

Dr inż. Marcin Sidoruk  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Katedra Gospodarki Wodnej, Klimatologii  
i Kształtowania Środowiska  
ul. Plac Łódzki 2  
10-719 Olsztyn  
e-mail: marcin.sidoruk@uwm.edu.pl

**Autoreferat w języku polskim**

Olsztyn 2019

**SPIS TREŚCI**

1. Imię i Nazwisko .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe .....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. 2016 r. Poz. 882 ze zm. W dz. U. Z 2016 r. Poz. 1311.) .....	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego .....	5
4.2. Wykaz prac składających się na osiągnięcie naukowe .....	5
4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz ze wskazaniem ich ewentualnego wykorzystania .....	6
4.3.1 Wstęp .....	6
4.3.2 Metodyka .....	8
4.3.3. Wyniki badań .....	11
4.3.4. Wnioski .....	17
4.3.5. Podsumowanie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe .....	19
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych .....	22
5.1. Wpływ zagospodarowania zlewni na funkcjonowanie jezior na obszarach Młodoglacjalnych .....	22
5.2. Funkcjonowanie starorzeczy na obszarach pojeziernych .....	24
5.3. Jakość konsumpcyjna pstrąga tęczowego z technologii stosowanych w Polsce ....	26

**AUTOREFERAT**  
**PODSUMOWANIE OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH I ZAWODOWYCH**

**1. Imię i Nazwisko**

MARCIN SIDORUK

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:**

- **2001 r. - inżynier ochrony środowiska**, specjalność: systemy ochrony wody, powietrza, gleby i krajobrazu. Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Tytuł pracy: „*Stan troficzny niektórych jezior Pojezierza Augustowskiego*” - opiekun naukowy: dr inż. Mirosław Skorbiłowicz

- **2003 r. - magister ochrony środowiska**, specjalność: kształtowanie i ochrona środowiska. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania środowiska i Rolnictwa

Tytuł pracy: *Funkcjonowanie starorzeczy w krajobrazie rolniczym doliny środkowej Łyny*” - opiekun naukowy: prof. dr hab. Józef Koc

- **2009 r. - doktor nauk rolniczych w zakresie kształtowania środowiska**. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa

Tytuł pracy: „*Wpływ zlewni na obciążenie jezior biogenami i procesy ich akumulacji*”

Promotor: prof. dr hab. Józef Koc

Recenzenci: dr hab. inż. Józef Mosiej, prof. SGGW  
dr hab. Jerzy Dziejowski, prof. UWM

- **2018 r. - magister inżynierii środowiska**, specjalność: sieci i systemy sanitarne. Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Tytuł pracy: „*Gospodarka ściekowa i osadowa na przykładzie oczyszczalni ścieków w Braniewie*” - opiekun naukowy: dr hab. Dariusz Boruszko

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- **Studia doktoranckie:** od 06.10.2004 r. do 30.11.2008 r. - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska.
- **Asystent:** od 01.12.2008 r. do 30.11.2009 r. - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska.
- **Adiunkt:** od 01.12.2009 r. do chwili obecnej - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, od 1.01.2015 r. zmiana nazwy na: Katedra Gospodarki Wodnej, Klimatologii i Kształtowania Środowiska.

### 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. 2016 r. Poz. 882 ze zm. W dz. U. Z 2016 r. Poz. 1311.)

*Osiągnięciem naukowym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. 2016 r. Poz. 882 ze zm. w dz. U. Z 2016 r. Poz. 1311.) jest cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.*

#### 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

**Wpływ technologii gospodarowania wodą w hodowli pstrąga tęczowego  
(*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum 1792) na jakość wód powierzchniowych**

#### 4.2. Wykaz prac składających się na osiągnięcie naukowe

1. **Sidoruk M.** 2019. Effect of rainbow trout production in the two-stage cascade system on water quality. *Journal of Elementology*. 24(2):739-753. DOI: 10.5601/jelem.2018.23.4.1749.  
[15 pkt. MNiSW, IF<sub>(2017)</sub>=0,684]
2. **Sidoruk M.**, Cymes I. 2018. Effect of water management technology used in trout culture on water quality in fish ponds. *Water*. 10:1264. DOI:10.3390/w10091264.  
[30 pkt. MNiSW, IF<sub>(2017)</sub>=2,069]
3. **Sidoruk M.**, Koc J., Cymes I., Rafałowska M., Rochwerger A., Sobczyńska-Wójcik K., Skibniewska K. A., Siemianowska E., Guziur J., Szarek J. 2014. Risk assessment of surface waters associated with water circulation technologies on trout farms. *Journal of Ecological Engineering*. 15(3):76–81. DOI: 10.12911/22998993.  
[7 pkt. MNiSW]
4. **Sidoruk M.** 2012. Wpływ chowu pstrąga w stawach ziemnych na właściwości fizyczne i chemiczne wód powierzchniowych. *Inżynieria Ekologiczna*. 31:101-110.  
[5 pkt. MNiSW]

Liczba punktów za publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego, zgodnie z punktacją MNiSW w latach wydania publikacji wynosi **57**, a ich całkowity IF – **2,753**.

### **4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz ze wskazaniem ich ewentualnego wykorzystania**

#### **4.3.1. Wstęp**

W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się intensywny rozwój rybactwa. Wzrost produkcji żywności w akwakulturze jest znacznie szybszy niż w innych sektorach wytwarzających żywność pochodzenia zwierzęcego. Globalna produkcja ryb osiągnęła poziom około 170 milionów ton (De Leo et al., 2014; FAO,2018). Akwakultura stanowi prawie połowę światowej produkcji ryb i jest jednym z najszybciej rozwijających się sektorów produkcji żywności pochodzenia zwierzęcego. Przy odpowiednim zastosowaniu środków technicznych produkcja ryb w akwakulturze jest możliwa w prawie każdym regionie świata. Wielkość produkcji ryb w skali globalnej od kilkadziesiąt lat obserwuje się ciągły wzrost, który po roku 2000 wynosi corocznie średnio o 6,2%, co jest powodem przede wszystkim zmian żywnościowych ludzi (FAO,2018). Jednocześnie można stwierdzić, że produkcja ryb w akwakulturze jest alternatywą dla połowów morskich. Tym bardziej, że ilość ryb morskich ulega zmniejszeniu ze względu zanieczyszczenie wód oraz nadmierne ich przełowienie (De Leo et al., 2014).

W Unii Europejskiej pstrąg tęczy (*Oncorhynchus mykiss*) jest jednym z najważniejszych gatunków hodowanym w akwakulturze, z całkowitą roczną produkcją wynoszącą ponad 240 tys. ton a Polska z roczną produkcją wynoszącą około 19 tys. ton jest na czwartym miejscu wśród wszystkich krajów UE i na 5 miejscu wśród wszystkich krajów europejskich (FEAP, 2016).

Każda produkcja rybacka, a w szczególności chów pstrąga wymaga dokładnej znajomości warunków produkcji oraz czynników chemicznych i biologicznych obecnych w środowisku (Kocer et al., 2014; Azaria, Rijn 2018; Tahar et al., 2018). Do zasilania stawów hodowlanych niezbędna jest wysokiej jakości, zimna, dobrze natleniona woda o stałym przepływie, pobierana zazwyczaj z niewielkich cieków albo źródeł (Sindilariu et al., 2009). Przyjmuje się, że do wyprodukowania 1 tony pstrąga potrzeba nawet 86 tys. m<sup>3</sup> wody (Chen et al., 1997; Badiola et al., 2018; Becke et al., 2019).

Jakość wód śródlądowych uzależniona jest w znacznym stopniu od ich zlewni, na którą składa się rodzaj podłoża, budowa geologiczna, szata roślinna, a przede wszystkim formy działalności człowieka. Główne źródła zanieczyszczeń wód wynikają z antropopresji

pochodzącej z rolnictwa, przemysłu, turystyki, opadów atmosferycznych, a także hodowli i chowu ryb (Bonisławska et al., 2013; Farmaki et al., 2014; Mazaheri et al., 2014; Cymes, Glińska-Lewczuk, 2016).

Zastanawiając się nad wyborem określonej technologii gospodarowania wodą w chowie pstrąga, należy uwzględnić nie tylko opłacalność produkcji ale także wpływ systemu produkcyjnego na środowisko przyrodnicze (Brinker et al., 2005). Z powodu zmniejszania się zarówno jakościowych i ilościowych zasobów wodnych zdalnych do wykorzystania w produkcji pstrąga, wprowadza się technologie uzdatniania wód zużytych pozwalające na ich wielokrotne wykorzystanie w systemie recyrkulacji (Spiliotopoulou et al., 2018). Polega on na wielokrotnym wykorzystaniu wody po jej mechanicznym i biologicznym oczyszczeniu. Działania te podejmuje się w celu obniżenia zapotrzebowania na wodę oraz zmniejszenia emisji składników biogenych do środowiska. Systemy tego rodzaju z założenia powinny posiadać wiele zalet takich jak: oszczędność energii i wody, dokładna kontrola jakości wody oraz ograniczone oddziaływanie na środowisko, jednak nie zawsze udaje się to uzyskać (Clark et al., 2017).

Produkcja pstrąga, jak i każda inna produkcja zwierzęca, jest źródłem odpadów. Ryby nie mogą oddzielić swojej przestrzeni życiowej od obszaru wydalania. Powoduje to pogorszenie jakości wody w systemie produkcyjnym, prowadząc do słabszego wzrostu ryb oraz zwiększenia częstości występowania chorób (Bhatnagar, Garg, 2000; Farmaki et al., 2014). W intensywnym chowie ryby przetrzymuje się w znacznym zagęszczeniu, co jest wymogiem zachowania opłacalności produkcji. Efektem tego jest intensywne karmienie ryb, a to wpływa na zwiększenie się w wodzie ilości metabolitów oraz resztek nieskarmionej paszy. Duże zagęszczenie ryb powoduje wzrost stężenia w wodzie innych zanieczyszczeń oraz deficyty tlenowe (Bhatnagar, Devi, 2013).

W akwakulturze przez odpady rozumie się wszystkie substancje, które nie są pobrane z wody przez ryby, a więc jest to w głównej mierze: niezjedzona pasza, ekskrementy, nawozy mineralne i organiczne oraz środki lecznicze i dezynfekujące dodawane do wody w celu poprawy warunków bytowania ryb (Bharti, Katyal, 2011; Mirsaeedghazi, 2015). Problem jakości wody w produkcji rybackiej związany jest zarówno z czynnikami fizycznymi jak i chemicznymi, takimi jak: zbyt wysoka lub niska zawartość tlenu rozpuszczonego, wysokim lub niskim stężeniem związków azotowych, fosforowych itp. Zanieczyszczenia wód w stawach chowu ryb mają wpływ na rozwój w nich organizmów, w tym niekorzystnych dla bytujących w nich ryb oraz dla organizmów odbiornika wód zrzucanych ze stawów. Chów ryb w stawach wywiera bezpośredni wpływ na ich biocenozę oraz biocenozę odbiornika (Bureau, Cho, 1999;

Hernández, Roman, 2016). Ponieważ gospodarstwa rybackie zlokalizowane są najczęściej w górnych częściach zlewni, z tego względu niewielkie nawet zanieczyszczenia mogą istotnie pogorszyć jakość wód w cieku do którego odprowadzane są wody poprodukcyjne (Ray et al., 2009; Sharma et al., 2018). W odbiornikach naturalnych, wody odprowadzane z gospodarstw rybackich ulegają biodegradacji, naruszając w ten sposób stan jego równowagi biologicznej. Dlatego tak bardzo istotna jest ochrona jakości wód mająca na celu powstrzymanie procesów ich degradacji, utrzymaniu w nich walorów przyrodniczych na dotychczasowym poziomie bądź nawet poprawę ich stanu ekologicznego (Kocer, Sevgili, 2014; Clark, Tilman, 2017).

Głównym celem osiągnięcia naukowego (cyklu publikacji powiązanych tematycznie) była analiza wpływu technologii gospodarowania wodą stosowanej w hodowli pstrąga tęczowego (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum 1792) na jakość wód powierzchniowych. Osiągnięcie celu głównego było możliwe w wyniku realizacji celów szczegółowych:

1. Ocena wpływu zastosowanej technologii gospodarowania wodą w hodowli pstrąga na jakość wód powierzchniowych.
2. Ocena możliwości wykorzystania wskaźnika  $WQI_{CCME}$  do oceny wpływu technologii stosowanej w produkcji pstrąga na jakość wód.
3. Ocena efektywności wykorzystania rowów z roślinnością hydrofitową oraz stawów sedymentacyjnych do poprawy jakości wód odprowadzanych z gospodarstw pstrągowych.

#### 4.3.2. Metodyka

##### Obiekty badań

Według powszechnie stosowanego podziału technologii zarządzania wodą w produkcji pstrąga tęczowego stosowane są systemy - przepływowy oraz recyrkulacja wód. Na podstawie przeprowadzonych badań w pracy wyróżniono dodatkowo jeszcze jeden, czyli system kaskadowy. Stanowi on element pośredni, ponieważ łączy pewne cechy obu tych technologii. W gospodarstwach stosujących kaskadę woda po przepłynięciu przez staw nie jest odprowadzana poza gospodarstwo jak w systemie przepływowym, a kierowana jest do następnych stawów położonych poniżej. W tym systemie ilość stopni kaskady odpowiadała ilości stawów ułożonych szeregowo. Woda jest wielokrotnie wykorzystywana, jednak w odróżnieniu od systemu recyrkulacji nie jest ciągle w tym samym stawie, jak również nie jest

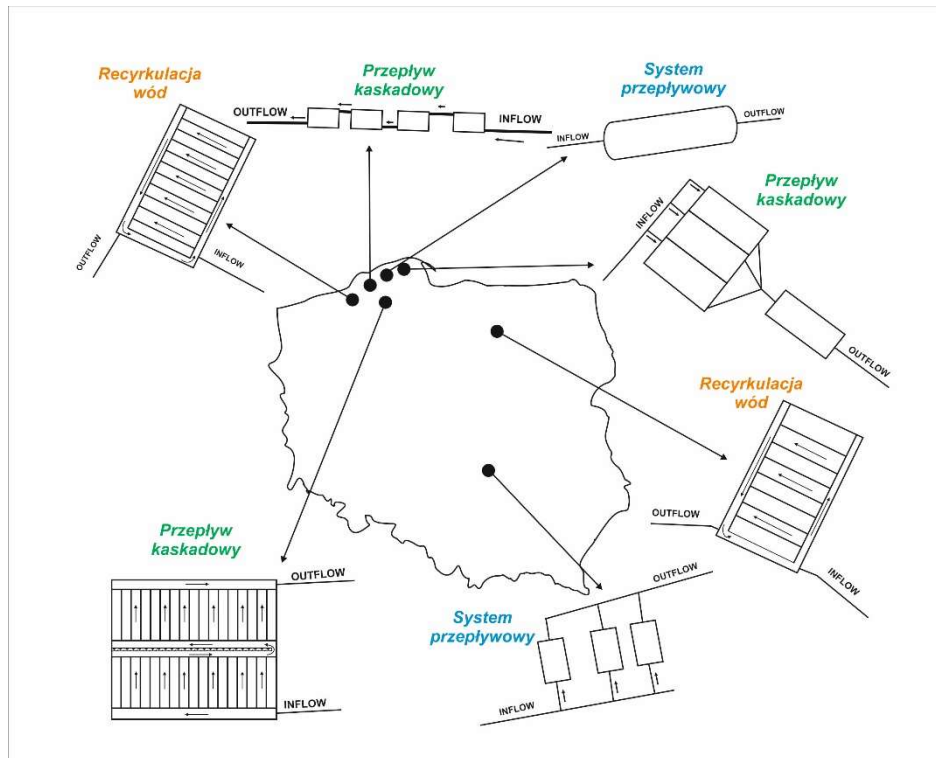


odprowadzana do odbiornika, a jest ponownie wykorzystywana do zasilania następnego obiektu.

Badania prowadzono w latach 2010-2018 w siedmiu gospodarstwach pstrągowych położonych w różnych regionach Polski, w których są wykorzystywane zróżnicowane sposoby gospodarki wodnej (rys. 1). Obiekty podzielono na trzy grupy różnicując je pod względem wykorzystywanej technologii obiegu wody, tj. po dwa ośrodki stosujące jednokrotne wykorzystanie wody (system przepływowy) i recyrkulację wód oraz trzy wykorzystujące przepływ kaskadowy. Dwa gospodarstwa wykorzystywały dwustopniową kaskadę, natomiast jeden czterostopniową. W gospodarstwach stosujących recyrkulację wód stosowano recyrkulację nisko intensywną, w której stopień ponownego wykorzystania wód wynosił około 96%. Całkowita wymiana wody w stawach następowała w ciągu jednej doby. W gospodarstwach stosujących system przepływowy na wyprodukowanie 1 kg ryb zużywane było około 30 m<sup>3</sup> świeżej wody, w systemie kaskadowym 20 m<sup>3</sup>, natomiast w systemie recyrkulacji około 3 m<sup>3</sup>.

Ilość wody przepływającej przez badane stawy była zróżnicowana i uzależniona od rodzaju stosowanego rozwiązania gospodarki wodnej. W gospodarstwach stosujących system przepływowy ilość wody przepływającej przez staw kształtowała się średnio w granicach 8-12 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, w obiektach stosujących system kaskadowy 28-36 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, natomiast w gospodarstwach wykorzystujących recyrkulację wody – 300-350 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>.

Wody odpływające ze stawów przed ich odprowadzeniem do odbiornika w pięciu gospodarstwach przepływały przez stawy sedymentacyjne, a pozostałych przez rowy podczyszczające. W celu zwiększenia skuteczności usuwania biogenów rowy podczyszczające zostały obsadzone trzcina pospolitą (*Phragmites australis*) i wierzbą białą (*Salix alba L.*). Roślinność szuwarową umieszczono po każdej stronie rowu w pasie 1/3 jego szerokości, natomiast wierzbę sadzono co 50 cm na styku ziemi i wody oraz w odległości 50 cm od brzegu. Zagęszczenie trzciny było charakterystyczne dla naturalnych siedlisk jezior i rzek.



Rys. 1. Lokalizacja gospodarstw rybackich

We wszystkich analizowanych gospodarstwach pstrągi karmione były dwukrotnie w ciągu doby. Wykorzystywany granulat paszowy stanowił mieszaninę mączki rybnej, mączki z krwi oraz śruty z: soi, kukurydzy i pszenicy, a także tłuszczu drobiowego i rybnego oraz oleju sojowego.

### Pobór próbek i procedury analityczne

W celu oceny zmian jakości wód w każdym gospodarstwie wyznaczono punkty pomiarowe w miejscu dopływu wody do gospodarstwa, odpływu ze stawów oraz z gospodarstwa. W wyznaczonych punktach za pomocą wieloparametrycznej sondy YSI 6600 *in situ* oznaczono tlen rozpuszczony w wodzie oraz jej pH, przewodność elektrolityczną właściwą i temperaturę. Jednocześnie z tych samych miejsc pobierano próby wody do analizy laboratoryjnej. Oznaczono w nich: zawiesinę ogólną, BZT<sub>5</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NH<sub>4</sub>, N<sub>Kiejdahla</sub>, P<sub>og</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Wszystkie analizy wykonano zgodnie ze Standard Methods (APHA 1992).

## Obliczanie wskaźników jakości wody

Do oceny jakości wody wykorzystano wskaźnik jakości wody ( $WQI_{CCME}$ ) obliczony na podstawie metody opracowanej przez Kanadyjską Radę Ministrów Środowiska (Canadian Council 2001). Do obliczeń indeksu  $WQI_{CCME}$  wykorzystano 8 parametrów fizycznych i chemicznych wody (tlen, pH, substancja rozpuszczona,  $BZT_5$ ,  $P_{og}$ ,  $N-NH_4$ ,  $N-NH_3$ ,  $N-NO_2$ ), dla których w Rozporządzeniu Ministra Środowiska RP z dnia 4.10.2002r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb w warunkach naturalnych (Dz.U. 176, poz. 1455) zgodnej z dyrektywą 2006/44/EC w sprawie jakości słodkich wód wymagających ochrony lub poprawy w celu zachowania życia ryb (Directive 2006/44/EC) określono wartości graniczne warunkujące możliwość życia ryb łososiowatych.

## Analizy statystyczne

Do statystycznego opracowania wyników pomiarów terenowych i analiz laboratoryjnych wykorzystano następujące programy:

1. Liniowe współczynniki korelacji Pearsona obliczono za pomocą aplikacji Statistica 13.
2. Jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA), jako kolejny krok analizy wariancji zastosowano test Duncana na poziomie  $p < 0,05$  - analizę przeprowadzono w programie Statistica 10.
3. Analizę głównych składowych (PCA) - przy użyciu pakietu oprogramowania CANOCO 4.5 oraz XLSTAT 2018 software.
4. Hierarchiczną analizę skupień (HCA) przy użyciu metody Warda - analizę przeprowadzono w programie Statistica 13.

### 4.3.3. Wyniki badań

**Osiągnięcie celu szczegółowego 1:** Ocena wpływu zastosowanej technologii gospodarowania wodą w hodowli pstrąga na jakość wód powierzchniowych.

Środowisko wodne jest złożonym systemem składającym się z wielu zmiennych decydujących o jakości wody. Jednak tylko kilka z nich odgrywa decydującą rolę w produkcji ryb. Jednym z najważniejszych parametrów wpływających na możliwość prowadzenia hodowli pstrąga jest tlen rozpuszczony w wodzie. Wynika to z faktu, że metabolizm ryb wymaga dużej ilości tlenu, na poziomie powyżej  $5-6 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Zatem pstrągi należą do ryb o dużych wymaganiach tlenowych, a ich tolerancja na obniżoną zawartość tlenu jest krótkotrwała.

Zmniejszenie się zawartości tlenu w wodzie poniżej  $3 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  doprowadza do osłabieniem odporności ryb, co w sytuacjach ekstremalnych prowadzi do ich śmierć (**Wykaz osiągnięć – I.B.1**).

Stężenie tlenu oraz temperatura wody zasilającej analizowane gospodarstwa w całym okresie badań znajdowały się na optymalnym poziomie. Przez większość czasu pod względem większości wskaźników woda dopływająca do gospodarstw rybackich spełniała kryteria wymogów jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb łososiowatych zgodnie z Dz.U. 176, poz. 1455 oraz dyrektywą 2006/44/EC. Jedynie stężenie N-NO<sub>2</sub> oraz substancji rozpuszczonej były nieznacznie przekroczone. W wodzie zasilającej gospodarstwa stosujące recyrkulację wód odnotowano także nieznaczne przekroczenie dopuszczalnego stężenia fosforu ogólnego oraz okresowo przekroczone wartości BZT<sub>5</sub>. Wody dopływające do wszystkich badanych gospodarstw charakteryzowały się niską i stabilną zawartością N-NH<sub>4</sub> (**Wykaz osiągnięć – I.B.2, B.3**).

W wodzie zasilającej gospodarstwa rybackie średnie stężenie azotu ogólnego było niskie i nie przekraczało  $2,27 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . W jego składzie dominowały azot organiczny oraz N-NO<sub>3</sub>. Wody dopływające do stawów charakteryzowały się niewielkimi zmianami wartości pH. Zasolenie wody było niskie, a stężenie poszczególnych substancji nie odbiegało od wartości charakterystycznych dla naturalnych wód powierzchniowych rejonów Polski, w których były zlokalizowane badane gospodarstwa (**Wykaz osiągnięć – I.B.2, B.3**).

**Po wykorzystaniu wody w chowie pstrąga w odpływach ze stawów wszystkich typów gospodarstw nastąpiło pogorszenie się jej jakości. Stwierdzono wzrost stężenia N-NO<sub>2</sub>, substancji rozpuszczonej oraz BZT<sub>5</sub>. W gospodarstwach wykorzystujących system przepływowy oraz dwustopniową kaskadę pogorszenie jakości wody było mniejsze niż stosujących recyrkulację wód i czterostopniową kaskadę. W tych gospodarstwach stwierdzono, że w wodzie pochodzącej wartości BZT<sub>5</sub> trwale przekraczały poziomy graniczne dla wymogów jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb łososiowatych w warunkach naturalnych (**Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2**). Wynikało to z faktu, że w gospodarstwach wykorzystujących recyrkulację wód po przepłynięciu jej przez stawy była ona ponownie wykorzystywana. Natomiast w gospodarstwie stosującym czterostopniową kaskadę woda odpływając ze stawów położonych wyżej bez ich oczyszczenia kierowana była do stawów położonych niżej. W obu tych systemach w wyniku wielokrotnego wykorzystania wody stopniowo zwiększały się w niej ilości substancji organicznej, co przyczyniało się do wzrostu wartości BZT<sub>5</sub> (**Wykaz osiągnięć - I.B.1, II.D.1.16**).**

Po wykorzystaniu wody w produkcji pstrąga stężenie tlenu w wodzie odpływającej ze wszystkich badanych stawów było niższe niż w wodzie zasilającej obiekty, ale nadal znajdowało się na optymalnym dla chowu pstrąga poziomie. W celu utrzymania odpowiednich warunków tlenowych we wszystkich gospodarstwach stosowano napowietrzanie wód przy wykorzystaniu czystego tlenu lub napowietrzanie mechaniczne – aeratory (**Wykaz osiągnięć - I.B.2**).

W wodzie wykorzystanej w hodowli pstrąga tęczowego stężenie azotu ogólnego uległo zwiększeniu. Było to spowodowane tym, iż prowadzenie chowu pstrąga w warunkach akwakultury powoduje stopniowy wzrost zawartości metabolitów ryb oraz niestrawionych resztek paszy, przyczyniając się do zwiększenia ilości azotu w wodzie (**Wykaz osiągnięć - I.B.2**).

**W gospodarstwach stosujących system przepływowy oraz dwustopniową kaskadę w wodzie odpływającej ze stawów udział poszczególnych form azotu był podobny jak w wodzie zasilającej gospodarstwa. Odmienna sytuacja wystąpiła w gospodarstwach stosujących czterostopniową kaskadę oraz recyrkulację wód. W wodzie odpływającej z tych gospodarstw obserwowano redukcję N-NO<sub>3</sub> oraz azotu organicznego przy jednoczesnym znacznym zwiększeniu się udziału N-NH<sub>4</sub>, którego stężenie okresowo przekraczało wartości niebezpieczne dla ryb. (Wykaz osiągnięć - I.B.2, II.D.1.16).**

Wzrost zawartości azotu amonowego w wodzie odpływającej ze stawów obu typów gospodarstw był efektem amonifikacji azotu zawartego w związkach organicznych znajdujących się w wodzie oraz w podawanej paszy. Jednocześnie w wodzie, która wielokrotnie była wykorzystana w stawach rosło stężenie metabolitów ryb wpływając na wzrost zawartości formy amonowej azotu (**Wykaz osiągnięć-I.B.2**).

**Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości azotu amonowego w wodzie gospodarstw wykorzystujących recyrkulację wód oraz czterostopniową kaskadę zwiększało się stężenie N-NH<sub>3</sub>. Obserwowane średnie stężenie amoniaku niezjonizowanego w wodzie badanych stawów nie przekraczało jednak 0,020 mg·dm<sup>-3</sup>. Obserwowane stężenia były znacznie niższe od niebezpiecznych nie stanowiąc zagrożenia dla bytowania ryb, za które uznaje się wartość na poziomie 0,07-0,39 mg·dm<sup>-3</sup> (Wykaz osiągnięć-I.B.1, B.2).**

**W wodzie wykorzystanej w produkcji pstrąga we wszystkich gospodarstwach odnotowano wzrost stężenia fosforu ogólnego. Nie stwierdzono jednak zależności między sposobem gospodarowania wodą, a jego stężeniem w wodzie. Na zawartość fosforu w wodzie wpływ wywierało przede wszystkim stosowanie znacznych ilości paszy, która w swoim składzie zawierała 10,0 gP·kg<sup>-1</sup>. Duża zawartość fosforu w paszy podawanej rybam była**

spowodowana potrzebą uzyskania optymalnego wzrostu i rozwoju kości (**Wykaz osiągnięć- I.B.1, B.2**).

**Stwierdzono, że w wodach odprowadzanych z obiektów hodowlanych następował znikomy wzrost zasolenia, a nawet w przypadku  $\text{HCO}_3^-$  oraz  $\text{Cl}^-$  jego nieznaczną redukcję. Dowodzi to, że zastosowana technologia gospodarowania wodą w produkcji pstrąga nie wpływała na wskaźniki zasolenia wód. (Wykaz osiągnięć – poz. I.B.3, B.4).**

Analiza jakości wody odpływającej z poszczególnych typów gospodarstw pozwoliła zauważyć wyraźny podział wód wykorzystanych w produkcji pstrąga na dwie grupy. Pierwszą grupę o lepszej jakości stanowiły wody odpływające ze stawów z gospodarstw stosujących system przepływowy oraz dwustopniową kaskadę, zaś drugą o wyraźnie gorszej jakości stanowiły wody odprowadzane z gospodarstw stosujących czterostopniową kaskadę oraz recyrkulację wód. Potwierdzają to także wyniki analizy statystycznej parametrów jakości wody przeprowadzonej metodą Warda (**Wykaz osiągnięć – poz. I.B.1, B.2**).

Istotnym czynnikiem wpływającym na śmiertelność ryb oprócz wartości biologicznej ryb są elementy związane z jakością wody w stawach. **Przeprowadzone badania wykazały, że śmiertelność ryb była uwarunkowana jakością wody w stawach, ściśle związaną z wykorzystywaną technologią gospodarowania wodą. W gospodarstwach stosujących system przepływowy i dwustopniową kaskadę śmiertelność ryb była na zbliżonym poziomie i kształtowała się w przedziale 0,3-0,9 %. W gospodarstwach stosujących recyrkulację wód i czterostopniową kaskadę, w których jakość wody była gorsza, śmiertelność ryb była wyższa niż w pozostałych gospodarstwach wynosząc 0,7-1,2 %. (Wykaz osiągnięć – poz. I.B.1, B.2).**

**Osiągnięcie celu szczegółowego 2:** Ocena możliwości wykorzystania wskaźnika  $\text{WQI}_{\text{CCME}}$  do oceny wpływu technologii stosowanej w produkcji pstrąga na jakość wód.

Jakość wody powierzchniowej jest oceniana na podstawie wskaźników oraz celów jej przeznaczenia. Takie podejście nie dostarcza jednak wystarczających informacji na temat ogólnej jakości wody ani trendów przestrzennych i czasowych. W celu ułatwienia oceny przydatności wody do celów rybackich należy sprowadzić parametry jakościowe wody do postaci jednej wartości przy ich jednoczesnym odniesieniu do poziomów normatywnych. Do tego celu powinno się wykorzystać indeks WQI, dzięki czemu uzyskane wyniki jakości zostaną przedstawione w sposób jednoznaczny.

Obliczone wartości indeksów  $WQI_{CCME}$  dla wód zasilających wszystkie typy gospodarstw pozwalają stwierdzić, że do gospodarstw wykorzystującego system przepływowy oraz stosujących system kaskadowy dopływały wody dobrej jakości (Fair). Jakość tych wód była zazwyczaj odpowiednia do chowu pstrąga, jednak okresowo zawartość substancji przekraczała wartości dopuszczalne. Wody te, wg analizy statystycznej przeprowadzonej metodą Warda, stanowiły odrębny klaster wód o lepszej jakości. Do drugiego klastra zaliczały się wody o gorszej jakości dopływające do gospodarstw wykorzystujących recyrkulację wód. Gospodarstwa te były zasilane wodami nieodpowiedniej jakości (Marginal), których jakość często mogła zagrażać bytowaniu ryb przekraczając wartości niebezpieczne dla ich życia (Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2).

**W gospodarstwach stosujących system przepływowy po przepłynięciu wody przez stawy hodowlane wartość indeksu  $WQI_{CCME}$  nieznacznie się zmniejszyła co nie spowodowało zmiany ich klas. Stwierdzono, że w przypadku gospodarstw wykorzystujących dwustopniową kaskadę woda po jej wykorzystaniu w hodowli pstrąga, mimo zmniejszenia się wartości indeksu, nie zmieniła swojej klasy. (Wykaz osiągnięć – poz. I.B.1, B.2).**

Badania wykazały, że w przypadku gospodarstwa stosującego czterostopniową kaskadę w miarę przepływu wody przez kolejne stawy pstrągowe jej jakość pogarszała się. Wartość indeksu  $WQI$  po przepłynięciu wody przez dwa pierwsze stawy nie uległa jednak zmianie pozostając w kategorii wód dobrej jakości (Fair). Po wykorzystaniu wody w kolejnych stawach nastąpiło gwałtowne obniżenie wartości indeksu powodując zmianę jej klasy na najniższą w skali skupiające wody złej jakości (Poor). Na podstawie wskaźnika  $WQI_{CCME}$  badane wody w tym gospodarstwie podzielono na dwie grupy. Pierwszą o lepszej jakości stanowiły wody dopływające ze stawów będących na dwóch pierwszych stopniach kaskady i drugą, o wyraźnie gorszej jakości obejmowała wody odpływające z kolejnych stawów (Wykaz osiągnięć –I.B.2).

**Stwierdzono, że wody odpływające w z gospodarstw stosujących recyrkulację charakteryzowały się niskimi wartościami indeksu  $WQI_{CCME}$ . Badania wykazały, że w wyniku wielokrotnego wykorzystania wody w chowie pstrąga następuje istotne zmniejszenie się wartości indeksu  $WQI$ . Stosowanie w chowie pstrąga systemu recyrkulacji powodowało zmianę jej jakości z kategorii nieodpowiedniej (Marginal) na złą (Poor), najniższą w skali. Jakość tych wód była prawie zawsze niekorzystna i znacząco odbiegała od wartości pożądanых. Na obniżenie wartości indeksu wpłynął przede wszystkim wzrost stężenia  $N-NH_4$ ,  $P_{og}$ , oraz  $N-NO_2$  (Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2).**



**Osiągnięcie celu szczegółowego 3:** Ocena efektywności wykorzystania rowów z roślinnością hydrofitową oraz stawów sedymentacyjnych do poprawy jakości wód odprowadzanych z gospodarstw pstrągowych.

Podczas chowu ryb powstają zanieczyszczenia rozpuszczalne w wodzie, które w wysokiej koncentracji stanowią poważne zagrożenie dla środowiska wodnego. Wysokie stężenie biogenów w wodach odprowadzanych z gospodarstw rybackich może przyspieszyć eutrofizację wód odbiornika powodując zaburzenie w nim równowagi ekologicznej. W badanych gospodarstwach zastosowano dwa typy rozwiązań, czyli ziemne stawy sedymentacyjne oraz rowy doczyszczające. W stawach sedymentacyjnych nie stosowano roślinności hydrofitowej. Zakładany efekt oczyszczania miał się odnosić głównie do redukcji zawiesiny organicznej, dzięki czemu miało nastąpić między innymi obniżenie wartości BZT<sub>5</sub> w wodzie odprowadzanej z obiektów chowu pstrąga. Strefę brzegową rowów doczyszczających w celu zwiększenia ich skuteczności usuwania biogenów obsadzono roślinnością szuwarową. Funkcjonowanie takiego układu, w wyniku sedymentacji zawiesiny znajdującej się w wodzie, związane było z powolnym ich wypływaniem. W celu przywrócenia pierwotnych warunków co 10 lat usuwano nagromadzony osad denny i porastającą je roślinność (Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.3, B.4).

**Przeprowadzone badania nie potwierdziły zakładanego korzystnego wpływu rowów doczyszczających na jakość odprowadzanych do odbiornika wód. Jedynie w przypadku P<sub>og</sub> stwierdzono jego nieznaczną redukcję. A nawet wykazano w przypadku części wskaźników (BZT<sub>5</sub>, substancji rozpuszczonej, N-NO<sub>2</sub>, N-NH<sub>4</sub>) wzrost ich zawartości w wodzie.** Na taką sytuację mogło mieć wpływ uruchamianie biogenów zakumulowanych w osadach dennych rowu. Jednocześnie należy stwierdzić, że efektywność rowu doczyszczającego była zróżnicowana w poszczególnych porach roku. W okresie wegetacyjnym efektywność usuwania biogenów była wyższa niż w okresach poza wegetacyjnych (Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2). **Badania wykazały, że także wykorzystanie stawów sedymentacyjnych nie przyniosło oczekiwanych efektów. W wodzie odprowadzanej z tych gospodarstw obserwowano marginalną poprawę jej jakości.** Jedynie w przypadku wartości BZT<sub>5</sub> obserwowano nieznaczną redukcję. W przypadku pozostałych wskaźników jakości wody ich stężenie nie ulegało zmianie, a nawet obserwowano nieznaczne pogorszenie się jakości wody (Wykaz osiągnięć – I.B.3, B.4).



W celu ochrony ekosystemów rzek do których odprowadzane są wody pochodzące należy podjąć bardziej efektywne działania na rzecz ich oczyszczania. Stawy sedimentacyjne można w łatwy sposób przekształcić w powszechnie stosowane oczyszczalnie hydrofitowe. Takie systemy zarówno z systemem poziomym czy pionowym są powszechnie stosowane do oczyszczania ścieków pochodzących z obiektów akwakultury. Efektywność redukcji ChZT w takich układach wynosi ponad 70%, a azotu i fosforu, odpowiednio o ponad 40% i 60% (Schulz et al. 2003; Konnerup et al. 2011) (**Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2**).

W przypadku rowów doczyszczających brak znaczącej poprawy parametrów jakości wody, a nawet ich pogorszenie wynika z małej zdolności oczyszczania. Konstrukcja rowu, czyli zbyt duża warstwa wody, niska turbulencja przepływu wody, ograniczony kontakt ze strefą absorpcji rośliny i niska gęstość roślin utrudniają zatrzymanie w wystarczającym stopniu składników odżywczych. Niewielka skuteczność oczyszczania wody była też spowodowana rzadkim (co 10 lat) usuwaniem materii organicznej zdeponowanej w postaci osadów dennych i nadziemnych części roślin. W celu zwiększenia skuteczności podczyszczania wody odpływającej ze stawów hodowlanych należy zwiększyć powierzchnię czynną dna rowu. Spowoduje to lepszy kontakt płynącej wody z absorbującą częścią rośliny. Można to osiągnąć obniżając poziom wody w rowie do kilku cm i kierując go tylko do strefy korzeniowej roślin. Jednocześnie roślinność powinna pokrywać całą powierzchnię dna rowu. W celu usunięcia zakumulowanych biogenów w roślinności oraz w osadach dennych należy okresowo (co najmniej raz na dwa lata) usuwać nadziemne części roślin i oczyszczać rów (**Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2**).

Jednocześnie oprócz istniejących już elementów doczyszczających w badanych gospodarstwach zaleca się wprowadzić dodatkowe systemy oczyszczania wód poprodukcyjnych. System taki powinien składać się ze złoża biologicznego wraz ze stopniem denitryfikacyjnym, dzięki czemu nastąpi większa redukcja biogenów mogących negatywnie wpływać na ekosystem odbiornika (**Wykaz osiągnięć – I.B.1, B.2**).

#### **4.3.4. Wnioski**

Głównym aspektem badań realizowanych na przykładzie siedmiu gospodarstw prowadzących produkcję pstrąga tęczowego w warunkach akwakultury było poznanie wpływu wykorzystywanej technologii gospodarowania wodą na jakość wód powierzchniowych.

W czterech pracach składających się na osiągnięcie naukowe, pt. „**Wpływ technologii gospodarowania wodą w hodowli pstrąga tęczowego (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum**

**1792) na jakość wód powierzchniowych”** przedstawiono wyniki badań stanowiące istotny wkład w zarządzanie jakością wody w akwakulturze oraz wspieranie decyzji o wyborze technologii gospodarowania wodą w produkcji pstrąga tęczowego.

Na podstawie wyników badań opisanych w publikacjach stanowiących osiągnięcie naukowe sformułowano następujące wnioski:

1. W wodzie odpływającej ze stawów hodowlanych wszystkich typów gospodarstw nastąpiło pogorszenie się jej jakości. Nasilenie oddziaływania wykorzystywanej technologii gospodarowania wodą na jakość wód w stawach można ułożyć w następujący szereg: system przepływowy-dwustopniowa kaskada-czterostopniowa kaskada-recykulacja wód.
2. W gospodarstwach stosujących system przepływowy oraz dwustopniową kaskadę w wodzie odpływającej ze stawów udział poszczególnych form azotu był podobny jak w wodzie zasilającej gospodarstwa. W wodzie odpływającej ze stawów stosujących recykulację i czterostopniową kaskadę obserwowano redukcję N-NO<sub>3</sub> oraz azotu organicznego przy jednoczesnym zwiększeniu się udziału N-NH<sub>4</sub>. Jego zawartość w wodzie przekraczała wielkości graniczne dla wymogów jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb łososiowatych w warunkach naturalnych stanowiąc zagrożenie dla ich bytowania.
3. Badania wykazały, że zastosowana technologia gospodarowania wodą w produkcji pstrąga nie wpływała na zawartość w wodzie fosforu ogólnego oraz zasolenia wód. W wodzie wykorzystanej w produkcji pstrąga we wszystkich typach gospodarstw odnotowano nieznaczny wzrost stężenia fosforu ogólnego oraz wskaźników zasolenia, a w przypadku HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> oraz Cl<sup>-</sup> jego nieznaczną redukcję.
4. Wykorzystanie indeksu WQI do oceny jakości i przydatności wody do hodowli pstrąga tęczowego jest dobrym narzędziem, które dzięki sprowadzeniu parametrów jakościowych wody do postaci jednej wartości ułatwia ocenę jakości wody oraz analizę trendów jej zmian.
5. W gospodarstwach stosujących system przepływowy i dwustopniową kaskadę po przepłynięciu wody przez stawy hodowlane wartość indeksu WQI<sub>CCME</sub> nieznacznie się zmniejszyła, co jednak nie spowodowało zmiany klas ich jakości. W gospodarstwach stosujących czterostopniową kaskadę oraz recykulację wód po wykorzystaniu wody w stawach nastąpiło gwałtowne obniżenie wartości indeksu powodując zmianę jej klasy na najniższą w skali

6. Śmiertelność ryb w badanych gospodarstwach była uwarunkowana jakością wody w stawach, a więc wykorzystywaną technologią gospodarowania wodą. W ośrodkach stosujących system przepływowy i dwustopniową kaskadę śmiertelność ryb była na zbliżonym poziomie, natomiast w gospodarstwach stosujących recyrkulację wód, których jakość była niekorzystna, śmiertelność ryb była wyższa. W gospodarstwie stosującym czterostopniową kaskadę wskaźnik śmiertelności ryb także był determinowany lokalizacją stawu w systemie przepływu wody. W stawach znajdujących się na pierwszych dwóch poziomach kaskady śmiertelność ryb była niższa niż pozostałych stawach.
7. Wykorzystanie stawów sedymentacyjnych i rowów doczyszczających w celu poprawy jakości wody odprowadzanej z gospodarstw rybackich nie przyniosło oczekiwanych efektów. Jedynie w przypadku fosforu ogólnego i BZT<sub>5</sub> stwierdzono jego nieznaczną redukcję. W przypadku pozostałych wskaźników ich zawartość w wodzie nie ulegała zmianie, a nawet w przypadku substancji rozpuszczonej, N-NO<sub>2</sub>, N-NH<sub>4</sub> obserwowano nieznaczne zwiększenie się ich zawartości.

#### 4.3.5. Podsumowanie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Problematyka badawcza przedstawiona w 4 pracach składających się na osiągnięcie naukowe kładzie duży nacisk na ocenę wpływu gospodarowania wodą w akwakulturze na jakość wód powierzchniowych. Wykorzystywana technologia gospodarowania wodą w produkcji pstrąga tęczowego jest głównym czynnikiem wpływającym na jakość wód, co powoduje ograniczenie prowadzenia efektywnej produkcji rybackiej. Istotą gospodarowania wodą w gospodarstwach rybackich staje się zatem monitorowanie jej jakości, a także przewidywanie jej zmian.

Wykorzystane w cyklu publikacji wskaźniki oceny jakości wody (WQI<sub>CCME</sub>) są narzędziami, przydatnymi do praktycznego zastosowania w zarządzaniu wodną w akwakulturze. Pozwalają one na szybką i łatwą interpretację dużej ilości danych, dzięki czemu są one pomocne przy decyzji o wyborze technologii gospodarowania wodą w produkcji pstrąga tęczowego, w przypadku budowy nowych lub modernizacji już istniejących gospodarstw rybackich. Uzyskane na tej podstawie informacje zweryfikowano za pomocą zaawansowanych metod statystycznych zastosowanych do danych źródłowych oraz skonfrontowano z wynikami badań innych autorów.

Gospodarstwa rybackie są obiektami mogącymi wpływać niekorzystnie na ekosystemy wód powierzchniowych. Z tego też powodu rezultaty prac mogą być wykorzystane jako element systemu wspierania decyzji w kwestii wyboru sposobu oczyszczania wód pochodzących z gospodarstw rybackich mających na celu ochronę wód powierzchniowych.

## Bibliografia

- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 15th ed. New York: Water Pollution Control Federation. **1992**.
- Azaria, S.; Rijn J. Off-flavor compounds in recirculating aquaculture systems (RAS): Production and removal processes. *Aquacult. Eng.* **2018**, 83, 57–64.
- Badiola, M.; Basurko, O.C.; Piedrahita, R.; Hundley, P.; Mendiola, D. Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. *Aquacult. Eng.* **2018**, 81, 57–70.
- Becke, C.; Schumann, M.; Steinhagen, D.; Rojas-Tirado, P.; Geist, J. Effects of unionized ammonia and suspended solids on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*. **2019**, 499, 348–357.
- Bharti, N.; Katyial, D. Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *Int. J. Environ. Sci.* **2011**, 2(1), 154-173.
- Bhatnagar, A.; Devi, P. Water quality guidelines for the management of pond fish culture. *Int. J. Environ. Sci. Te.* **2013**, 3(6), 1980-2009.
- Bhatnagar, A.; Garg, S.K. Causative factors of fish mortality in still water fish ponds under sub-tropical conditions. *Aquaculture*. **2000**,1(2), 91-96.
- Bonisławska, M.; Tański, A.; Mokrzycka, M.; Brysiewicz, A.; Nędzarek, A.; Tórz, A. The effect of effluents from rainbow trout ponds on water quality in the Gowienica River. *J. Water Land Dev.* **2013**, No. 19 (VII–XII), 23–30.
- Brinker, A.; Koppe, W.; Rösch, R. Optimizing trout farm effluent treatment by stabilizing trout feces: a field trial. *N. Am. J. Aquacult.* **2005**, 67(3), 244-258.
- Bureau, D.P.; Cho, C.Y. Phosphorus utilization by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) Estimation of dissolved phosphorus waste output. *Aquaculture*. **1999**, 179, 127-140.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg. 2001; ISBN 1-896997-34-1.
- Chen, S.; Coffin, D.E.; Malone, R.F. Sludge production and management for recirculating aquaculture system. *J. World Aquacult. So.* **1997**, 28, 303-315.
- Clark, M.; Tilman, D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environ. Res. Lett.* **2017**, 12, 1-10.

- Clark, M.; Tilman, D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environ. Res. Lett.* **2017**, 12, 1-10.
- Cymes, I.; Glińska-Lewczuk, K. The use of Water Quality Indices (WQI and SAR) for multipurpose assessment of water in dam reservoirs. *J. Elem.* **2016**, 21(4), 1211-1224.
- De Leo, F.; Miglietta, P. P.; Pavlinović, S. Marine ecological footprint of Italian Mediterranean fisheries. *Sustainability.* **2014**, 6(11), 7482-7495.
- Directive 2006/44/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on the quality of fresh waters needing protection or improvement in order to support fish life.
- Dz.U. 2002 nr 176 poz. 1455, [Regulation of the Minister of the Environment of October 4, 2002 on the requirements to be met by inland waters that are the habitat of fish in natural conditions] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 października 2002 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb w warunkach naturalnych.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). The State of World Fisheries and *Aquaculture*. FAO, Rome. 2018.
- Farmaki, E. G.; Thomaidis, N. S.; Pasias, I. N.; Baulard, C.; Papaharisis, L.; Efstathiou, C. E. Environmental impact of intensive aquaculture: Investigation on the accumulation of metals and nutrients in marine sediments of Greece. *Sci. Total Environ.* **2014**, 485, 554-562.
- Farmaki, E. G.; Thomaidis, N. S.; Pasias, I. N.; Baulard, C.; Papaharisis, L.; Efstathiou, C. E. Environmental impact of intensive aquaculture: Investigation on the accumulation of metals and nutrients in marine sediments of Greece. *Sci. Total Environ.* **2014**, 485, 554-562.
- FEAP (Federation of European Aquaculture Producers) Annual Report 2016, Belgium.
- Hernández, A. J.; Roman, D. Phosphorus and nitrogen utilization efficiency in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets with lupin (*Lupinus albus*) or soybean (*Glycine max*) meals as partial replacements to fish meal. *Czech J. Anim. Sci.* **2016**, 61(2), 67–74.
- Kocer, M.A.T; Sevgili, H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms. *Ecol. Indic.* **2014**, 36, 672–681.
- Kocer, M.A.T; Sevgili, H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms. *Ecol. Indic.* **2014**, 36, 672–681.
- Konnerup, D.; Trang, N. T. Di.; Brix, H. Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics. *Aquaculture.* **2011**, 313, 57–64.
- Mazaheri, K. Z.; Ghorbani, R.; Hajimoradloo, A.; Naeimi A. The effect of trout farm effluents on the water quality parameters of Zaringol Stream (Golestan, Iran) based on NSFQI and WQI indexes. *Environ. Resources Research.* **2014**, 1(2), 91-201.

- Mirsaeedghazi, H. Effect of trout farm on the water quality of river using Iran Water Quality Index (IRQWI): a case study on Deinachal River. *J. Food Bioprocess Eng.* **2015**, 1(1), 17-26.
- Ray, L.I.P.; Panigrahi, P.K.; Mal, B.C. Temporal variation of water quality parameters in intensively imc cultured lined pond. Universitatea de Științe Agricole și Medicină Veterinară Iași Lucrări Științifice, *Seria Zootehnie*. **2009**, 52, 429-437.
- Schulz, C.; Gelbrecht, J.; Rennert, B. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. *Aquaculture*. **2003**, 217, 207–221.
- Sharma, G. K.; Thakur, A. Bioremediation of Farm Ponds for Improving Water Quality and Fish Productivity in Bastar Plateau. *Adv. Biores.* **2018**, 9(3), 81-85.
- Spiliotopoulou, A.; Rojas-Tirado, P.; Chhetri, R.K; Kaarsholm, K.M.S.; Martin, R.; Pedersen, P.B.; Ledersen, L.F.; Andersen, H.R. Ozonation control and effects of ozone on water quality in recirculating aquaculture systems. *Water Research*. **2018**, 133, 289-298.
- Tahar, A.; Kennedy, A.; Fitzgerald, R.D.; Clifford, E.; Rowan N. Full Water Quality Monitoring of a Traditional Flow-Through Rainbow Trout Farm. *Fishes*. **2018**, 3, 28.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Działalność naukowo-badawcza, jak i prace habilitanta mieszczą się w szerokim aspekcie zagadnień związanych z gospodarowaniem wodą i oceną zasobów wodnych. Zagadnienia te obejmują trzy główne nurty badawcze:

1. Ocena wpływu zagospodarowania zlewni na funkcjonowanie jezior na obszarach młodoglacjalnych.
2. Funkcjonowanie starorzeczy na obszarach pojeziernych.
3. Jakość konsumpcyjna pstrąga tęczowego z technologii stosowanych w Polsce.

### 5.1. Wpływ zagospodarowania zlewni na funkcjonowanie jezior na obszarach młodoglacjalnych

Hydrologiczna funkcja jezior jest wyrażana albo poprzez rolę jaką pełni jezioro w zbieraniu różnych form odpływów pojawiających się w zlewni, albo (znacznie częściej) poprzez rolę jaką pełni ono w kształtowaniu warunków obiegu wody w zlewni. Układ stosunków wodnych w zlewniach kształtowany jest głównie pod wpływem zmiennych warunków meteorologicznych, a zwłaszcza wysokości i natężenia opadów, zmienności



temperatur, nasłonecznienia oraz wilgotności powietrza. Wyraźny wpływ na kształtowanie się odpływu wód wywiera także sposób zagospodarowania ich zlewni (**II.D.1.3, D.1.4**).

Znacznie większą stabilizacją odpływów charakteryzują się zlewnie leśne niż rolnicze, w których wyraźne maksimum występuje w okresach roztopowych i po ulewnych deszczach a minimum w sezonach letnich. Analiza średnio rocznych odpływów jednostkowych dla poszczególnych zlewni wykazała, że odpływy ze zlewni rolniczych są zdecydowanie wyższe i cechują się znacznie większą zmiennością niż odpływy jednostkowe ze zlewni leśnych (**II.D.1.7, D.1.8**). W badanych zlewniach zjawisko korzystnego wpływu lasu na wskaźniki odpływu potwierdza porównanie odpływów z obszaru zasilania jeziora Ardung, którego zlewnia była w ok. 85% zalesiona, z jeziorem Bukwałd o 31% zalesienia zlewni i jeziorem Sunia czy Symsar udziale zadrzewień wynoszącym do 3% (**II.D.1.9, D.1.10**).

Zmienność właściwości chemicznych wód jezior była determinowana przez takie procesy jak: sorpcja biologiczna i uwalnianie składników do wody, sedymentacja, resuspensja osadów czy też natężenie odpływów ze zlewni. Wszystkie te czynniki wpływają na kształtowanie poszczególnych wskaźników jakościowych wód krążących w zlewniach jezior i pozostają z nimi we wzajemnej relacji przyczynowo-skutkowej (**II.D.2.1**). Koncentracje składników w wodach badanych jezior nie odbiegały zasadniczo od tych, jakie prezentują wody powierzchniowe na obszarze północno-wschodniej Polski. Skład chemiczny wód powierzchniowych objętych badaniami ulegał znacznym wahaniom w ciągu roku. Zmiany jakości tych wód były powodowane przez czynniki klimatyczne (opady, topnienie pokrywy śnieżnej, parowanie), środowiskowe (spływy i zmywy powierzchniowe z terenu zlewni, użytkowanie obszaru zlewni, czy też sezonową wymianę wód) oraz biologiczne zachodzące w glebie i wodach (**II.D.2.7**).

Przeprowadzone badania wykazały, że znacząco większe wartości stężeń zanieczyszczeń występują w wodach odpływających z obszarów rolniczych. Taka sytuacja była spowodowana tym iż na glebach ornych następuje zwiększone wymywanie składników w wyniku niższego udziału sorpcji biologicznej i małej akumulacji w biomacie w stosunku do dostawy z zewnątrz niż w zlewniach seminaturalnych. W wyniku analizy porównawczej stwierdzono, że średnie stężenia azotu azotanowego (V) w wodach powierzchniowych poszczególnych obszarów badawczych były znacząco większe w odpływach rolniczych niż leśnych (**II.D.2.9, D.1.17**). Średnie stężenia substancji w wodach odpływających ze zlewni rolniczych jezior wynosiło  $3,07 \text{ mg N-NO}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$  i było ok. 10-krotnie większe niż wynosił odpływ ze zlewni leśnych oraz ok. 18-krotnie większe niż w odpływie z obszarów zabagnionych. Ze zlewni rolniczych obserwowano także znacząco większy odpływ ładunku  $\text{N-NO}_3$  niż ze

zlewni leśnych. Ze zlewni rolniczych średni ładunek wynosił  $12,9 \text{ kg N-NO}_3 \cdot \text{ha}^{-1}$  i był ok. 52-krotnie większy niż odpływ ze zlewni leśnych (**II.D.1.10, D.2.5, D.2.9**). W przypadku fosforu mniejsze koncentracje występowały w dopływach rolniczych niż w dopływach leśnych czy bagiennych. Średnie stężenie fosforu fosforanowego w dopływach rolniczych do jezior było ok. 25% niższe niż w dopływie bagiennym i ok. 30% mniejsze niż w dopływie leśnym. Natomiast w przypadku  $P_{\text{og}}$  stężenie w dopływie rolniczym było o ok. 10% niższe niż w dopływie bagiennym natomiast było o ok. 25% większe niż w dopływie leśnym. W dopływach leśnych średnia koncentracja  $\text{P-PO}_4$  była prawie 2-krotnie większa niż w dopływie leśno-stawowym, także w przypadku stężenia  $P_{\text{og}}$  obserwowano około 20% większą koncentrację w wodach dopływów leśnych niż w dopływie leśno-stawowym (**II.D.1.5, D.1.12, D.1.21**).

Bardzo niewielka część substancji, która dostaje się do zbiornika zostaje wykorzystana na produkcję biomasy roślin, ponieważ ich dostępność zależy od formy składnika. Znaczna jej część zostaje trwale zdeponowana w osadach dennych w formie organicznych i nieorganicznych połączeń z jonami żelaza, wapnia czy glinu (**II.D.1.3, D.1.6, D.1.19**). Na koncentrację fosforu w osadach dennych jezior wpływa przede wszystkim jego stężenie w dopływach. Najwyższą koncentracją tego pierwiastka cechowały się osady jezior, w dopływach których obserwowano największe średnie stężenie fosforu, natomiast najmniejszą koncentracją odznaczały się osady jezior w dopływie którego średnie stężenie fosforu było najmniejsze (**II.D.2.4, D.2.14**). W przeliczeniu na jednostkę powierzchni zlewni to największą akumulacją fosforu w osadach odznaczało się rolnicze jezioro Sunia, w którym zgromadzone było  $44,1 \text{ kg P/ha}$ , znacznie mniej znajdowało się w jeziorze Bukwałd ( $9,3 \text{ kg P/ha}$ ), a najmniejszą kumulacją odznaczały się osady leśnego jeziora Ardung ( $4,1 \text{ kg P/ha}$ ). Zaczną różnicę w koncentracji w poszczególnych zbiornikach obserwowano także w przypadku azotu, którego największą zawartością odznaczały się osady jeziora Sunia, a najmniejszą cechowały się osady leśnego jeziora Ardung. Ładunek azotu zakumulowany w osadach w przeliczeniu na powierzchnię zlewni także był największy był w jeziorze Sunia i wynosił  $315,7 \text{ kg N/ha}$ , natomiast w jeziorze Bukwałd było to  $43,2 \text{ kg N/ha}$ , a w jeziorze Ardung jedynie  $14,8 \text{ kg N/ha}$  (**II.D.1.13, D.1.14, D.1.11**).

## 5.2. Funkcjonowanie starorzeczy na obszarach pojeziernych

Starorzecza to cenne przyrodniczo akweny w dolinach rzecznych niedostatecznie dostrzegane dotąd w badaniach transportu substancji chemicznych. Część z nich zagrożona jest



eutrofizacją wskutek przejścia nadmiaru substancji chemicznych z terenów zmeliorowanych. Materia wprowadzana z wodami melioracyjnymi ulegając sedymentacji w zbiorniku przyspiesza naturalny proces redukcji jego głębokości i możliwości retencyjnych **(II.D.1.1, D.2.2)**.

Wody melioracyjne zasilające starorzecza wpływają na stan ich trofii wywołując szybsze tempo przemian biogeochemicznych. Odpływy ze zlewni rolniczych zawierając wielokrotnie większe stężenia substancji biogennej niż w wodzie starorzecznej powodują obniżenie ich wartości użytkowej. Roczny dopływ tylko N-NO<sub>3</sub> na poziomie 255 kg oraz P<sub>og</sub> w ilości 239 kg do starorzecza powodują wielokrotne przekroczenie ładunków N i P uznanych za niebezpieczne dla funkcjonowania zbiorników wodnych **(II.D.1.2)**.

Naturalny proces eutrofizacji wód zbiornika, który w efekcie końcowym przyczynia się do jego zalądowania jest skutecznie powstrzymywany także na skutek stałej wymiany wód w układzie rów melioracyjny-starorzecze-rzeka. Badane starorzecza charakteryzowały się wysoką zdolnością do retencjonowania nie tylko wody ale i substancji w niej zawartych. Najbardziej niebezpieczne dla ich funkcjonowania są okresy letnio-jesienne, gdy następuje zateżnienie większości składników, a wysoka temperatura sprzyja intensyfikacji produkcji pierwotnej. Jesienią natomiast następuje ograniczony pobór składników pokarmowych przez rośliny **(II.D.2.2, D.1.1)**. Warunki sprzyjające poprawie jakości wody w starorzeczu występują natomiast wiosną oraz podczas ociepleń śródzimowych. Starorzecza stanowią filtr biogeochemiczny dla większości zanieczyszczeń spływających ze zlewni do rzeki. Akumulują więcej substancji chemicznych aniżeli wynika to z ich możliwości retencyjnych. W efekcie zachwiania równowagi biogeochemicznej zbiorniki tego typu, pozbawione możliwości wymiany wód i materii z rzeką, zagrożone są intensywnym zamulaniem, zarastaniem i ostatecznie zalądowaniem **(II.D.1.2)**.

Materiał transportowany z rzeki w kierunku starorzecznej ma duży udział zawieszonych i rozpuszczonych składników mineralnych. Składniki te są częściowo zamieniane w warunkach wody stagnującej w substancje organiczne, tj. detrytus czy biomasa glonów. Dlatego mają one większy udział w materiale transportowanym ze zbiorników w kierunku rzeki. Podstawowym procesem generującym sedymentację w starorzeczach są zalewy rzeczne wnoszące materię allochtoniczną oraz autochtoniczną dekompozycja makrofitów i glonów. Właściwości fizyczne i chemiczne osadów są ściśle powiązane z natężeniem procesów geomorfologicznych (formowania koryta) i biocenotycznych. Sedymentacja jest ostatnim etapem procesów przemiany i transportu materii do akwenów, prawidłowości powstawania i ewolucji osadów

dostarczają ważnego źródła informacji o różnych właściwościach zbiorników wodnych i prawidłowości sedymentacji (II.A.1, A.4).

### 5.3. Jakość konsumpcyjna pstrąga tęczowego z technologii stosowanych w Polsce

Chów i hodowla ryb to specyficzna gałąź rolnictwa, wymagająca bardzo szerokiego zakresu wiedzy odnośnie samych ryb, jak i środowiska wodnego. Jedynie na podstawie dobrej znajomości specyfiki technologii chowu, jak i jej końcowego produktu hodowca może prowadzić i rozwijać swoje gospodarstwo rybackie (II.D.1.15, D.1.18, D.2.3).

Przemysł spożywczy jest jedną z najważniejszych gałęzi polskiej gospodarki. Obecnie wartość rynku ryb i ich przetworów ocenia się na kwotę ok. 4,5 mld zł, co stanowi ponad 3% wartości całego rynku artykułów żywnościowych. Główną działalnością gospodarki rybnej, zaraz po produkcji akwakultury i połowach, jest przetwórstwo rybne (II.D.1.22).

Ze względu na swój skład chemiczny ryby stanowią doskonały surowiec do przygotowania wysokowartościowych posiłków, choć jest to produkt bardzo łatwo ulegający zepsuciu. Skład chemiczny tkanki mięśniowej ryb zależy przede wszystkim od ich gatunku i charakteru odżywiania. Największe różnice, sięgające kilkudziesięciu procent, dotyczą zawartości tłuszczu i obserwowane są zwłaszcza pomiędzy rybami roślinożernymi, a drapieżnymi (II.D.1.23).

Mięso ryb, podobnie jak mięso zwierząt rzeźnych i drobiu, zawiera kilkanaście procent białka. Jest jednak lepszym jego źródłem niż inne produkty pochodzenia zwierzęcego. Ryby dostarczają znacznych ilości wysokowartościowego białka wraz z niewielką ilością energii. O wysokiej wartości odżywczej białka ryb świadczy wskaźnik jakości żywieniowej (INQ), który dla ryb i przetworów rybnych wynosi 7,61, jest on nawet większy od wartości określonej dla jaj i dwukrotnie większy niż dla produktów mięsnych i mleczarskich. Na zawartość poszczególnych składników w tkance mięśniowej ryb wpływają bez wątpienia również takie czynniki, jak: wiek, stopień dojrzałości płciowej czy stan zdrowotny. Z czynników zewnętrznych wymienić należy przede wszystkim rodzaj paszy (wpływ na zawartość tłuszczu ogółem i profil kwasów tłuszczowych), stan środowiska wodnego, a przede wszystkim możliwość kumulacji w „mięsie” ryby zanieczyszczeń środowiskowych, takich jak: metale ciężkie, pestycydy czy dioksyne (II.D.1.20, D.1.23).

Na skład chemiczny tkanki mięśniowej pstrąga, poza jakością wody i składem granulatu używanym do dokarmiania ryb, wpływ ma również pora roku. Próbkę uzyskane w poborach wiosennych charakteryzowały się mniejszą zawartością tłuszczu niż próbki z poborów

jesiennych. Zaobserwowano, iż w taki sam sposób rozkłada się zawartość suchej masy i popiołu ogółem. Zawartość białka ogółem waha się nieznacznie w zależności od pory roku. Wszystkie próbki przebadane pod kątem zawartości ołowiu i kadmu zawierały ich niewielkie ilości (często na granicy wykrywalności). Należy stwierdzić, że badania potwierdziły wysoką jakość zdrowotną i odżywczą „mięsa” pstrąga z chowu polskiego i to bez podziału na ryby produkowane w technologii ekstensywnej i intensywnej (**II.D.1.20, D.1.23**).

Marcin Sidoruk