 2002. Duckweed-based systems for utilization of nutrients in swine manure (<http://www.ntrnet.net>).
- Soroko M., 1999. Skuteczność oczyszczalni gruntowo-roślinnych w usuwaniu azotu ze ścieków komunalnych. Międzynarodowe Seminarium „Oczyszczanie ścieków z wykorzystaniem roślin – nowe doświadczenia i osiągnięcia”. Cedzyna k/Kielc, 117–123.
- Sundblad K., 1998. Sweden. In: Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, 251–259.
- Vymazal J., 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering 25, 478–490.
- Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Haberl R., Perfler R., Laber J., 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. In: Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, 17–66.
- Water and Wastewater Treatment – The Swedish Experience, 1998. SEPA and Ministry of Foreign Affairs.
- Wittgren H.B., Tobiasson S., 1995. Nitrogen removal from pretreated wastewater in surface flow wetlands. *Wat. Sci. Tech.* 32, 3, 69–78.

THE EFFICIENCY OF WASTEWATER TREATMENT IN HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS

Abstract. Constructed wetlands are commonly used for suspended solids and BOD₅ removal from wastewater. The most popular system is horizontal subsurface flow constructed wetland with the significant share of systems based on Kickuth licence. Long term treatment efficiency monitoring data for two reed beds are presented. The decrease of BOD₅ reduction from wastewater has been observed during the monitoring period. Significant role of permeability of the soil used for bed construction has been pointed out.

Key words: bed media, BOD₅, domestic wastewater, reed bed

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 4.12.2007