## Zastosowanie modelowania matematycznego w ocenie wpływu osadów dennych na jakość fizyczno-chemiczną wody w korycie rzecznym, na przykładzie rzeki Biebrzy

Część I

Part I

Application of mathematical modeling in assessment of bottom deposits influence on physico-chemical quality of water in a river channel, on example of the Biebrza River

Sebastian R. Bielak

### **Streszczenie**

W pracy omówiono problematykę jednowymiarowego modelowania matematycznego procesów biochemicznych i fizycznych zachodzących w korycie rzecznym pomiędzy osadami dennymi a tonią wodną. W tym celu zastosowano program Qual2k, który jest jednym z najpopularniejszych tego typu narzędzi analitycznych opracowanych przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (U.S. EPA). Jako obiekt badawczy wybrano 50-kilometrowy odcinek nizinnej rzeki Biebrzy, położonej w granicach Basenu Dolnego Biebrzańskiego Parku Narodowego. Dane do modelu uzyskano w trakcie trzech kampanii pomiarowych przeprowadzonych w latach 2007-2008. Wyniki symulacji komputerowych pozwoliły określić w jakim zakresie osady denne oddziałują na stan fizyczno-chemiczny rzeki oraz umożliwiły identyfikację tych składników osadów, które w największym stopniu wpływały na jakość wody w korycie Biebrzy Dolnej.

**Słowa kluczowe:** Qual2k, model stanu ustalonego, osady denne, modelowanie jakości wód powierzchniowych, Biebrza.

### Abstract

In this paper the subject matter of one-dimensional, mathematical modeling of biochemical and physical processes occurring in a river channel between bottom deposits and water has been discussed. It has been done with use of the Qual2k Modeling Framework, which is one of the most popular analytical tool of such type, thrown open to the public by the U. S. Environmental Protection Agency. As a research object a 50 kilometers long reach of the lowland Biebrza River was chosen. The river is located in the borders of the Lower Basin, which is a part of the Biebrza National Park, Poland. Data, necessary for the model, were obtained during three measurement campaigns conducted in 2007-2008. The results of computer simulations have allowed to define the range of bottom deposits influence on physico-chemical state of the river and to identify those ingredients of deposits which had the biggest impact on water quality of the Lower Biebrza River.

Key words: Qual2k, steady state model, bottom deposits, surface water quality modeling, Biebrza.

### 1. Wprowadzenie

Osady denne, jako miejsce bytowania wielu gatunków organizmów roślinnych i zwierzęcych, są istotnym ogniwem w procesie krążenia pierwiastków w środowisku wodnym. Pomiędzy tonią wodną, a znajdującymi się pod nią osadami zachodzi ciągła wymiana materii – różne substancje przechodzą z jednego ośrodka do drugiego zmieniając przy tym swoją formę. Osady denne powstają w wyniku sedymentacji na dnie cieków wodnych rozdrobnionego materiału skalnego (żwir, piasek), obumarłych roślin i zwierząt, cząstek gleb wypłukanych z wyżej położonych terenów, niesionych z nurtem rzeki substancji słabo rozpuszczalnych w wodzie (zawiesin) oraz na skutek wytrącania się z wody organicznych lub nieorganicznych związków chemicznych, takich jak kalcyt (CaCO<sub>3</sub>), wodorotlenek żelaza (Fe(OH)<sub>3</sub>), wodorotlenek manganu (Mn(OH)<sub>2</sub>) czy związki fosforu, np. CaHPO<sub>4</sub>, Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

Skład geochemiczny osadów dennych jest uzależniony od czynników naturalnych, np. budowy geologicznej zlewni oraz antropogenicznych (głównie punktowych i obszarowych źródeł zanieczyszczeń), przy czym jest on zmienny i w pewnym zakresie zależny również od miąższości samych osadów [8]. Szacuje się, że ok. 7% materiału osadowego niesionego z wodami rzek stanowi wapń i jest go 100-krotnie więcej niż fosforu [11]. W wyniku procesu samooczyszczania się wód płynących znaczna część zanieczyszczeń trafiających do rzek i potoków z czasem przechodzi do osadów dennych, dlatego też skład chemiczny osadów oraz wód powierzchniowych są od siebie zależne. Zjawisko to jest najbardziej widoczne w przypadku zanieczyszczeń charakteryzujących się małą rozpuszczalnością oraz trudno ulegających biodegradacji, takich jak np. sole metali ciężkich lub trwałe związki organiczne. Uważa się, że skład geochemiczny osadów dennych jest bardzo dobrym wskaźnikiem stanu czystości wód powierzchniowych [5].

Osady denne odgrywają szczególną rolę w procesie krążenia w środowisku wodnym dwóch najważniejszych biogenów: azotu i fosforu. Detrytus, głównie w postaci obumarłych makrofitów oraz fitoplanktonu, po opadnięciu na dno cieku ulega rozkładowi. W warunkach aerobowych zawarty w nim azot organiczny ulega przekształceniu w azot amonowy, ten z kolei pod wpływem bakterii ulega przeobrażeniu w azot azotanowy(III), a następnie azot azotanowy(V). Związki te albo zasilają toń wodną albo też, pozostając w głębszych partiach osadów (gdzie zazwyczaj panują warunki beztlenowe), podlegają procesowi denitryfikacji z udziałem innych bakterii. Azotany obecne w osadach dennych mogą również ulegać procesowi redukcji, w wyniku której poprzez wody znajdujące się ponad nimi unosi się do atmosfery wolny azot.

Fosfor gromadzi się na dnie cieków i zbiorników wodnych zarówno w postaci obumarłej materii organicznej, zawiesin mineralnych, jak również w wyniku wytrącania się z wody trudno rozpuszczalnych soli, np.  $Ca_3(PO)_4$ , FePO<sub>4</sub> lub AlPO<sub>4</sub>. Im wyższa jest w wodzie zawartość wapnia, żelaza i glinu tym szybciej fosfor przechodzi z toni wodnej do osadów dennych. Zgromadzony na dnie fosfor organiczny ulega rozkładowi, a następnie znaczna jego część, głównie w postaci fosforanów(V), wraca z powrotem do toni wodnej.

### 2. Program Qual2k i zakres danych użytych w modelu

Do konstrukcji matematycznego modelu interakcji osadów dennych z tonią wodną w nizinnej rzece Biebrzy został wykorzystany program Qual2k, opracowany i udostępniony przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska U.S. EPA [7]. Model obejmował 50-kilometrowy odcinek Biebrzy Dolnej, rozciągający się od miejscowości Osowiec aż po ujście do rzeki Narwi. Bazę modelu jakościowego stanowił hydrauliczny model przepływu wody w korycie rzecznym w stanie ustalonym [3] oraz model wymiany ciepła pomiędzy rzeką, a jej otoczeniem [4]. Zastosowanie modelu osady denne–woda zostało ograniczone do symulacji krótkich, kilkugodzinnych przedziałów czasowych, w których założono, że zarówno przepływ wody w korycie, jak również warunki meteorologiczne wpływające na procesy wymiany ciepła, były stałe.

Dane niezbędne do skonstruowania i skalibrowania modelu jakościowego zostały zgromadzone w dniach: 29 lipca i 25 września 2007 r. oraz 23 lipca 2008 r., w trakcie prac terenowych na obszarze Basenu Dolnego Biebrzańskiego Parku Narodowego (rys. 1). Badania obejmowały:

- pobór próbek wody wraz z pomiarem temperatury warstwy podpowierzchniowej Biebrzy (10 punktów kontrolnych, głębokość poboru 0,5 m) oraz z ujściowych odcinków jej dopływów punktowych, tj. Kanału Rudzkiego, Klimaszewnicy, Wissy i Kosódki (po jednym punkcie kontrolnym),
- pobór próbek wody wraz z pomiarem temperatury warstwy dennej koryta Biebrzy (6 punktów kontrolnych, głębokość poboru 1,8-4,3 m),
- określenie współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych,
- oznaczenia w próbkach następujących parametrów: odczyn, zasadowość ogólna, tlen rozpuszczony, azot amonowy, amoniak, azot azotanowy(III), azot azotanowy(V), azot organiczny, azot Kjeldahla, azot ogólny, fosfor mineralny, fosforany(V), fosfor organiczny, fosfor ogólny, chlorofil a. Analizy chemiczne wykonano w dniu poboru próbek, w akredytowanym laboratorium Inspekcji Ochrony Środowiska w Białymstoku.

Program Qual2k został użyty do stworzenia serii trzech symulacji stanu ustalonego (po jednej na każdy dzień pomiarów terenowych), które razem stanowiły substytut modelu dynamicznego opisującego wymianę masy pomiędzy osadami dennymi i tonią wodną w dłuższym horyzoncie czasowym.



Rys. 1. Rzeka Biebrza koło wsi Jasionowo [fot. Sebastian R. Bielak]

### 3. Konstrukcja matematycznego modelu osadów dennych Biebrzy

Dwukierunkowa wymiana masy pomiędzy osadami dennymi Biebrzy, a znajdującą się nad nimi tonią wodną została zbilansowana w oparciu o następujące procesy:

- 1. Zasilanie osadów dennych materią oraz związkami chemicznymi pochodzącymi z toni wodnej, w tym:
  - drobną materią organiczną, tzw. detrytusem opadającym na dno cieku, zawierającym w swojej strukturze węgiel organiczny, azot organiczny oraz fosfor organiczny;
  - związkami organicznymi oraz biogenami (głównie azotem i fosforem) rozpuszczonymi w wodzie penetrującej osady denne.
- 2. Pobór tlenu z toni wodnej do osadów dennych na potrzeby reakcji biochemicznych (utleniających) zachodzących w osadach.
- 3. Zasilanie toni wodnej substancjami pochodzącymi z osadów dennych, w tym: azotem amonowym, fosfo-ranami(V), azotanami(V) oraz metanem.

W modelu przyjęto, iż osady denne zbudowane są z dwóch warstw:

- aerobowej o grubości 1 mm, tworzącej powierzchniową warstwę osadów, w której panują warunki tlenowe,
- anaerobowej o grubości 10 cm, zalegającej poniżej warstwy aerobowej, w której panują warunki beztlenowe oraz dochodzi do kumulacji materii organicznej pochodzącej z toni wodnej.

Założono, że większość osiadłej na dnie materii organicznej ulegała w warunkach beztlenowych procesowi mineralizacji (rozkładu), w efekcie czego powstawały rozpuszczone w wodzie fosforany mineralne, azot amonowy oraz metan. Pozostała część materii organicznej gromadziła się w warstwie aerobowej, gdzie uczestniczyła w reakcjach utleniających (takich jak np. nitryfikacja



Rys. 2. Zastosowany w modelu Biebrzy Dolnej schemat przemian związków chemicznych obecnych w osadach dennych i w wodzie ponad dnem [7]

azotu amonowego) lub też reagowała z substancjami pochodzącymi z warstwy anaerobowej, zgodnie z definicją diagenezy (rys. 2).

#### 3.1. Ogólna zasada zachowania masy

Dla poszczególnych parametrów jakości wód powierzchniowych Biebrzy Dolnej, modelowanych za pomocą programu Qual2k, zastosowano następujące równanie zachowania masy w dowolnym elemencie obliczeniowym "i" [7]:

$$\begin{aligned} \frac{dc_{i}}{dt} &= \frac{Q_{i-1}}{V_{i}} \cdot c_{i-1} - \frac{Q_{i}}{V_{i}} \cdot c_{i} - \frac{Q_{odplyw,i}}{V_{i}} \cdot c_{i} + \\ &+ \frac{E_{i-1}}{V_{i}} \cdot (c_{i-1} - c_{i}) + \frac{E_{i}}{V_{i}} \cdot (c_{i+1} - c_{i}) + \frac{W_{i}}{V_{i}} + S_{i} \end{aligned}$$
(1)

gdzie:

- c<sub>i</sub> − stężenie danego parametru jakościowego wody [mg·dm<sup>-3</sup>],
- t czas [doba],
- V<sub>i</sub> objętość elementu "i" [m<sup>3</sup>],
- $Q_i$  przepływ wody wzdłuż biegu rzeki z elementu "i" do "i+1" [m<sup>3</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- Q<sub>odplyw,i</sub> całkowity odpływ wody (punktowy + obszarowy) z elementu "i" [m<sup>3</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- *E*'<sub>i</sub> współczynnik dyspersji objętościowej pomiędzy elementem "i" a "i+1" [m<sup>3</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- S<sub>i</sub> wzrost lub spadek stężenia danego parametru jakościowego w elemencie "i" na skutek reakcji biochemicznych oraz mechanizmów wymiany masy [g·m<sup>-3</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- W<sub>i</sub> sumaryczny ładunek danego parametru jakościowego doprowadzany ze źródeł punktowych oraz obszarowych do elementu "i" [g·doba<sup>-1</sup>], wyznaczony z równania:

$$W_{i} = \sum_{j=1}^{dpi} Q_{dp,i,j} c_{dp,i,j} + \sum_{j=1}^{doi} Q_{do,i,j} c_{do,i,j}$$
(2)

gdzie:

- c<sub>dp,i,j</sub> stężenie danego parametru jakościowego w j-tym dopływie punktowym do elementu "i" [mg·dm<sup>-3</sup> lub μg·dm<sup>-3</sup>],
- c<sub>do,i,j</sub> stężenie danego parametru jakościowego w j-tym dopływie obszarowym do elementu "i" [mg·dm<sup>-3</sup> lub µg·dm<sup>-3</sup>].

### 3.2. Diageneza

Diageneza to przemiany fizyczno-chemiczne osadów dennych rozpoczynające się w momencie ich depozycji na dnie cieku i polegające na zmianie składu mineralnego, struktury oraz składu chemicznego, przy czym zjawisko to zachodzi zarówno na powierzchni osadów jak również w całej ich objętości. Całkowity strumień masy drobnej materii organicznej zasilającej osady denne został w modelu przemian biochemicznych wyznaczony w oparciu o równanie [7]:  $J_{\det r} = r_{da} \cdot v_a \cdot a_p + v_{dt} \cdot m_o \tag{3}$ 

gdzie:

J<sub>detr</sub> – strumień masy drobnej materii organicznej (fitoplanktonu oraz glonów bentosowych) opadającej z toni wodnej do osadów dennych [g D·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>].

Znając całkowitą masę detrytusu opadającego na dno cieku oraz wartości odpowiednich współczynników stechiometrycznych można rozdzielić strumień masy detrytusu na trzy pomniejsze "strugi", z których każda definiuje masę innego biogenu zasilającego osady denne, tj. węgla organicznego, azotu organicznego oraz fosforu organicznego. W ramach każdej z wymienionych "strug" masy biogenów wyodrębniono trzy frakcje, co pozwoliło na zbilansowanie procesu wymiany masy dla poszczególnych warstw osadów dennych:

- nietrwałą (labilną), tj. szybko ulegającą reakcjom biochemicznym,
- wolno ulegającą reakcjom biochemicznym,
- trwałą, tj. nie podlegającą żadnym reakcjom biochemicznym.

### 3.3. Węgiel organiczny

Zasada zachowania masy w warstwie anaerobowej osadów, wyznaczona dla nietrwałej frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu, została opisana równaniem [7]:

$$H_2 \frac{dPOC_{2,G1}}{dt} =$$
(4)

$$= J_{\textit{POC},G1} - k_{\textit{POC},G1} \cdot \theta_{\textit{POC},G1}^{T-20} \cdot H_2 \cdot \textit{POC}_{2,G1} - w_2 \cdot \textit{POC}_{2,G1}$$

gdzie:

- $H_2$  miąższość warstwy anaerobowej osadów dennych [m],
- $J_{POC,G1}$  strumień masy nietrwałej frakcji węgla organicznego zawartego w detrytusie, zasilający warstwę anaerobową osadów [g O<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- k<sub>POC,G1</sub> tempo przebiegu procesu mineralizacji nietrwałej frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu [doba<sup>-1</sup>],
- $\theta_{POC,G1}$  współczynnik korekty tempa przebiegu mineralizacji nietrwałej frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu, uzależniony od temperatury wody,
- $w_2$  prędkość, z jaką cząsteczki nietrwałej frakcji węgla organicznego z detrytusu ulegają przemieszczeniu z warstwy aerobowej do anaerobowej [m·doba<sup>-1</sup>],
- $POC_{2,G1}$  stężenie nietrwałej frakcji węgla organicznego z detrytusu w warstwie anaerobowej osadów [g O<sub>2</sub>·m<sup>-3</sup>], dla stanu ustalonego wyznaczone z równania:

$$POC_{2,G1} = \frac{J_{POC,G1}}{k_{POC,G1} \cdot \theta_{POC,G1}^{T-20} \cdot H_2 + v_b}$$
(5)

Korzystając z równań (4) oraz (5) wyznaczono w obrębie strumienia nietrwałej frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu tę część masy węgla, która została rozpuszczona w wodzie w oparciu o równanie:

$$J_{C,G_1} = k_{POC,G_1} \cdot \theta_{POC,G_1}^{T-20} \cdot H_2 \cdot POC_{2,G_1}$$
(6)

gdzie:

J<sub>C,G1</sub> − strumień masy nietrwałej frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu, rozpuszczonej w wodzie zasilającej warstwę anaerobową osadów [g O<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>].

W analogiczny sposób zbilansowano wymianę masy w warstwie anaerobowej osadów dennych dla frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu, która wolno ulegała przemianom biochemicznym. Dzięki temu możliwe było wyliczenie strumienia masy węgla organicznego wolno ulegającego przemianom biochemicznym, który w postaci rozpuszczonej w wodzie ( $J_{C,G2}$ ) zasilał warstwę anaerobową osadów. Po dodaniu otrzymanej wartości do wyniku równania (6) uzyskano całkowitą masę rozpuszczonego w wodzie węgla organicznego, który zasilał warstwę anaerobową osadów ( $J_C$ ), wg równania:

$$J_C = J_{C,G_1} + J_{C,G_2} \tag{7}$$

### 3.4. Metan

Rozpuszczony w wodzie węgiel organiczny, który po opadnięciu detrytusu na dno cieku zostaje skumulowany w warstwie anaerobowej osadów dennych ulega na skutek przemian biochemicznych przekształceniu w metan. Ponieważ  $CH_4$  jest stosunkowo słabo rozpuszczalny w wodzie, nawet nieduże jego stężenie w osadach powoduje 100-procentowe nasycenie w roztworze wodnym, po czym nadmiar gazu ulatnia się z osadów do toni wodnej. W modelu przyjęto, że w trakcie ulatniania się z osadów dennych metan podlega różnym reakcjom biochemicznym – w warstwie anaerobowej zostaje częściowo zużyty w trakcie procesu denitryfikacji, natomiast w warstwie aerobowej ulega częściowemu utlenieniu. Strumień masy metanu opuszczającego warstwę anaerobową osadów dennych został wyznaczony z równania [7]:

$$J_{CH4,T} = J_C - J_{O2,dn}$$
 (8)

gdzie:

- $J_{CH4,T}$  strumień całkowitej masy metanu powstałego w warstwie anaerobowej osadów dennych, wyrażony w ekwiwalentach tlenowych [g O<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- J<sub>O2,dn</sub> część strumienia masy metanu powstałego w warstwie anaerobowej osadów skonsumowana w czasie denitryfikacji, wyrażona w ekwiwalentach tlenowych [g O₂·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>], wyznaczona z równania:

5) 
$$J_{O2,dn} = r_{ondn} \cdot \left( \frac{k_{NO3,1}^2}{s} \cdot \theta_{NO3}^{T-20} \cdot NO_{3,1} + k_{NO3,2} \cdot \theta_{NO3}^{T-20} \cdot NO_{3,2} \right)$$
(9)

# WODOCIAGI POLSKIE

Izba Gospodarcza "Wodociągi Polskie" to organizacja otwarta dla tych wszystkich przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych, których przedstawiciele chcą uczestniczyć w rozwoju branży.

Izba Gospodarcza "Wodociągi Polskie" zapewnia Członkom:

- prawo głosu w najważniejszych sprawach,
- realny wpływ na kształt powstających aktów prawnych,
- wpływ na kształtowanie polityki z zakresu wody i ścieków w Unii Europejskiej,
- bieżącą, bezpłatną konsultację telefoniczną w sprawach pilnych dla firm wodociągowo – kanalizacyjnych z zakresu prawa, ekonomii, spraw technicznych,
- bezpłatny dostęp do analiz technicznych, ekonomicznych,
- uczestnictwo w organizowanych i dotowanych szkoleniach, wyjazdach techniczno-szkoleniowych oraz spotkaniach konsultacyjno-doradczych,
- uczestnictwo w organizowanych we współpracy ze szkołami wyższymi studiach podyplomowych,
- udział w Kongresach Wodociągowców Polskich.

Izba Gospodarcza "Wodociągi Polskie" ul. Jana Kasprowicza 2 85-073 Bydgoszcz Telefon: +48 52 376 89 10 Strona: www.igwp.org.pl







Kongresy Szkolenia











Zdjęcielobciażenia







Pogotowie BHP



# 🔰 exposilesia

Sosnowiec

# 23 – 24 października 2013

3 niezwykłe wydarzenia
2 dni branżowych spotkań i konferencji
1 miejsce, w którym musisz być

W programie targów: Konferencja HYDROINTEGRACJE

Targi Urządzeń i Technologii Branży Wodociągowo - Kanalizacyjnej

Targi Melioracji i Urządzeń Wodnych, Infrastruktury i Urządzeń Przeciwpowodziowych





Targi Gospodarki Odpadami, Recyklingu i Technik Komunalnych



**tereny targowe** Expo Silesia ul. Braci Mieroszewskich 124, Sosnowiec www.exposilesia.pl kontakt Wojciech Rabsztyn tel. +48 510 031 669, fax +48 32 788 75 28 *e-mail: wojciech.rabsztyn@exposilesia.pl* 

www.hydrosilesia.pl www.melioracje.com.pl www.ekowaste.pl



## Odkryj wyzwania zrównoważonego rozwoju miast

## Weź udział w Akademii Jesiennej w Poznaniu

Akademia Jesienna "Wyzwania zrównoważonej gospodarki wodnej. Usługi ekosystemów w dobie zmian klimatycznych" to intensywny kurs, poświęcony zrównoważonemu rozwojowi miast. Powstał na bazie doświadczeń międzynarodowej Akademii Letniej "Challenges of Sustainable Development" prowadzonej od 16 lat przez Fundację Sendzimira.

Podczas warsztatów, wykładów, projektów, gier symulacyjnych uczestnicy Akademii Jesiennej poznają główne założenia zrównoważonej gospodarki wodnej miast i koncepcję usług ekosystemów od podstaw, w sposób zrozumiały również dla osób nie będących ekspertami w tych dziedzinach. Jest to niezwykle istotne ze względu na konieczność włączenia w zintegrowane zarządzanie zasobami wodnymi różnych grup interesariuszy.

### 9-17 listopada 2013 r., Poznań

Uczestnicy Akademii Jesiennej zostaną wyłonieni spośród absolwentów kursu e-learningowego wprowadzającego w zagadnienia zrównoważonego rozwoju miast, usług ekosystemów i zrównoważonej gospodarki wodnej.

Udział w kursie oraz Akademii Jesiennej jest bezpłatny.

### Więcej informacji oraz zgłoszenia na stronie internetowej: www.sendzimir.org.pl



### O Fundacji Sendzimira



Fundacja Sendzimira jest wiodącą organizacją działającą na rzecz zrównoważonego rozwoju w Polsce. Od 16 lat inicjuje i wspiera projekty edukacyjne, badawcze i praktyczne, mające na celu rozwiązywanie złożonych problemów środowiskowych, gospodarczych i społecznych. Współpracuje w tym celu z firmami, samorządami, organizacjami pozarządowymi, społecznościami lokalnymi oraz środowiskiem akademickim. Jednym z najważniejszych przedsięwzięć Fundacji jest realizowana od 16 lat Akademia Letnia "Wyzwania Zrównoważonego Rozwoju".

Fundacja należy do międzynarodowej sieci AtKisson Group, zrzeszającej ekspertów i organizacje pracujące na rzecz zrównoważonego rozwoju.



## GOSPODARKA WODNO-ŚCIEKOWA I ODPADOWA MIAST I WSI



Tematyka konferencji

5–7 września 2013 roku • Tuchola/Tleń

- procesy jednostkowe w inżynierii środowiska
- oddziaływanie człowieka na wody powierzchniowe i podziemne
- metody oczyszczania i uzdatniania wody
- oddziaływanie przemysłu na wody powierzchniowe i podziemne
- wysoko efektywne metody oczyszczania ścieków komunalnych
- niekonwencjonalne metody oczyszczania ścieków
- poprodukcyjnych
- oczyszczalnie przydomowe
- optymalizacja i zwiększanie niezawodności systemów kanalizacyjnych i wodociągowych
- unieszkodliwianie i zagospodarowanie osadów ściekowych (i odpadów)
- modelowanie matematyczne w procesach oczyszczania ścieków

Organizator

Wyższa Szkoła Zarządzania Środowiskiem w Tucholi • ul. Pocztowa 13 • 89-500 Tuchola • tel./fax 52 559 20 22 e-mail: rektorat@borytucholskie.pl www.wszs.tuchola.pl

Miejsce konferencji

Ośrodek Rehabilitacji i Wypoczynku "Perła Borów" Sp. z o.o. • ul. Dębowa 11 • 86-150 Tleń (Osie) • tel./fax 52 333 99 98

Patronat medialny

SANITARNA







gdzie:

 $r_{ondn}$  – współczynnik stechiometryczny określający zapotrzebowanie na węgiel w procesie denitryfikacji, wyrażony jako ekwiwalent tlenu do azotu, wyznaczony z równania:

$$r_{ondn} = 2.67 \left[ \frac{g O_2}{g C} \right] \cdot \frac{5 \left[ \text{moli C} \right] \cdot 12 \left| \frac{g C}{\text{mol C}} \right|}{4 \left[ \text{mole N} \right] \cdot 14 \left[ \frac{g N}{\text{mol N}} \right]} = 0.00286 \left[ \frac{g O_2}{\text{mg N}} \right]$$
(10)

W przypadku, gdy stężenie metanu w warstwie anaerobowej osadów dennych było zbyt niskie, aby nastąpiło jego 100-procentowe nasycenie, tzn. spełniony był warunek  $J_{CH4,T} < 2K_{L12}C_s$ , metan w formie gazu nie powstawał. Wtedy cały metan opuszczający warstwę anaerobową osadów pozostawał w formie rozpuszczonej ( $J_{CH4,d}$ ), zgodnie z równaniem:

$$J_{CH4,T} = J_{CH4,d} \tag{11}$$

W takich warunkach, zasada zachowania masy w warstwie aerobowej osadów dennych, wyznaczona dla metanu, była opisana równaniem:

$$H_{1} \frac{dCH_{4,1}}{dt} = J_{CH_{4,d}} + s \cdot \left(c_{f} - CH_{4,1}\right) - \frac{k_{CH_{4,1}}^{2}}{s} \cdot \theta_{CH_{4}}^{T-20} \cdot CH_{4,1}$$
(12) gdzie:

 $H_1$  – miąższość warstwy aerobowej osadów dennych [m],  $CH_{4,1}$  – stężenie metanu w warstwie aerobowej osadów dennych [g O<sub>2</sub>·m<sup>-3</sup>], dla stanu ustalonego wyznaczone z równania:

$$CH_{4,1} = \frac{J_{CH4,d} + s \cdot c_f}{s + \frac{k_{CH4,1}^2}{s} \cdot \theta_{CH4}^{T-20}}$$
(13)

 $k_{CH4,1}$  – tempo przebiegu utleniania metanu w warstwie aerobowej osadów [m·doba<sup>-1</sup>],

 $\theta_{CH4}$  – współczynnik korekty szybkości reakcji utleniania metanu, uzależniony od temperatury wody,

 s – współczynnik wymiany masy pomiędzy wodą, a warstwą aerobową osadów dennych [m·doba⁻¹].

W przypadku, gdy stężenie metanu w warstwie anaerobowej osadów dennych było wystarczająco wysokie, aby nastąpiło jego 100-procentowe nasycenie w wodzie, tzn. spełniony był warunek  $J_{CH4,T} \ge 2K_{L12}C_s$ , wtedy powstawał metan w formie gazu. W takich warunkach strumień metanu opuszczający warstwę anaerobową osadów został opisany równaniem:

$$J_{CH4,T} = \frac{J_{CH4,d}^2}{2K_{L12}C_s}$$
(14)

gdzie:

J<sub>CH4,d</sub> – strumień masy rozpuszczonego metanu powstałego w warstwie anaerobowej osadów dennych, wyrażony w ekwiwalentach tlenowych [g O<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>],  $C_s$  – stężenie metanu przy jego 100-procentowym nasyceniu, wyrażone w ekwiwalentach tlenowych [mg O<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>], wyznaczone z równania:

$$C_s = 100 \cdot \left(1 + \frac{h}{10}\right) \cdot \left(1,024\right)^{20-T}$$
 (15)

W ostatecznym rozrachunku strumień masy metanu przedostający się z warstwy aerobowej osadów dennych do toni wodnej został opisany równaniem:

$$J_{CH_4} = s \cdot \left( CH_{4,1} - c_f \right) \tag{16}$$

### 3.5. Zapotrzebowanie osadów dennych w tlen

Zapotrzebowanie osadów dennych w tlen (ang. *Sediment Oxygen Demand*) to suma tlenu skonsumowanego w procesach utleniania metanu oraz nitryfikacji azotu amonowego, zachodzących w warstwie aerobowej osadów dennych [g  $O_2 \cdot m^{-2} \cdot doba^{-1}$ ], zgodnie z równaniem [7]:

$$SOD = \frac{k_{CH4,1}^{2}}{s} \cdot \theta_{CH4}^{T-20} \cdot CH_{4,1} + r_{on} \cdot \frac{k_{NH4,1}^{2}}{s} \cdot \theta_{NH4}^{T-20} \cdot \frac{k_{NH4,1}^{2}}{s} \cdot \frac{k_$$

#### 3.6. Azot amonowy

Zasada zachowania masy w obydwu warstwach osadów dennych, wyznaczona dla azotu amonowego, została opisana równaniami [7]:

$$H_{1} \frac{dNH_{4,1}}{dt} = \omega_{12} \cdot \left( f_{pa2} \cdot NH_{4,2} - f_{pa1} \cdot NH_{4,1} \right) + K_{L12} \cdot \left( f_{da2} \cdot NH_{4,2} - f_{da1} \cdot NH_{4,1} \right) - w_{2} \cdot NH_{4,1} + s \cdot \left( \frac{N_{A}}{1000} - f_{da1} \cdot NH_{4,1} \right) - f_{da1} \cdot NH_{4,1} \cdot \theta_{NH4}^{T-20} \cdot \left( \frac{k_{NH4,1}^{2}}{s} \right) \cdot \left( \frac{K_{NH4}}{K_{NH4} + NH_{4,1}} \right) \cdot \left( \frac{o}{2K_{NH4,02} + o} \right)$$
(18)

$$H_{2} \frac{dNH_{4,2}}{dt} = J_{N} + \omega_{12} \cdot \left(f_{pa1} \cdot NH_{4,1} - f_{pa2} \cdot NH_{4,2}\right) + K_{L12} \cdot \left(f_{da1} \cdot NH_{4,1} - f_{da2} \cdot NH_{4,2}\right) + w_{2} \cdot \left(NH_{4,1} - NH_{4,2}\right)$$
(19)

gdzie:

1 . . . .

 ω<sub>12</sub> – współczynnik wymiany masy (wywołanej zjawiskiem bioturbacji) pomiędzy warstwą aerobową i anaerobową osadów dennych [m·doba<sup>-1</sup>], wyznaczony z równania:

$$\omega_{12} = \left(\frac{D_p \cdot \theta_{Dp}^{T-20}}{H_2}\right) \cdot \left(\frac{POC_{2,G1}}{r_{oc} \cdot POC_R}\right) \cdot \left(\frac{o}{K_{M,Dp} + o}\right)$$
(20)

gdzie:

- D<sub>p</sub> współczynnik dyfuzji wywołanej bioturbacją [m<sup>2</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- $\theta_{Dp}$  współczynnik korekty w/w dyfuzji, uzależniony od temperatury wody,
- $POC_R$  stężenie w warstwie anaerobowej osadów nietrwałej frakcji węgla organicznego pochodzącego z detrytusu (występującego w postaci zawiesiny w roztworze wodnym), wywołane bioturbacją [g C·m<sup>-3</sup>],
- $K_{M,Dp}$  stała połowicznego nasycenia osadów dennych tlenem, na skutek bioturbacji [g O<sub>2</sub>·m<sup>-3</sup>],
- $NH_{4,1}$  sumaryczne stężenie wszystkich form azotu amonowego w warstwie aerobowej osadów dennych [g N·m<sup>-3</sup>],
- NH<sub>4,2</sub> sumaryczne stężenie wszystkich form azotu amonowego w warstwie anaerobowej osadów dennych [g N·m<sup>-3</sup>],
- $k_{NH4,1}$  tempo przebiegu nitryfikacji w warstwie aerobowej osadów dennych [m·doba<sup>-1</sup>],
- $\theta_{NH4}$  współczynnik korekty tempa przebiegu nitryfikacji w warstwie aerobowej osadów dennych, uzależniony od temperatury wody,
- $K_{NH4}$  stała połowicznego nasycenia azotem amonowym osadów dennych w warstwie aerobowej [g N·m<sup>-3</sup>],
- $K_{NH4,O2}$  stała połowicznego nasycenia tlenem osadów dennych w warstwie aerobowej [g N·m<sup>-3</sup>],
- $J_N$  strumień masy azotu organicznego przechodzącego z toni wodnej do osadów dennych w postaci detrytusu [g N·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- $f_{da1}, f_{da2}$  frakcja azotu amonowego rozpuszczonego w wodzie, odpowiednio w warstwie aerobowej oraz anaerobowej, wyznaczona ze wzorów:

$$f_{da1} = \frac{1}{1 + m_1 \cdot \pi_{a1}}$$
(21)

$$f_{da2} = \frac{1}{1 + m_2 \cdot \pi_{a2}}$$
(22)

gdzie:

- $m_1, m_2$  stężenie cząstek stałych w osadach dennych, odpowiednio w warstwie aerobowej oraz anaerobowej [g D·m<sup>-3</sup>],
- $\pi_{a1}$ ,  $\pi_{a2}$  współczynnik rozdziału dla azotu amonowego, odpowiednio w warstwie aerobowej oraz anaerobowej [g D·m<sup>-3</sup>],
- $f_{pa1}, f_{pa2}$  frakcja nie rozpuszczonego azotu amonowego (w formie zawiesiny unoszącej się w wodzie), odpowiednio w warstwie aerobowej oraz anaerobowej, wyznaczona z równań:

$$f_{pa1} = 1 - f_{da1} \tag{23}$$

$$f_{pa2} = 1 - f_{da2} \tag{24}$$

 $K_{L12}$  – współczynnik dyfuzyjnej wymiany masy z wodą uwięzioną w porach cząstek materii, zachodzącej pomiędzy warstwą aerobową i anaerobową [m·doba<sup>-1</sup>], wyznaczony ze wzoru:

$$K_{L12} = \frac{2D_d \cdot \theta_{Dd}^{T-20}}{H_2}$$
(25)

gdzie:

- $D_d$  współczynnik dyfuzji zw. z wodą uwięzioną w porach cząstek materii [m²·doba-¹],
- $\theta_{Dd}$  współczynnik korekty tempa ww. dyfuzji, uzależniony od temperatury wody.

Strumień masy azotu amonowego przedostający się z warstwy aerobowej osadów dennych do toni wodnej został opisany równaniem:

$$J_{NH4} = s \cdot \left( f_{da1} \cdot NH_{4,1} - \frac{N_A}{1000} \right)$$
(26)

### 3.7. Azotany(V)

Zasada zachowania masy w obydwu warstwach osadów dennych, wyznaczona dla azotanów(V), została opisana równaniami [7]:

$$H_{1} \frac{dNO_{3,1}}{dt} = K_{L12} \cdot \left(NO_{3,2} - NO_{3,1}\right) - w_{2} \cdot NO_{3,1} + s\left(\frac{N_{N}}{1000} - NO_{3,1}\right) + f_{da1} \cdot NH_{4,1} \cdot \theta_{NH4}^{T-20} \cdot \left(\frac{k_{NH4,1}^{2}}{s}\right) \cdot (27)$$

$$\frac{K_{NH4}}{K_{NH4} + NH_{4,1}} \cdot \left(\frac{O}{2K_{NH4,O2} + O}\right) - NO_{3,1} \cdot \theta_{NO3}^{T-20} \cdot \left(\frac{k_{NO3,1}^{2}}{s}\right)$$

$$H_{2} \frac{dNO_{3,2}}{dt} = J_{N} + K_{L12} \cdot \left(NO_{3,1} - NO_{3,2}\right) + \\ + w_{2} \cdot \left(NO_{3,1} - NO_{3,2}\right) - k_{NO3,2} \cdot NO_{3,2} \cdot \theta_{NO3}^{T-20}$$
(28)

gdzie:

- $NO_{3,1}$  stężenie azotanów(V) w warstwie aerobowej osadów dennych [g N·m<sup>-3</sup>],
- NO<sub>3,2</sub> stężenie azotanów(V) w warstwie anaerobowej osadów [g N·m<sup>-3</sup>],
- $k_{NO3,1}$  tempo przebiegu denitryfikacji w warstwie aerobowej osadów [m·doba<sup>-1</sup>],
- $k_{NO3,2}$  tempo przebiegu denitryfikacji w warstwie anaerobowej osadów [m·doba<sup>-1</sup>],
- $\theta_{NO3}$  współczynnik korekty tempa przebiegu denitryfikacji w warstwie aerobowej i anaerobowej osadów, uzależniony od temperatury wody.

Strumień masy azotu azotanowego(V) przedostający się z warstwy aerobowej osadów dennych do toni wodnej został opisany równaniem:

	• •			•			• •				•		
Odcinek Biebrzy					Prę	dkość op [	adania na m∙doba <sup>-1</sup>	dno cząs ]	a ebrzy	dna iny(V)	dna rzebo- r tlen	kacji go(V) a <sup>-1</sup> ]	
L.p.	p. Od przekroju do przekroju	Długość odcinka [km]	Kolejny km biegu Biebrzy od ujścia do Narwi		ot organiczny	Fosfor organiczny	Fosfor mineralny	Detrytus	toplankton	Powierzchni Ikowita dna Bi [m²]	6 powierzchni itujący fosfora	% powierzchni ierujący zapot anie osadów w	empo denitryfi otu azotanowe przy dnie [dob
			Od	Do	Az				ш.	ca	em	ger "	az
1	Przekrój 1-3	8,063	50,702	42,639	1,5	1,5	2,0	1,5	1,5	82646	50	50	51
2	Przekrój 3-5	6,869	42,639	35,770	1,5	1,5	2,5	2,0	2,0	120207	50	50	64
3	Przekrój 5-7	5,527	35,770	30,243	1,0	1,5	2,5	2,0	2,0	116067	40	40	54
4	Przekrój 7-8	7,649	30,243	22,594	1,0	1,5	2,5	2,0	2,0	151068	40	40	28
5	Przekrój 8-10	6,641	22,594	15,953	2,5	2,5	3,5	2,5	2,5	104596	50	50	52
6	Przekrój 10-12	5,397	15,953	10,556	2,0	2,0	3,0	2,0	2,0	107940	60	60	56
7	Przekrój 12-15	7,304	10,556	3,252	2,0	2,0	2,5	2,0	2,0	155210	55	55	53

Tab. 1. Wyniki kalibracji parametrów obliczeniowych w modelu interakcji osady denne-woda dla symulacji 29 lipca 2007 r.

Tab. 2. Wyniki kalibracji parametrów obliczeniowych w modelu interakcji osady denne-woda dla symulacji 25 września 2007 r.

Odcinek Biebrzy					Prę	dkość op l	adania na [m∙doba <sup>-1</sup>	dno cząs ]	owita n²]	dna iny(V)	dna rzebo- r tlen	kacji go(V) a <sup>-1</sup> ]	
L.p.	Od przekroju do przekroju	Długość odcinka [km]	Kolejny km biegu Biebrzy od ujścia do Narwi		ot organiczny Fosfor organiczny	Fosfor mineralny	Detrytus	itoplankton	wierzchnia całk dna Biebrzy [m	% powierzchni ( nitujący fosfora	% powierzchni nerujący zapotr anie osadów w	empo denitryfi otu azotanowe przy dnie [doba	
			Od	Do	Az					Po	en	ge ⊗e	az 1
1	Przekrój 1-2	2,941	50,702	47,761	2,5	2,5	3,0	2,0	2,0	46321	50	50	22
2	Przekrój 2-3	5,122	47,761	42,639	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	108842	50	50	34
3	Przekrój 3-4	4,065	42,639	38,574	2,0	2,0	2,5	2,0	2,0	67072	50	50	24
4	Przekrój 4-5	2,804	38,574	35,770	1,5	1,5	2,5	2,0	2,0	51173	50	50	24
5	Przekrój 5-6	3,171	35,770	32,599	1,5	2,0	2,5	2,0	2,0	78482	50	50	22
6	Przekrój 6-7	2,356	32,599	30,243	1,0	1,5	2,5	2,0	2,0	59489	50	50	14
7	Przekrój 7-8	7,649	30,243	22,594	1,0	1,5	2,5	2,0	2,0	156804	50	50	13
8	Przekrój 8-9	2,686	22,594	19,908	1,0	1,5	2,5	1,5	1,5	51705	50	50	16
9	Przekrój 9-10	3,955	19,908	15,953	1,5	2,0	3,0	1,0	1,0	62291	50	50	19
10	Przekrój 10-11	2,515	15,953	13,438	1,5	2,5	3,5	1,5	1,5	57216	40	60	19
11	Przekrój 11-12	2,882	13,438	10,556	2,5	2,5	3,5	2,0	2,0	87901	40	60	44
12	Przekrój 12-13	2,261	10,556	8,295	2,5	2,0	3,5	2,0	2,0	50872	40	60	36
13	Przekrój 13-14	2,807	8,295	5,488	2,0	1,5	3,0	2,0	2,0	44912	30	70	23
14	Przekrój 14-15	2,236	5,488	3,252	2,0	1,5	2,0	1,5	1,5	34099	30	70	16

Tab. 3. Wyniki kalibracji parametrów obliczeniowych w modelu interakcji osady denne–woda dla symulacji 23 lipca 2008 r.

Odcinek Biebrzy					Prę	dkość op [	adania na m∙doba <sup>-1</sup>	dno cząs ]	a ebrzy	dna iny(V)	dna rzebo- v tlen	ikacji ego(V) a <sup>-1</sup> ]	
L.p.	Od przekroju do przekroju	Długość odcinka [km]	Kolejny km biegu Biebrzy od ujścia do Narwi		ot organiczny	Fosfor organiczny	Fosfor mineralny	Detrytus	itoplankton	Powierzchni łkowita dna Bi [m²]	% powierzchni iitujący fosfora	% powierzchni nerujący zapot anie osadów v	empo denitryf otu azotanowe przy dnie [dob
			Od	Do	Azo				<b>"</b>	ca	en	S S S	az
1	Przekrój 1-2	2,941	50,702	47,761	2,0	3,0	3,0	2,0	2,0	63967	60	40	36
2	Przekrój 2-3	5,122	47,761	42,639	2,0	2,5	3,0	2,0	2,0	98598	70	30	22
3	Przekrój 3-4	4,065	42,639	38,574	2,0	3,0	3,0	2,0	2,0	60975	75	25	13
4	Przekrój 4-5	2,804	38,574	35,770	2,0	2,5	3,0	2,0	2,0	54678	85	15	10
5	Przekrój 5-6	3,171	35,770	32,599	2,0	1,5	3,0	2,0	2,0	78482	80	20	10
6	Przekrój 6-7	2,356	32,599	30,243	1,5	1,5	2,5	1,5	1,5	57133	75	25	13
7	Przekrój 7-8	7,649	30,243	22,594	1,5	1,5	3,0	1,5	1,5	147243	65	35	13
8	Przekrój 8-9	2,686	22,594	19,908	1,5	2,0	2,5	2,0	2,0	49691	70	30	12
9	Przekrój 9-10	3,955	19,908	15,953	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	66246	65	35	13
10	Przekrój 10-11	2,515	15,953	13,438	2,0	2,0	2,5	2,0	2,0	59102	55	45	10
11	Przekrój 11-12	2,882	13,438	10,556	1,5	1,5	2,5	1,5	1,5	87180	55	45	7
12	Przekrój 12-13	2,261	10,556	8,295	1,5	1,5	2,5	1,5	1,5	49742	65	35	8
13	Przekrój 13-14	2,807	8,295	5,488	2,0	2,5	3,0	2,0	2,0	40000	60	40	12
14	Przekrój 14-15	2,236	5,488	3,252	2,0	2,0	2,5	2,0	2,0	32981	55	55	17

$$J_{NO_3} = s \cdot \left( NO_{3,1} - \frac{N_N}{1000} \right)$$
(29)

#### 3.8. Fosforany(V)

Zasada zachowania masy w obydwu warstwach osadów dennych, wyznaczona dla fosforanów(V), została opisana równaniami [7]:

$$H_{1} \frac{dPO_{4,1}}{dt} = \omega_{12} \cdot \left( f_{pp2} \cdot PO_{4,2} - f_{pp1} \cdot PO_{4,1} \right) + K_{L12} \cdot \left( f_{dp2} \cdot PO_{4,2} - f_{dp1} \cdot PO_{4,1} \right) - w_{2} \cdot PO_{4,1} + (30) + s \cdot \left( \frac{P_{M}}{1000} - f_{da1} \cdot PO_{4,1} \right)$$

$$H_{2} \frac{dPO_{4,2}}{dt} = J_{P} + \omega_{12} \cdot \left(f_{pp1} \cdot PO_{4,1} - f_{pp2} \cdot PO_{4,2}\right) + K_{L12} \cdot \left(f_{dp1} \cdot PO_{4,1} - f_{dp2} \cdot PO_{4,2}\right) + w_{2} \cdot \left(PO_{4,1} - PO_{4,2}\right)$$
(31)

gdzie:

- PO<sub>4,1</sub> stężenie fosforanów(V) w warstwie aerobowej osadów dennych [g P·m<sup>-3</sup>],
- PO<sub>4,2</sub> stężenie fosforanów(V) w warstwie anaerobowej osadów [g P·m<sup>-3</sup>],
- $J_p$  strumień masy fosforu organicznego przechodzącego z toni wodnej do osadów w postaci detrytusu [g P·m<sup>-2</sup>·doba<sup>-1</sup>],
- $f_{dp1}, f_{dp2}$  frakcja fosforu mineralnego rozpuszczonego w wodzie, odpowiednio w warstwie aerobowej oraz

#### dokończenie ze strony 18

formę piasku, której specyfika umożliwi oczyszczanie wody z takich zanieczyszczeń jak arsen, trójchloroetylen i inne.

### 7. Literatura

- [1] ONZ: http://www.un.org/en/globalissues/water/ dostęp z dn. 23.04.2013
- [2] WHO: Guidelines for Drinking-water quality, fourth edition. Geneve, 2011.
- [3] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, Dz.U.10.72.466.
- [4] Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi z 29 marca 2007 r., Dz.U.07.61.417.
- [5] Zaremba M. L., Borowski J., Podstawy mikrobiologii lekarskiej, Warszawa, PZWL 1994.
- [6] Drejewicz H., Stężycka E., Łakomy R., Jakość wody z ujęć niepewnych po za-

stosowaniu prostych metod uzdatniania wody, Zakażenia 2/2010.

- [7] Anielak A. M., Uboczne produkty procesu utleniania i dezynfekcji. "Technologia Wody" nr 6/2012.
- [8] McGuigan K. G., Conroy R. M., Mosler H. J., Preez Mc, Ubomba-Jaswa E., Fernandez-Ibañezd P., Solar water disinfection (SODIS): A review from benchtop to roof-top. "Journal of Hazardous Materials" t. 235–236, 2012.
- [9] Sommer B., Marino A., Solarte Y., Salas M. L., Dierolf C., Valiente C., Mora D., Rechsteiner R., Setter P., Wirojanagud W., Ajarmeh H., Al-Hassan A., Wegelin M., SODIS – an emerging water treatment process, "Journal of water supply research and technology" t. 46, nr 3, 1997.
- [10] https://www.google.pl/search?q=sodis&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa= X&ei=STKMUbHoMsXsswaAjoCICA&v ed=oCDYQsAQ&biw=1262&bih=535 dostęp z dn. 23.04.13.
- [11] Oates P. M., Shanahan P., Polz M. F., Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti, "Water Research" 37/2003.

anaerobowej, wyznaczona ze wzorów:

$$f_{dp1} = \frac{1}{1 + m_1 \cdot \pi_{p1}} \tag{32}$$

$$f_{dp2} = \frac{1}{1 + m_2 \cdot \pi_{p2}} \tag{33}$$

gdzie:

- $\pi_{p_1}$ ,  $\pi_{p_2}$  współczynnik rozdziału dla fosforu mineralnego, odpowiednio w warstwie aerobowej oraz anaerobowej [g D·m<sup>-3</sup>],
- $f_{pp1}, f_{pp2}$  frakcja nie rozpuszczonego fosforu mineralnego (w formie zawiesiny unoszącej się w wodzie), odpowiednio w warstwie aerobowej oraz anaerobowej, wyznaczona ze wzorów:

$$f_{pp1} = 1 - f_{dp1} \tag{34}$$

$$f_{pp2} = 1 - f_{dp2} \tag{35}$$

Strumień masy fosforanów(V) przedostający się z warstwy aerobowej osadów dennych do toni wodnej został opisany równaniem:

$$J_{PO4} = s \cdot \left( PO_{4,1} - \frac{P_M}{1000} \right)$$
(36)

.....

Dokończenie w TW nr 7/2013

#### dr inż. Sebastian R. Bielak

Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej

Więcej publikacji nt. jakości wód powierzchniowych na stronie: www.sebastianbielak.pl

- [12] http://kopalniawiedzy.pl/dezynfekcja-solarna-sodis-paleczki-okreznicy-Escherichia-coli-limonka-sok,15659 dostęp z dn. 23.04.2013.
- [13] Aktualności ze świata: Czysta woda, "Rynek Instalacyjny" 9/2012.
- [14] Gao W., Majumder M., Alemany L. B., Narayanan T. N., Ibarra M. A., Pradhan Ajayan P. M., Engineered Graphite Oxide Materials for Application In Water Purification, "ACS Applied Materials & Interfaces" 3/2011.
- [15] Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, Grafen? Z każdego laboratorium!, Warszawa 2012.
- [16] Schmid P., Kohler M., Meierhofer R., Luzi S., Wegelin M., Does the reuse of PET bottles during solar water disinfection pose a health risk due to the migration of plasticisers and other chemicals into the water? "Water Research" 42(20)/2008.

#### mgr inż. Jakub Mazurkiewicz mgr inż. Aleksandra Sowińska

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej