

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

Część II

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

Part II

Sebastian R. Bielak

Streszczenie

W pracy omówiono problematykę jednowymiarowego modelowania matematycznego procesów biochemicznych i fizycznych zachodzących w korycie rzeczonym 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 Biebrzańkiego 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.

4. Kalibracja i weryfikacja modelu – dyskusja nad wynikami symulacji

Kalibracja matematycznego modelu interakcji osadów dennych z wodą polegała na dostosowaniu parametrów obliczeniowych definiujących procesy fizyczne i biochemiczne w rzece (takie jak np. tempo opadania na dno cząstek materii organicznej, tempo hydrolizy organicznych form azotu i fosforu, tempo nityfikacji azotu amonowego, wielkość emi-

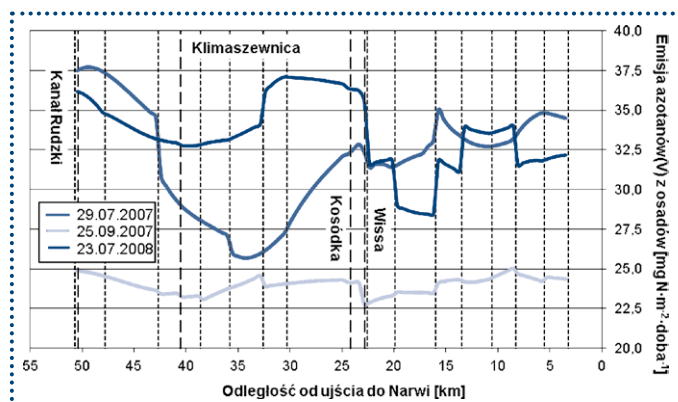
sji z osadów dennych mineralnych form azotu i fosforu, procent powierzchni dna generującej ubytki tlenu w wodzie itp.) do wartości parametrów jakościowych (NH_4 , NO_3 , PO_4 , CaCO_3 i in.), uzyskanych na podstawie analiz chemicznych próbek wody pobranych z Biebrzy Dolnej w punktach kontrolnych. Dla każdego odcinka Biebrzy kalibracja odbywała się metodą kolejnych przybliżeń, w których wartość parametrów obliczeniowych była szacowana w sposób pośredni w oparciu o procedurę numerycznego przybliżania wyników symulacji.

Do kalibracji modelu wykorzystano dane pochodzące z poborów próbek przeprowadzonych w lipcu oraz wrześniu 2007 r., natomiast dane z lipca 2008 r. zostały wykorzystane do weryfikacji wygenerowanych symulacji. Obli-

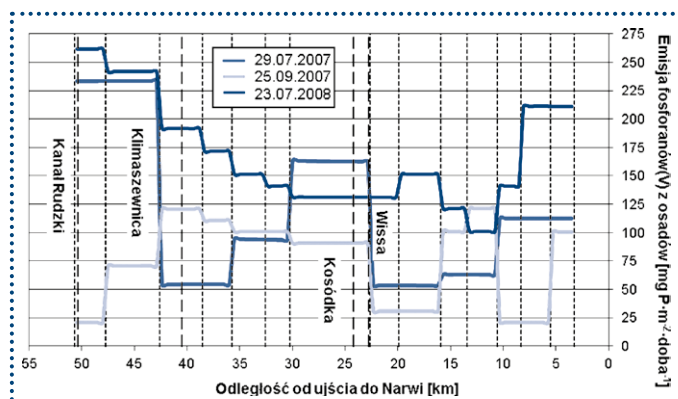
Artykuł jest kontynuacją tekstu zamieszczonego w numerze 6/2013 Technologii Wody

czenia numeryczne wykonywane były za pomocą metody łamanej Eulera, umożliwiającej przybliżone całkowanie równań różniczkowych zwyczajnych. Kalibracja modelu interakcji osadów dennych z wodą polegała w praktyce na wielokrotnym sprawdzaniu wyników obliczeń numerycznych, a następnie poddawaniu nieznacznym korektom wartości parametrów obliczeniowych. Wyniki kalibracji parametrów dotyczących osadów dennych zostały zamieszczone w tabelach 1-3, natomiast efekty poszczególnych symulacji przedstawiono na rysunkach 3-6.

Emisja azotanów(V) z osadów dennych do toni wodnej wynosiła w poszczególnych symulacjach (rys. 3): od 25,7 do 37,7 mg N·m⁻²·doba⁻¹ (29.07.2007), od 22,8 do 25 mg N·m⁻²·doba⁻¹ (25.09.2007) oraz od 28,4 do 37,1 mg N·m⁻²·doba⁻¹ (23.07.2008). Co ciekawe, pomimo diametralnie różnych warunków hydrologicznych panujących w lipcu 2007 r. („mokre” lato) oraz w lipcu 2008 r. („suche” lato) emisja azotanów(V) była na podobnym poziomie, podczas gdy we wrześniu 2007 r. była już zdecydowanie mniejsza. Równocześnie stężenia azotanów(V) w wodzie Biebrzy były najwyższe we wrześniu 2007 r. oraz najniższe w obydwu okresach letnich. Z pewnością to ostatnie zjawisko było skutkiem zwiększonego poboru w sezonie wegetacyjnym mineralnych form azotu przez roślinność wodną, która wykorzystuje ten pierwiastek jako podstawowy budulec swoich komórek.



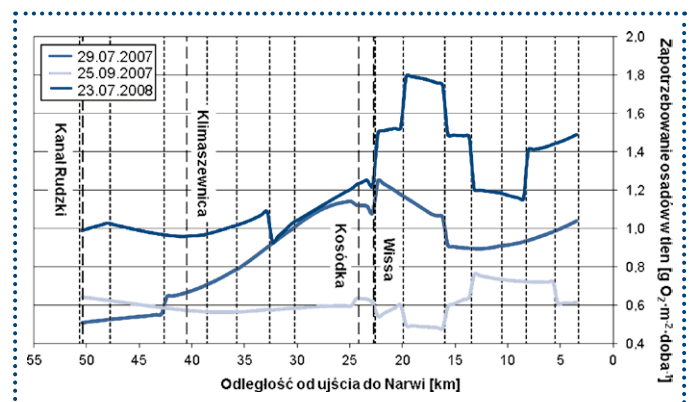
Rys. 3. Rozkład wielkości emisji azotanów(V) z osadów dennych do toni wodnej w poszczególnych symulacjach modelu Biebrzy Dolnej



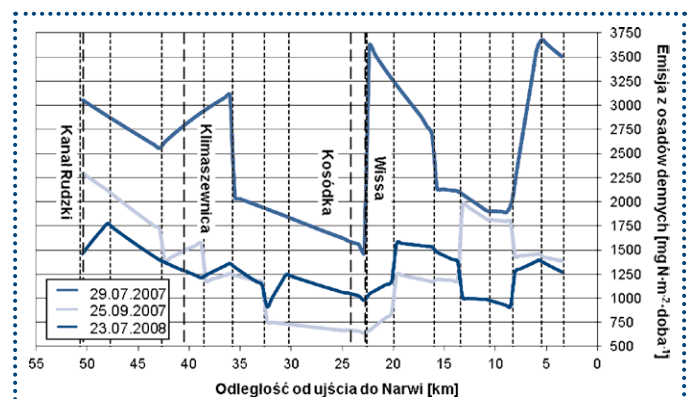
Rys. 5. Rozkład wielkości emisji fosforanów(V) z osadów dennych do toni wodnej w poszczególnych symulacjach modelu Biebrzy Dolnej

W odpowiedzi na zwiększony pobór azotanów(V) z wody układ woda-osady denne dążył do wyrównania stężeń tego związku pomiędzy tonią wodną, a warstwą wody dennej, znajdującej się tuż nad osadami. Im niższe było stężenie azotanów(V) w toni wodnej tym intensywniej uwalniały się one z osadów. Symulacja z września 2007 r. wykazała również niewielką zmienność wartości emisji azotanów(V) z osadów wzdłuż biegu Biebrzy, podczas gdy różnica pomiędzy wartością minimalną a maksymalną w pozostałych (letnich) symulacjach wynosiła na niektórych odcinkach nawet 12 mg N·m⁻²·doba⁻¹. Osady denne, jako wtórne źródło zasilania wód Biebrzy azotanami(V), w największym stopniu wpływały na jakość fizyczno-chemiczną rzeki w warunkach niskich stanów wody (lipiec 2008 r.), natomiast przy dużych przepływach (lipiec i wrzesień 2007 r.) wpływ ten nie był znaczący.

Zapotrzebowanie osadów dennych w tlen wynosiło w poszczególnych symulacjach (rys. 4): od 0,51 do 1,25 g O₂·m⁻²·doba⁻¹ (29.07.2007), od 0,48 do 0,76 g O₂·m⁻²·doba⁻¹ (25.09.2007) oraz od 0,93 do 1,8 g O₂·m⁻²·doba⁻¹ (23.07.2008). Wysokie zużycie tlenu w warstwie dennej koryta w miesiącach letnich wskazuje, że przy wyższej temperaturze wody w rzece (20-21°C) następuje intensyfikacja procesów konsumujących tlen, tj. mineralizacji materii organicznej oraz utleniania wydobywającego się z osadów dennych amoniaku i metanu.



Rys. 4. Rozkład wartości zapotrzebowania osadów dennych w tlen w poszczególnych symulacjach modelu Biebrzy Dolnej



Rys. 6. Rozkład wielkości emisji azotu amonowego z osadów dennych do toni wodnej w poszczególnych symulacjach modelu Biebrzy Dolnej

Tab. 4. Wyniki analiz chemicznych próbek wody z dna Biebrzy Dolnej

Oznaczany parametr	Numer próbki					
	1	2	3	4	5	6
Odczyn	8,0	8,0	8,1	8,1	8,1	8,1
Temperatura [°C]	20,2	19,8	20,2	20,5	20,8	20,2
Zasadowość ogólna [mg CaCO ₃ ·dm ⁻³]	227	216	220	223	222	220
Azot amonowy [mg N·dm ⁻³]	0,09	0,13	0,09	0,09	0,13	0,12
Amoniak [mg NH ₄ ·dm ⁻³]	0,10	0,15	0,10	0,10	0,15	0,14
Azot azotanowy(III) [mg N·dm ⁻³]	0,005	0,005	0,003	0,005	0,005	0,003
Azotany(III) [mg NO ₂ ·dm ⁻³]	0,016	0,016	0,010	0,016	0,016	0,010
Azot azotanowy(V) [mg N·dm ⁻³]	0,15	0,16	0,13	0,16	0,17	0,17
Azotany(V) [mg NO ₃ ·dm ⁻³]	0,66	0,71	0,58	0,71	0,75	0,75
Azot organiczny [mg N·dm ⁻³]	0,72	0,56	1,21	0,70	0,75	0,98
Azot Kjeldahla [mg N·dm ⁻³]	0,81	0,69	1,30	0,79	0,88	1,10
Azot ogólny [mg N·dm ⁻³]	0,965	0,855	1,433	0,955	1,055	1,273
Fosfor mineralny [mg P·dm ⁻³]	0,049	0,055	0,059	0,065	0,059	0,062
Fosforany(V) [mg PO ₄ ·dm ⁻³]	0,150	0,169	0,181	0,199	0,181	0,190
Fosfor organiczny [mg P·dm ⁻³]	0,049	0,035	0,051	0,045	0,051	0,048
Fosfor ogólny [mg P·dm ⁻³]	0,098	0,090	0,110	0,110	0,110	0,110

Analiza chemiczna próbek wody dennej, pobranych 23 lipca 2008 r. w sześciu punktach kontrolnych zlokalizowanych wzdłuż biegu Biebrzy Dolnej, wykazała, że średnie stężenia parametrów jakościowych były tam wyższe niż w toni wodnej, w tym: fosforu organicznego o 39%, amoniaku o 20%, azotanów(V) o 7%, odczynu o 0,2 oraz temperatury wody o 0,2-0,5°C (tabela 4).

Największy pobór tlenu przez osady dennie miał miejsce w lipcu 2008 r. (przy niskich stanach wody w korycie), jednak najniższe stężenia tlenu w toni wodnej zanotowano w lipcu 2007 r., w trakcie wysokich stanów. Uważa się, że w głębiej położonych warstwach osadów dennych rzek następuje beztlenowy rozkład nagromadzonych związków organicznych, w wyniku czego do toni wodnej zostaje wyemitowany strumień masy, składający się zazwyczaj ze związków azotu (69% udziału), metanu (17%) oraz dwutlenku węgla (14%) [6]. Zjawisko to może wywołać spadek stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie do tego stopnia, że na odcinkach rzeki o niewielkim przepływie wody nad osadami dennymi mogą występować znaczne niedobory tlenu, a nawet całkowity jego brak.

Nie jest wykluczone, że właśnie taka sytuacja miała miejsce w lipcu 2007 r. Skoro w niektórych miejscach Biebrzy stężenie tlenu w wodzie przy powierzchni wynosiło zaledwie 2-3 mg O₂·dm⁻³, a na całej długości rzeki mniej niż 5 mg O₂·dm⁻³, to przy dnie mogły wystąpić warunki zbliżone do beztlenowych. W warstwie dennej rzeki stężenie tlenu jest bowiem zawsze dużo niższe niż w wodzie znajdującej się kilkadziesiąt centymetrów powyżej niej [9], a przecież głębokość napelnienia w korycie Biebrzy sięgała wtedy nawet 4,3 m. Uważa się, że deficyt tlenu to typowy objaw eutrofizacji wód powierzchniowych [9], a jednym z jego skutków jest przewaga procesu przechodzenia fosforu mineralnego z osadów dennych do toni wodnej, zamiast w odwrotnym kierunku. Obserwuje się wtedy prawidłowość polegającą na tym, że im większy

jest deficyt tlenu tym szybciej fosforany(V) uwalniają się z osadów [10].

Emisja fosforanów(V) z osadów dennych do toni wodnej wynosiła w poszczególnych symulacjach (rys. 5) od 53 do 234 mg P·m⁻²·doba⁻¹ (29.07.2007), od 21 do 121 mg P·m⁻²·doba⁻¹ (25.09.2007) oraz od 101 do 262 mg P·m⁻²·doba⁻¹ (23.07.2008). Uważa się, że wartość emisji na poziomie ponad 100 mg P·m⁻²·doba⁻¹ jest już znaczna [10] i świadczy o istotnym zasilaniu wewnętrznym Biebrzy rozpuszczalnymi formami fosforu mineralnego. Co ciekawe, znaczne zasilanie toni wodnej fosforanami(V) miało miejsce głównie w okresie letnim, zarówno przy dobrym natlenieniu wody (lipiec 2008), jak również w warunkach niskich stężeń tlenu (lipiec 2007). Analogicznie jak w przypadku azotanów(V) zjawisko to mogło być efektem zwiększonego poboru z wody mineralnych form fosforu przez roślinność wodną, która wykorzystuje ten pierwiastek jako podstawowy budulec swoich komórek. Ponieważ układ woda-osady dennie dążył do wyrównania stężeń pomiędzy tonią wodną, a warstwą wody dennej fosforany(V) szybciej uwalniały się z osadów.

Czynnikiem ograniczającym tempo uwalniania się z osadów fosforu było stężenie azotanów(V) w wodzie dennej. Uważa się, że jeżeli nie przekracza ono wartości 0,1 mg N·dm⁻³ to przenikanie fosforanów(V) z osadów do toni wodnej przebiega bardzo intensywnie, natomiast prawie całkowicie zanika przy stężeniu ok. 1 mg N·dm⁻³ [5]. W obydwu lipcowych symulacjach największa emisja fosforanów(V) miała miejsce w początkowym odcinku Biebrzy Dolnej (od 51. do 48. km jej biegu licząc od ujścia do Narwi), do którego uchodzi Kanał Rudzki. Taki wynik może wskazywać, że ciek ten jest odpowiedzialny nie tylko za wzrost stężeń fosforu ogólnego w wodzie Biebrzy (co wykazała analiza wyników monitoringu jakości wód powierzchniowych Basenu Dolnego za lata 1993-2003)

[1], ale również powoduje odkładanie znacznych ilości tego pierwiastka w jej osadach dennych [2].

Emisja azotu amonowego (w postaci niezdysocjowanego amoniaku NH_3 lub jonu NH_4^+) z osadów dennych do toni wodnej wynosiła w poszczególnych symulacjach (rys. 6) od 1,5 do 3,7 $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ (29.07.2007), od 0,6 do 2,3 $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ (25.09.2007) oraz od 0,9 do 1,8 $\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ (23.07.2008). Można było zauważyć wyraźną zbieżność pomiędzy wielkością emisji azotu amonowego, a jego stężeniem w toni wodnej Biebrzy, co wskazuje, że osady denne są istotnym źródłem tej formy azotu w rzece. Wpływ zasilania z osadów na stężenia azotu amonowego w wodzie był najbardziej widoczny w przypadku symulacji z lipca 2008 r., a więc przy niskim stanie wody w korycie. Zjawisko przenikania różnych form azotu z osadów dennych do toni wodnej Biebrzy jest ważnym czynnikiem wpływającym na jakość wód powierzchniowych, bowiem główne zasoby azotu (ok. 90% jego masy) występujące w danym ekosystemie rzeczonym są zmagazynowane właśnie w osadach dennych [10].

5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły dużą przydatność programu Qual2k do symulacji wpływu osadów dennych na jakość fizyczno-chemiczną wody w korycie rzeczonym, który w przypadku rzeki Biebrzy okazał się być znaczący. Przedstawione wcześniej szczegółowe analizy efektów symulacji można podsumować w następujący sposób:

1. Obok biochemicznych procesów utleniających, które zachodziły bezpośrednio w toni wodnej, drugim najpoważniejszym źródłem ubytków tlenu w Biebrzy było znaczne zapotrzebowanie osadów dennych w ten pierwiastek. Wynikało ono z biologicznego rozkładu nagromadzonej na dnie materii organicznej, pochodzącej głównie z okolicznych torfowisk, oraz utleniania produktów tego rozkładu, tj. metanu i mineralnych form azotu (azotany(III), azot azotanowy).
2. Największy pobór tlenu przez osady denne miał miejsce w okresie letnim. Okazało się, że w przypadku wysokich stanów wody w rzece oraz temperaturze wody przekraczającej 20°C intensywność procesów biochemicznych konsumujących tlen w osadach dennych i toni wodnej była na tyle duża, że powodowała spadek stężenia tego pierwiastka w wodzie poniżej wartości $5 \text{ mg O}_2\cdot\text{dm}^{-3}$, w tym lokalnie nawet do $2\text{-}3 \text{ mg O}_2\cdot\text{dm}^{-3}$, co jest wartością letalną dla wielu gatunków ryb. Takie zjawisko jest wysoce niekorzystne, a nawet niebezpieczne dla ichtiofauny występującej w Biebrzy, w szczególności dla ryb karpiowatych żerujących w strefie dennej koryta.
3. Porównanie jakości fizyczno-chemicznej wody w warstwie przypowierzchniowej oraz dennej Biebrzy wykazało, że średnie stężenia analizowanych parametrów były wyższe w pobliżu dna, w tym: fosforu organicznego o 39%, amoniaku o 20%, azota-

nów(V) o 7%, odczynu o 0,2 oraz temperatury wody o $0,2\text{-}0,5^\circ\text{C}$. Taki wynik wyraźnie wskazuje, że osady denne zasilają toni wodną strumieniem masy składającym się w głównej mierze z nieorganicznych form azotu, węgla i fosforu.

4. Osady denne Biebrzy okazały się być istotnym, tzw. wtórnym, źródłem zasilania rzeki w mineralne formy fosforu. Zjawisko intensywne przechodzenia fosforu – w postaci fosforanów(V) – z osadów dennych do toni wodnej było szczególnie widoczne w sezonie wegetacyjnym roślin i spowodowane było co najmniej dwoma czynnikami:
 - dążeniem układu woda-osady denne do wyrównania wewnątrz rzeki stężeń mineralnych form fosforu, które są przyswajalne dla roślin wodnych,
 - niskim stężeniem tlenu w warstwie dennej, które przyspieszało cały proces.
 Największy wpływ osadów dennych na wzbogacanie rzeki w fosfor zaznaczył się w przypadku niskich stanów wody w korycie.
5. Najwyższą wartość emisji fosforanów(V) z osadów dennych do toni wodnej zanotowano w górnym odcinku Biebrzy Dolnej, w pobliżu ujścia Kanału Rudzkiego. Może to oznaczać, że ciek ten jest odpowiedzialny nie tylko za wzrost stężeń fosforu mineralnego i ogólnego w Biebrzy (co wykazała analiza wyników monitoringu jakości wody), ale również za odkładanie znacznych ilości tego pierwiastka w jej osadach dennych.
6. Porównanie dobowych ładunków azotu amonowego, jakie przedostawały się do Biebrzy z mokradeł (źródło obszarowe), dopływów (źródła punktowe) oraz osadów dennych (źródło liniowe) wykazało, że to właśnie osady denne są najpoważniejszym źródłem zasilania rzeki w azot amonowy, zarówno w postaci niezdysocjowanego amoniaku NH_3 , jak również jonu NH_4^+ . Przyczyną obecności w osadach dennych znacznych ilości azotu amonowego jest zapewne proces amonifikacji, w którym – w wyniku rozkładu przez drobnoustroje nagromadzonych związków organicznych – powstaje amoniak.
7. Osady denne okazały się być również istotnym źródłem zasilania rzeki w azotany(V). Ich emisja, podobnie jak miało to miejsce w przypadku fosforanów(V), była najwyższa w sezonie wegetacyjnym i wynikała z wyrównywania się stężeń w pionowym profilu rzeki, tj. w przestrzeni pomiędzy zwierciadłem wody a dnem, na skutek poboru azotanów(V) przez roślinność wodną. Największy wpływ osadów dennych na wzbogacanie rzeki w tę formę azotu zaznaczył się w przypadku niskich stanów wody w korycie.

6. Literatura

- [1] Bielak S. R., *Eutrofizacja wód powierzchniowych Biebrzańskiego Parku Narodowego*. „Ekoprofit” nr 1, Katowice 2005.

► dokończenie na stronie 37